

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

DIGITÁLNĚ ŘÍZENÝ FILTR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JAN REZ

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## **DIGITÁLNĚ ŘÍZENÝ FILTR**

DIGITALLY CONTROLLED FILTER

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**JAN REZ**

**VEDOUcí PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. MARTIN FRIEDL**

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Teleinformatika

**Student:** Jan Rez

**ID:** 134595

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2013/2014

**NÁZEV TÉMATU:**

**Digitálně řízený filtr**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s principy univerzálních filtrů. Porovnejte výhody a nevýhody dostupných integrovaných obvodů a prostudujte možnosti jejich řízení. Navrhněte vlastní uspořádání univerzálního kmitočtového filtru řízeného pomocí mikrokontroléru AVR pro laboratorní účely UTEE.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektrotechniky: Kmitočtové filtry, generátory signálů a převodníky dat. 1. vydání. Praha: BEN Technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-240-4.

[2] HÁJEK, Karel, SEDLÁČEK, Jiří. Kmitočtové filtry. 1. vyd.: Technická literatura BEN, 2002. 535 s. ISBN 80-7300-023-7.

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 4.6.2014

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Friedl

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**

*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.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se věnuje návrhu funkčního prototypu digitálně řízeného univerzálního analogového kmitočtového filtru 2. řádu. Součástí návrhu je výběr vhodné topologie zapojení filtru a výběr konkrétního integrovaného obvodu. Univerzální filtr bude obsahovat filtry typu dolní propust (DP), horní propust (HP), pásmová propust (PP) a pásmová zadrž (PZ). Filtr bude laditelný v oblasti mezního kmitočtu od 100 Hz do 15 kHz. Práce se dále zabývá analýzou zvolené konkrétní struktury zapojení univerzálního filtru a možnostmi číslicového řízení filtrů. Praktická část práce obsahuje návrh desek plošných spojů, návrh softwaru pro řízení filtru a grafické znázornění naměřených výsledků.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

amplituda, analyzátor, digitální, displej, fáze, filtr, integrovaný, jtag, kmitočet, mikrokontrolér, modul, obvod, přenos, převodník, potenciometr, univerzální, usb, zesilovač

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with design of a functional prototype universal digitally controlled analog frequency filter 2th order. Part of the design is the selection of appropriate filter topology diagram and selection of an integrated circuit. Universal filter will contain lowpass, highpass, bandpass and notch filter. The filter is tuned in cutoff frequency from 100 Hz to 15 kHz. The bachelor's thesis focuses on the circuit analysis of selected concrete structure of universal filter and possibilities of digital control filters. The practical part of this thesis includes PCB design, control software for filter and graphical representation of measured results.

## **KEYWORDS**

amplitude, analyzer, digital, display, phase, filter, integrated, jtag, frequency, microcontroller, module, circuit, gain, converter, potentiometer, universal, usb, amplifier

REZ, Jan *Digitálně řízený filtr*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 92 s. Vedoucí práce byl Ing. Martin Friedl

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Digitálně řízený filtr“ 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Martinu Friedlovi za odborné vedení, ochotu, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

Úvod	12
<b>1 Úvod do teorie filtrů</b>	<b>13</b>
1.1 Kmitočtové filtry	13
1.1.1 Princip funkce filtru	13
1.1.2 Přenosové vlastnosti filtrů	14
1.1.3 Základní typy filtrů	17
<b>2 Filtry ARC 2. řádu</b>	<b>20</b>
2.1 Topologie univerzálních filtrů 2.řádu	20
2.1.1 Univerzální filtr podle Thomase-Towa	22
2.1.2 Univerzální filtr podle Kervina-Huelsmana-Newcomba	23
2.1.3 Univerzální filtr podle Akerberga-Mossberga	24
<b>3 Elektronické řízení</b>	<b>25</b>
3.1 Digitální potenciometry	25
3.1.1 Princip funkce	25
3.1.2 Integrovaný obvod AD5242	26
3.2 D/A převodníky	27
3.2.1 Princip funkce	27
3.2.2 Integrovaný obvod TLC7528	28
<b>4 Návrh univerzálního filtru</b>	<b>30</b>
4.1 Dostupná zařízení na trhu	30
4.2 Přehled integrovaných filtrů	30
4.2.1 Integrovaný obvod UAF42	31
4.2.2 Integrovaný obvod MAX-274/275	32
4.2.3 Integrovaný obvod LTC1562	33
4.3 Volba zapojení obvodu	34
4.4 Simulace konkrétního zapojení	36
4.5 Řízení filtru a periferie	38
<b>5 Návrh hardwarové části</b>	<b>44</b>
5.1 Zapojení napájecí části	44
5.2 Zapojení části s filtrem	47
5.3 Návrh desky plošných spojů	48

<b>6</b>	<b>Návrh softwarové části</b>	<b>51</b>
6.1	Řídicí program pro mikrokontrolér AVR . . . . .	51
6.1.1	Důležité části programu . . . . .	53
<b>7</b>	<b>Ověření vlastností filtru pomocí měření</b>	<b>56</b>
7.1	Měřicí soustava . . . . .	56
7.2	Naměřené charakteristiky univerzálního filtru . . . . .	57
7.3	Korekce zobrazovaného mezního kmitočtu na LCD displeji . . . . .	59
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>61</b>
	<b>Literatura</b>	<b>62</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>64</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>65</b>
<b>A</b>	<b>Tabulky</b>	<b>66</b>
A.1	Teoretické výpočty pro mezní kmitočet filtru . . . . .	66
<b>B</b>	<b>Simulace</b>	<b>75</b>
B.1	Simulace univerzálního filtru . . . . .	75
<b>C</b>	<b>Obrázky a grafy</b>	<b>85</b>
C.1	Fotogalerie . . . . .	85
C.2	Výsledky měření univerzálního filtru . . . . .	86
<b>D</b>	<b>Výkresy</b>	<b>90</b>
D.1	Výkresy schémat . . . . .	90
<b>E</b>	<b>Obsah přiloženého CD-ROM</b>	<b>92</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Filtr jako dvojbran (upraveno podle [8]). . . . .	14
1.2	Modulová kmitočtová charakteristika dolní propusti 1.řádu. . . . .	16
1.3	Fázová kmitočtová charakteristika dolní propusti 1.řádu. . . . .	16
1.4	Modulová kmitočtová charakteristika dolní propusti v lineární ose (upraveno podle [7]). . . . .	17
1.5	Modulová kmitočtová charakteristika horní propusti v lineární ose (upraveno podle [7]). . . . .	18
1.6	Modulová kmitočtová charakteristika pásmové propusti v lineární ose (upraveno podle [7]). . . . .	18
1.7	Modulová kmitočtová charakteristika pásmové zádrže v lineární ose (upraveno podle [7]). . . . .	19
2.1	Filtr typu dolní propust Sallen-Key s jedním OZ (upraveno podle [8]).	21
2.2	Neinvertující a invertující integrátor ve smyčce (upraveno podle [8]).	21
2.3	Dva invertující integrátory s invertorem ve smyčce (upraveno podle [8]).	22
2.4	Operační zesilovač pro realizaci pásmové zádrže (upraveno podle [8]).	22
2.5	Zapojení podle Thomase-Towa (upraveno podle [8]). . . . .	23
2.6	Zapojení podle Kerwina-Huelsmana-Newcomba (upraveno podle [8]).	23
2.7	Zapojení podle Akerberga-Mossberga (upraveno podle [8]). . . . .	24
3.1	Schéma digitálního potenciometru (převzato z [23]). . . . .	26
3.2	Blokové schéma integrovaného obvodu AD5242 (převzato z [1]). . . . .	27
3.3	Schéma proudového D/A převodníku R-2R (převzato z [19]). . . . .	28
3.4	D/A převodník jako proměnný rezistor (upraveno podle [7]). . . . .	28
3.5	Blokové schéma integrovaného obvodu TLC7528 (převzato z [19]). . .	29
4.1	Krohn-Hite 3940L (převzato z [9]). . . . .	30
4.2	Schéma integrovaného obvodu UAF42 (převzato z [20]). . . . .	31
4.3	Schéma integrovaného obvodu MAX274 (převzato z [13]). . . . .	32
4.4	Schéma integrovaného obvodu LTC1562 (převzato z [11]). . . . .	34
4.5	Topologie KHN pro realizaci všech 4 typů filtrů (upraveno podle [8]).	34
4.6	Zapojení univerzálního filtru v simulátoru Multisim. . . . .	36
4.7	Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 100 Hz.	37
4.8	Blokové schéma univerzálního filtru. . . . .	38
4.9	Princip rotačního enkodéru (převzato z [15]). . . . .	39
4.10	Blokové schéma mikrokontroléru ATmega16 (převzato z [4]). . . . .	41
4.11	Návrh impedančního přizpůsobení pro univerzální filtr. . . . .	43
5.1	Blokové schéma napájecí části. . . . .	44
5.2	Schéma zapojení odrušovacího LC filtru (upraveno podle [22]). . . . .	44
5.3	Schéma zapojení Graetzova můstku. . . . .	45

5.4	Vrstva TOP. . . . .	49
5.5	Vrstva BOTTOM. . . . .	49
5.6	Osazovací výkres strany TOP. . . . .	50
5.7	Osazovací výkres strany BOTTOM. . . . .	50
6.1	Vývojový diagram programu. . . . .	52
7.1	Vektorový analyzátor Omicron Lab Bode 100. . . . .	56
7.2	Naměřená modulová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 1 kHz. . . . .	58
7.3	Naměřená fázová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 1 kHz. . . . .	58
7.4	Korekce zobrazovaného mezního kmitočtu filtru. . . . .	60
B.1	Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 1 kHz. . . . .	75
B.2	Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 2 kHz. . . . .	76
B.3	Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 3 kHz. . . . .	77
B.4	Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 4 kHz. . . . .	78
B.5	Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 5 kHz. . . . .	79
B.6	Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 6 kHz. . . . .	80
B.7	Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 7 kHz. . . . .	81
B.8	Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 8 kHz. . . . .	82
B.9	Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 9 kHz. . . . .	83
B.10	Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 10 kHz. . . . .	84
C.1	Osazená deska plošných spojů. . . . .	85
C.2	Výsledný prototyp. . . . .	85
C.3	Naměřená modulová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 3 kHz. . . . .	86
C.4	Naměřená fázová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 3 kHz. . . . .	86
C.5	Naměřená modulová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 5 kHz. . . . .	87
C.6	Naměřená fázová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 5 kHz. . . . .	87
C.7	Naměřená modulová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 10 kHz. . . . .	88
C.8	Naměřená fázová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 10 kHz. . . . .	88
C.9	Naměřená modulová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 15 kHz. . . . .	89
C.10	Naměřená fázová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 15 kHz. . . . .	89

D.1 Schéma zapojení napájecí části. . . . .	90
D.2 Schéma zapojení části s filtrem. . . . .	91

## SEZNAM TABULEK

3.1	Shrnutí parametrů integrovaného obvodu AD5242. . . . .	26
3.2	Shrnutí parametrů integrovaného obvodu TLC7528. . . . .	29
4.1	Shrnutí parametrů integrovaného obvodu UAF42. . . . .	32
4.2	Shrnutí parametrů integrovaného obvodu MAX274. . . . .	33
4.3	Shrnutí parametrů integrovaného obvodu LTC1562. . . . .	33
4.4	Shrnutí parametrů mikrokontroléru ATmega16. . . . .	40
5.1	Shrnutí parametrů transformátoru EI 54. . . . .	45
A.1	Výpočet prvků pro strukturu KHN. . . . .	66

# ÚVOD

Kmitočtové filtry jsou velice důležitou oblastí v elektrotechnice. Jsou to lineární dvojbrany. Jejich základní vlastností je selekce kmitočtových složek procházejícího signálu podle jejich kmitočtů. Filtry některé kmitočtové složky signálů propouštějí bez útlumu, jiné kmitočtové složky potlačují. Oblast použití kmitočtových filtrů je velmi bohatá. Filtry najdeme v radiotechnice, elektroakustice, v oblasti měřicí techniky, v regulační technice, v silnoproudé elektrotechnice. Velmi důležitým odvětvím je také převod analogových a digitálních signálů. V tomto odvětví využíváme anti-aliasingové filtry a rekonstrukční filtry. V dnešní době je zásadní požadavek na možnost digitálního ladění kmitočtových filtrů. Požadavky pro použití filtrů v praxi se zaměřují na možnost přeladovat mezní kmitočet filtru a vhodně nastavovat činitel jakosti  $Q$  a přenos filtru.

Práce je rozdělena do sedmi hlavních kapitol. První kapitola obsahuje popis základních teoretických principů funkce analogových filtrů. V druhé kapitole je pojednáno o konkrétních oblastech analogových filtrů, kterou zde jsou filtry ARC druhého řádu. Třetí kapitola se zabývá možnostmi číslicového řízení aktivních filtrů. Čtvrtá kapitola obsahuje přehled dostupných zařízení na trhu, přehled integrovaných filtrů, volbu vybrané topologie a její simulaci, a také jsou zde popsány základní dostupné periferie a řízení filtru pomocí mikrokontroléru. Pátá kapitola se zaměřuje na návrh hardwarové části filtru jako prototypu měřicího přístroje. Konkrétně je zde rozebrán popis všech hardwarových částí přístroje a návrh desky plošných spojů. Šestá kapitola obsahuje návrh softwarové části pro řídicí mikrokontrolér AVR. Jsou zde popsány důležité části programu a je zde uveden i vývojový diagram celého programu. V poslední kapitole, v pořadí sedmé jsou rozebrány praktické výsledky naměřené na hotovém prototypu. V přílohách jsou uvedeny teoretické výpočty prvků, simulace zapojení filtru, fotogalerie, grafické znázornění naměřených výsledků, výkresy schemat a popis příloženého CD.

# 1 ÚVOD DO TEORIE FILTRŮ

## 1.1 Kmitočtové filtry

Jak již bylo uvedeno kmitočtové filtry se objevují v mnoha oblastech elektrotechniky, zpracování signálů a v telekomunikacích. Kmitočtové filtry se v praxi dají realizovat mnoha různými způsoby. Vybrat vhodný způsob realizace filtru je jedním z prvních kroků při návrhu filtru. Z konstrukčního hlediska realizace filtru se nabízejí dvě možnosti. První možností je realizace analogového filtru, který je postaven z diskrétních součástek, popřípadě se také může jednat o hotový integrovaný blok. Výhodou tohoto řešení je relativně snadná interpretace přesných požadovaných vlastností filtru a nízká cena návrhu a použitých součástek. Druhou možností realizace filtru je použití digitálního filtru, který se používá pro digitální zpracování signálů. Číslicový filtr již není možno postavit z konkrétních součástek, bereme ho jako matematický algoritmus, který běží na konkrétním procesoru počítače. Výhodou digitálních filtrů je individuální matematická modelace požadovaných vlastností filtru a schopnost realizovat některé vlastnosti a schopnosti, které by nebylo možné realizovat pomocí analogových filtrů. Nevýhodou číslicových filtrů je značné omezení na prostředí použití filtru a výkonové omezení použité platformy.

Tato práce se zaměřuje na použití analogových filtrů, proto dále rozeberu základní druhy analogových filtrů. Nejzákladnějším druhem analogových filtrů jsou filtry RC. Vynikají jednoduchostí, dostupností a nízkou cenou použitých součástek. Jejich praktické využití je však limitováno nízkým řádem filtru a nízkým činitelem jakosti. Velmi dobrou alternativou pro stavbu filtru je další druh filtrů známý jako aktivní filtry RC (filtry ARC). Jejich výhodou je možnost realizovat teoreticky libovolný typ filtru. Filtry ARC jsou postaveny z rezistorů, kapacitorů a aktivních prvků jako jsou operační zesilovače. V současné době je velmi používaný další druh analogových filtrů, a to filtry se spínacími kapacitami. Existuje spousta dalších druhů filtrů, kterými se již nebudu detailněji zabývat, ale pouze je uvedu. Jsou to: mikrovlnné filtry, elektromechanické filtry, filtry s povrchovou akustickou vlnou, filtry s nábojově vázanými obvody, kmitočtové filtry pracující v proudovém módu, atd.

### 1.1.1 Princip funkce filtru

Základní princip funkce kmitočtových filtrů spočívá ve výběru kmitočtových složek procházejícího signálu podle jejich kmitočtů. Filtry některé kmitočtové složky signálů propouštějí bez útlumu, jiné kmitočtové složky potlačují. Tyto vlastnosti obvykle vyjadřuje modulová kmitočtová charakteristika (závislost modulu napěťového přenosu na kmitočtu). Průchod signálu filtrem vede obvykle k časovému zpoždění

signálu, což je důsledek fázových posuvů procházejících harmonických kmitočtových složek signálu. Tento jev vyjadřujeme fázovou kmitočtovou charakteristikou. Fázové vlivy filtru na signál v propustném kmitočtovém pásmu se v časové oblasti projevují jako nežádoucí přeskmy či zvlnění průběhu signálu. Ovšem ale existují případy, kdy těchto nežádoucích vlastností využíváme záměrně, např. ve fázovacích a zpožďovacích obvodech.[8]

### 1.1.2 Přenosové vlastnosti filtrů

Přenosové charakteristiky kmitočtových filtrů popisují průchod signálu přes filtr. Prochází-li přes kmitočtový filtr harmonický signál s amplitudou  $U_1$ , kmitočtem  $f_1$  a fází  $\varphi$ , získáme na výstupu filtru opět harmonický signál se stejným kmitočtem, ale jinou velikostí amplitudy a fáze ( $U_2, \varphi_2$ ).[8] Na obr. 1.1 je filtr jako dvojbran. Přenos napětí  $K_u$  harmonického signálu filtrem lze pro daný kmitočet  $f$  vyjádřit



Obr. 1.1: Filtr jako dvojbran (upraveno podle [8]).

komplexním výrazem:

$$\mathbf{K}_u = K_u \cdot e^{j\varphi} = \frac{U_2 e^{j\varphi_2}}{U_1 e^{j\varphi_1}}, \quad (1.1)$$

který můžeme rozdělit na reálnou a imaginární část. Častěji ale používáme vyjádření přenosu pomocí modulu a argumentu:

$$K_u = \frac{U_2}{U_1}, \quad \varphi = \varphi_2 - \varphi_1, \quad (1.2)$$

kde modul  $K_u$  je poměr amplitud výstupního a vstupního signálu a argument  $\varphi$  je výsledný fázový posuv (časový rozdíl vztahený na periodu) mezi výstupním a vstupním signálem jako rozdíl fází výstupního signálu  $\varphi_2$  a vstupního signálu  $\varphi_1$ .

Modul přenosu  $K_u$  je bezrozměrné číslo a často se udává v logaritmické míře, kdy platí:

$$K_u[dB] = 20 \log(K_u). \quad (1.3)$$

Toto běžně používané vyjádření umožňuje grafické znázornění velkého rozsahu hodnot. Modul a argument (fázi) přenosu lze takto vypočítat jen pro konkrétní kmitočet harmonického signálu  $\omega$ . Pro praktické použití je výhodné přenosové vlastnosti vyjádřit jako funkce kmitočtu, kdy pro každý kmitočet lze vypočítat odpovídající přenos. Závislost přenosu na kmitočtu je komplexní funkcí kmitočtu  $\mathbf{K}_u(j\omega)$ , kde platí  $\omega = 2\pi f$  nebo  $\mathbf{K}_u(p)$ , kde běžně uvažujeme  $p = j\omega$ . Přenosová funkce má nejčastěji tvar racionální lomené funkce:

$$K(j\omega) = \frac{a_m(j\omega)^m + a_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + a_1j\omega + a_0}{b_n(j\omega)^n + b_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + b_1j\omega + b_0}, \quad (1.4)$$

$$K(p) = \frac{a_m(p)^m + a_{m-1}(p)^{m-1} + \dots + a_1p + a_0}{b_n(p)^n + b_{n-1}(p)^{n-1} + \dots + b_1p + b_0}, \quad (1.5)$$

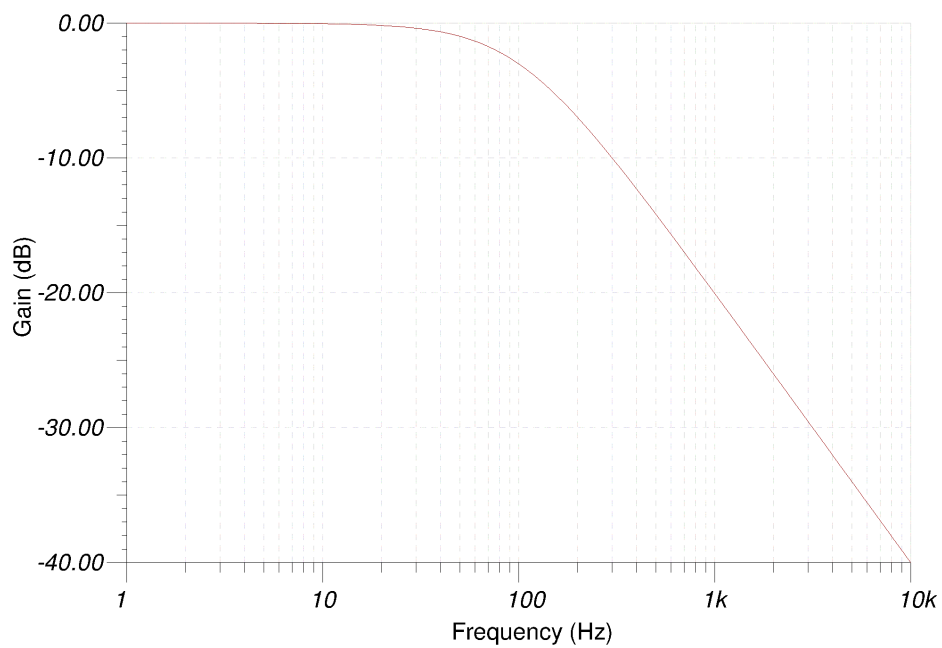
kde řád polynomu čitatele  $m$  je menší nebo roven řádu jmenovatele  $n$ . Tuto komplexní funkci opět můžeme rozdělit na modulovou a argumentovou část a obě veličiny vynést v závislosti na kmitočtu jako modulovou charakteristiku  $K(\omega)$  a argumentovou kmitočtovou charakteristiku  $\varphi(\omega)$ , často také nazývanou amplitudovou a fázovou kmitočtovou charakteristikou. Na obr. 1.2 je modulová kmitočtová charakteristika reálného filtru typu dolní propust 1.řádu v logaritmickém měřítku. Na obr. 1.3 je fázová kmitočtová charakteristika reálného filtru typu dolní propust 1.řádu v logaritmickém měřítku. Velikost amplitud jednotlivých kmitočtových složek výsledného signálu získáme vynásobením amplitud vstupních složek příslušnou velikostí modulu přenosu pro daný kmitočet  $f_i$  podle vztahu:

$$U_2(f_i) = U_1(f_i) \cdot K(f_i). \quad (1.6)$$

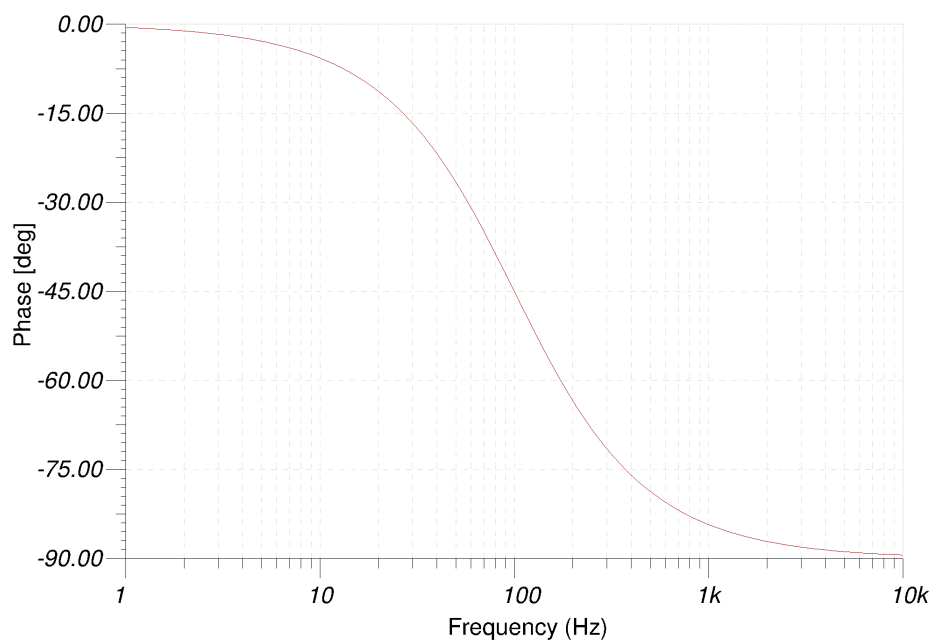
Velikost fází kmitočtových složek výstupního signálu získáme obdobně přičtením příslušného fázového posuvu filtru  $\varphi(f_i)$  k fázím vstupních složek:

$$\varphi_2(f_i) = \varphi_1(f_i) + \varphi(f_i). [8] \quad (1.7)$$





Obr. 1.2: Modulová kmitočtová charakteristika dolní propusti 1.řádu.



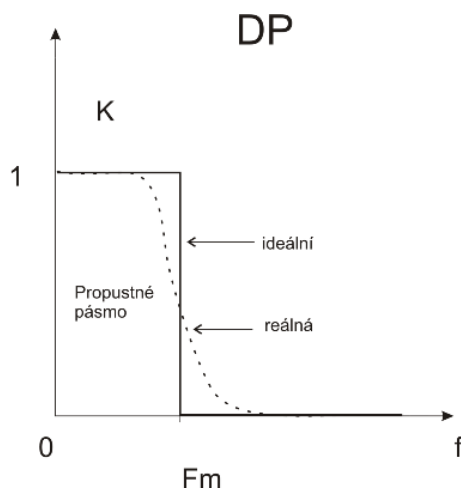
Obr. 1.3: Fázová kmitočtová charakteristika dolní propusti 1.řádu.

### 1.1.3 Základní typy filtrů

Kmitočtové filtry lze rozdělit podle různých hledisek a vlastností. Podle funkce filtru a odpovídajícího tvaru kmitočtových charakteristik je dělíme do tří základních skupin – selektivní filtry, korekční filtry a fázovací obvody. Zde se budeme zabývat pouze selektivními filtry. Selektivní filtry slouží k potlačení přenosu kmitočtových složek signálu v nepropustném pásmu. Základní selektivní filtry jsou:

#### Dolní propust

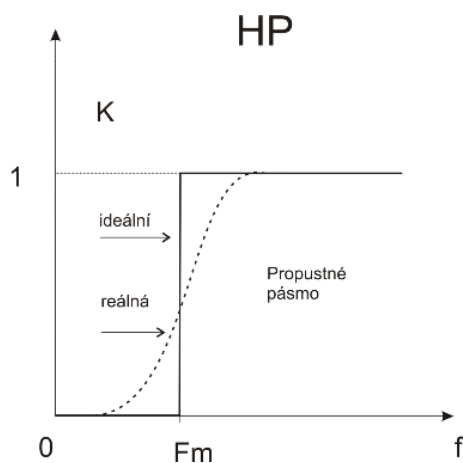
Propouští složky signálu s kmitočty nižšími než je mezní kmitočet  $f_m$ . [8] Na obr. 1.4 je modulová kmitočtová charakteristika dolní propusti v lineární ose.



Obr. 1.4: Modulová kmitočtová charakteristika dolní propusti v lineární ose (upraveno podle [7]).

## Horní propust

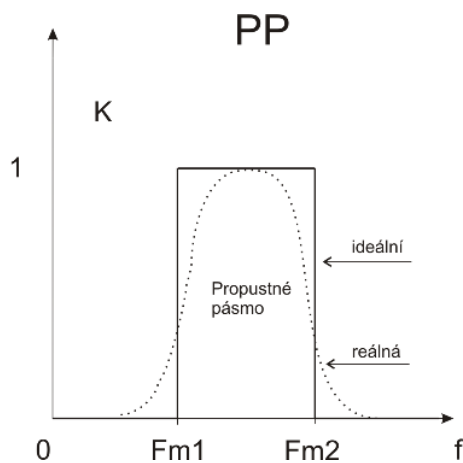
Propouští složky signálu o kmitočtech vyšších než je mezní kmitočet  $f_m$ . [8] Na obr. 1.5 je modulová kmitočtová charakteristika horní propusti v lineární ose.



Obr. 1.5: Modulová kmitočtová charakteristika horní propusti v lineární ose (upraveno podle [7]).

## Pásmová propust

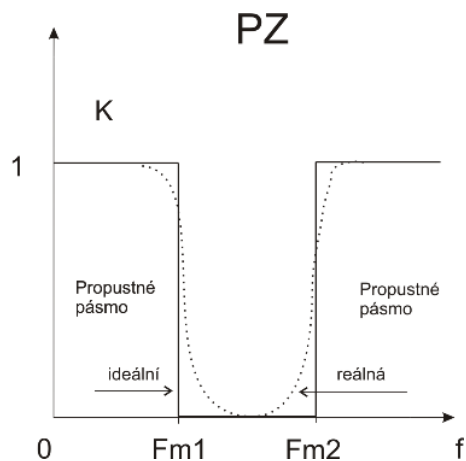
Propouští složky signálu mezi mezním dolním a horním kmitočtem  $f_{m1}$  a  $f_{m2}$ . [8] Na obr. 1.6 je modulová kmitočtová charakteristika pásmové propusti v lineární ose.



Obr. 1.6: Modulová kmitočtová charakteristika pásmové propusti v lineární ose (upraveno podle [7]).

## Pásmová zadrž

Nepropouští složky signálu mezi mezním dolním a horním kmitočtem  $f_{m1}$  a  $f_{m2}$ . [8]  
Na obr. 1.7 je modulová kmitočtová charakteristika pásmové zadrž v lineární ose.



Obr. 1.7: Modulová kmitočtová charakteristika pásmové zadrž v lineární ose (upraveno podle [7]).

## 2 FILTRY ARC 2. ŘÁDU

Aktivní filtry ARC vycházejí z filtrů RLC. Filtry RLC dokáží realizovat jakýkoliv filtr, ovšem při realizaci filtrů pro nízké kmitočty je velký problém s kvalitou a rozměry cívek. Proto se snažíme vhodně nahradit cívku aktivním prvkem. Aktivní prvky mohou být:

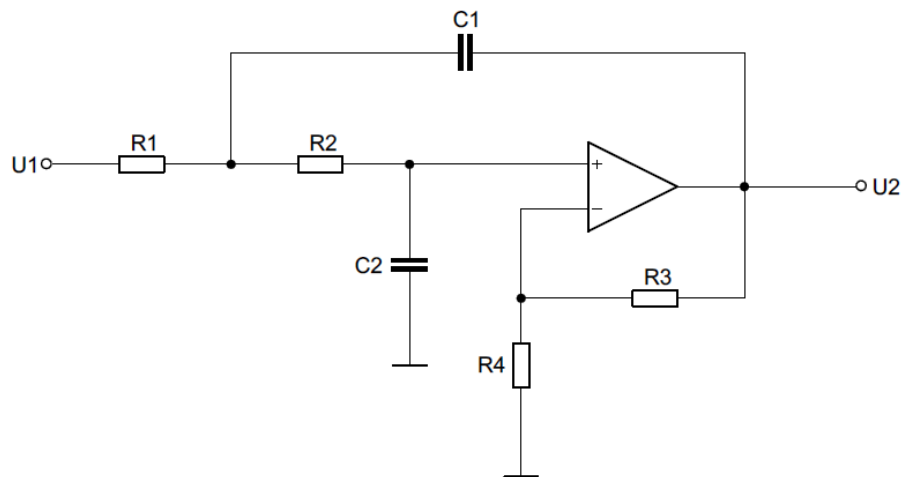
- Operační zesilovače,
- Transimpedanční zesilovače,
- Transkonduktanční zesilovače,
- Proudové konvejory.

Nahradit cívku můžeme v zásadě dvěma základními způsoby. První způsob spočívá v použití obvodu, který přímo nahrazuje cívku jako dvojpól a vykazuje mezi určitými svorkami příslušnou indukčnost. Druhý princip nahrazuje cívku nepřímou, pomocí transformace (jedná se o Brutonovu transformaci) výchozího LRC obvodu na ekvivalentně se chovající strukturu RCD. Struktura RCD indukční prvek neobsahuje, ale na druhou stranu potřebuje syntetický prvek D – dvojný kapacitor (kmitočtově závislý negativní rezistor). Více o nahrazení cívky, dvojném kapacitoru, atd. je uvedeno v literatuře.[8]

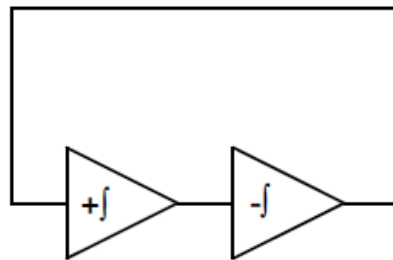
### 2.1 Topologie univerzálních filtrů 2.řádu

Náplní této kapitoly je zapojení bloků se dvěma a více operačními zesilovači. Existují i obvody s jedním operačním zesilovačem např. filtr typu Sallen-Key. Na obr. 2.1 je zapojení filtru typu dolní propust Sallen-Key s jedním operačním zesilovačem. Zapojení se dvěma a více OZ jsou obvody v principu bezztrátové. Jejich principem je simulace bezztrátového rezonančního obvodu. Vycházíme ze zapojení GIC se dvěma OZ (bezeztrátové zapojení impedančního konvertoru).[8] Na obr. 2.2 je nejčastěji používaná varianta zapojení invertujícího a neinvertujícího integrátoru ve smyčce. Protože není možné jednoduše realizovat zapojení invertujícího a neinvertujícího integrátoru ve smyčce vzhledem k nemožnosti realizace bezztrátového neinvertujícího integrátoru s jedním OZ, většina realizací využívá zapojení dvou invertujících integrátorů a invertoru ve smyčce.[8]

Na obr. 2.3 je zapojení dvou invertujících integrátorů a invertoru ve smyčce. Zvýšením počtu operačních zesilovačů lze realizovat univerzální filtr. Např. zapojení filtru typu Sallen-Key s jedním operačním zesilovačem umožňuje pouze realizaci dolní a horní propusti, zatímco filtry s více operačními zesilovači umožňují realizaci všech základních typů filtrů.



Obr. 2.1: Filtr typu dolní propust Sallen-Key s jedním OZ (upraveno podle [8]).



Obr. 2.2: Neinvertující a invertující integrátor ve smyčce (upraveno podle [8]).

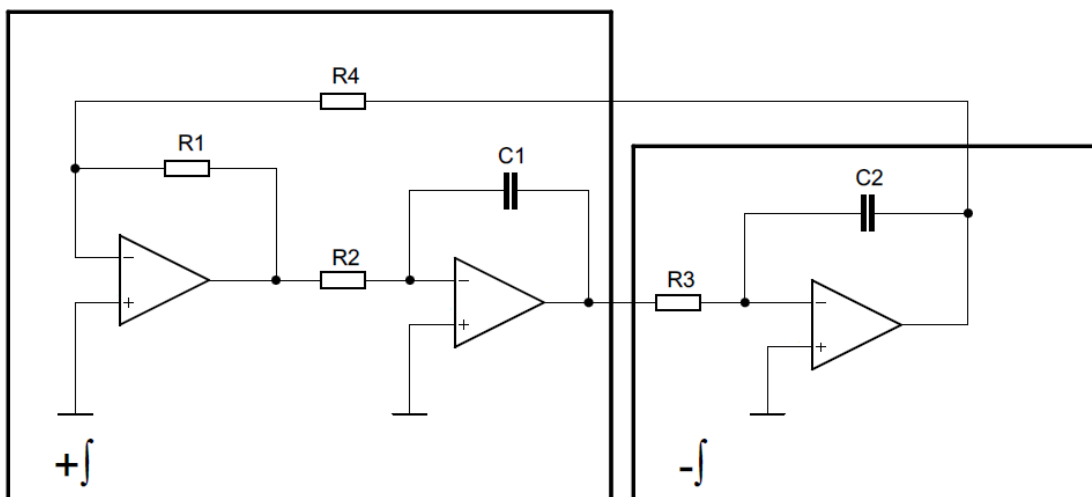
Další výhodou zapojení s více operačními zesilovači je možnost snadného nezávislého nastavování jednotlivých parametrů. Jsou to parametry:

- Rezonanční kmitočet,
- Činitel jakosti,
- Základní přenos.

Tyto parametry je možné ladit změnou rezistorů a kapacitorů. Toho můžeme využít při elektronickém ladění. U těchto typů zapojení je velice důležitá praktická modifikace zapojení obvodu pro nastavení činitele jakosti. Můžeme použít tři základní varianty:

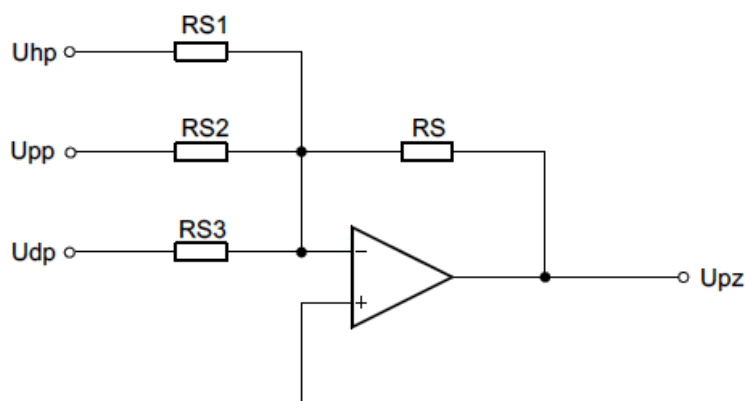
- Univerzální filtr podle Thomase-Towa,
- Univerzální filtr podle Kervina-Huelsmana-Newcomba,
- Univerzální filtr podle Akerberga-Mossberga.

Uvedené topologie umožňují pouze realizaci dolní propusti, horní propusti a pásmové propusti. Přidáním dalšího operačního zesilovače můžeme dosáhnout i rea-



Obr. 2.3: Dva invertující integrátory s invertorem ve smyčce (upraveno podle [8]).

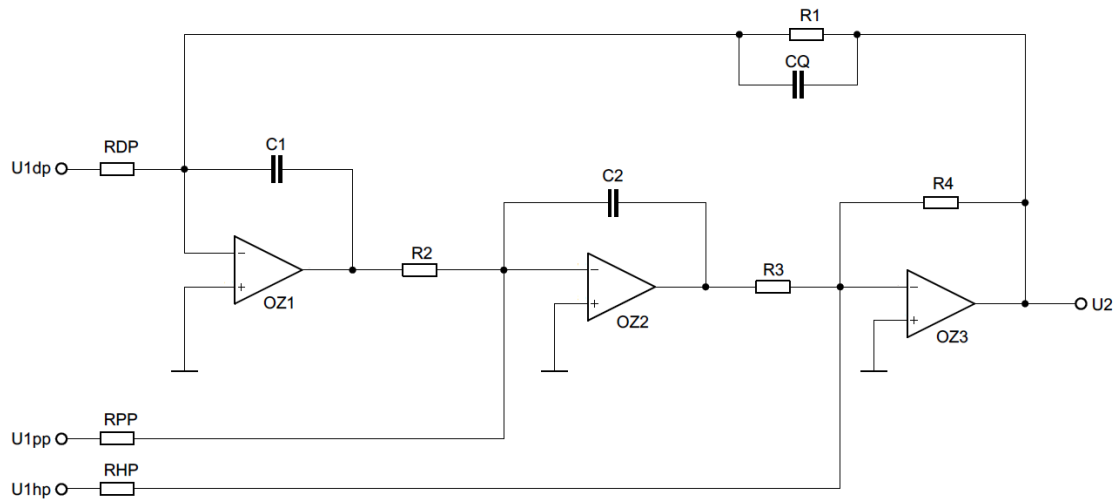
lizace pásmové zadržky. Na obr. 2.4 je čtvrtý operační zesilovač pro realizaci pásmové zadržky.



Obr. 2.4: Operační zesilovač pro realizaci pásmové zadržky (upraveno podle [8]).

### 2.1.1 Univerzální filtr podle Thomase-Towa

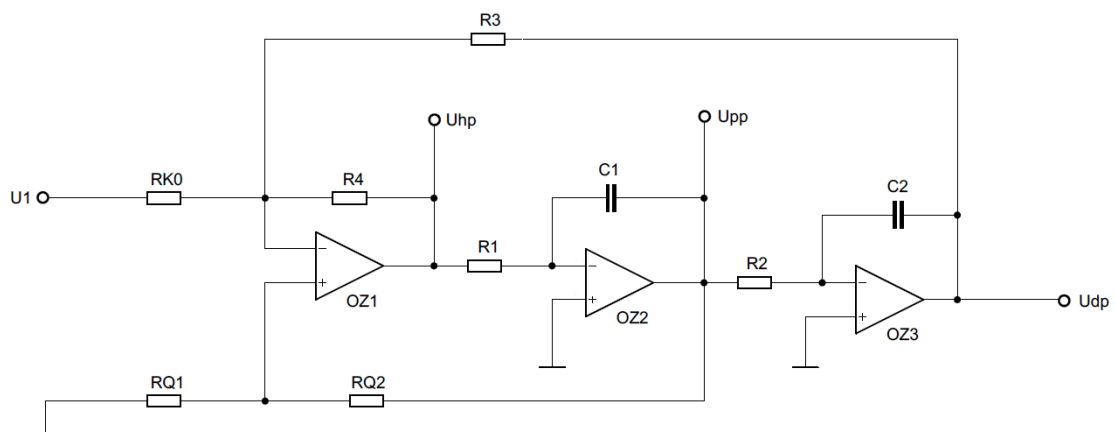
Toto zapojení využívá připojení tlumicího rezistoru paralelně k jednomu z kapacitorů  $C_1$  a  $C_2$  či tlumicího kapacitoru  $C_q$  paralelně k jednomu z rezistorů  $R_1$  až  $R_3$ . Též je možné použít méně obvyklé seriové spojení  $R_q$  a  $C$ . Uvedená varianta ale neumožňuje jednoduché ladění dvěma typy prvků (pro tlumicí kapacitor  $C_q$  nelze ladit změnou  $C_1$ ,  $C_2$ , pro tlumicí rezistor  $R_q$  zase nelze ladit změnou  $R_1$ ,  $R_2$ ). [8] Na obr. 2.5 je zapojení univerzálního filtru podle Thomase-Towa.



Obr. 2.5: Zapojení podle Thomase-Towa (upraveno podle [8]).

### 2.1.2 Univerzální filtr podle Kervina-Huelsmana-Newcomba

Zapojení podle autorů Kervina-Huelsmana-Newcomba využívá odporovou zpětnou vazbu do diferenciálně zapojeného invertoru. Tento obvod umožňuje ladění souběžnou změnou dvou rezistorů i dvou kapacitorů. Širokopásmové ladění je výhodné realizovat plynule souběžnou změnou  $R_1 - R_2$ , např v rámci dekády, a skokově přepnout jednotlivé dekády pomocí  $C_1 - C_2$ . Určitou nevýhodou je zde nelineární závislost hodnoty  $Q$  na hodnotách nastavovaných rezistorů a vzájemná závislost hodnoty  $Q$  a přenosu  $K_0$ . [8] Na obr. 2.6 je zapojení univerzálního filtru podle Kervina-Huelsmana-Newcomba.

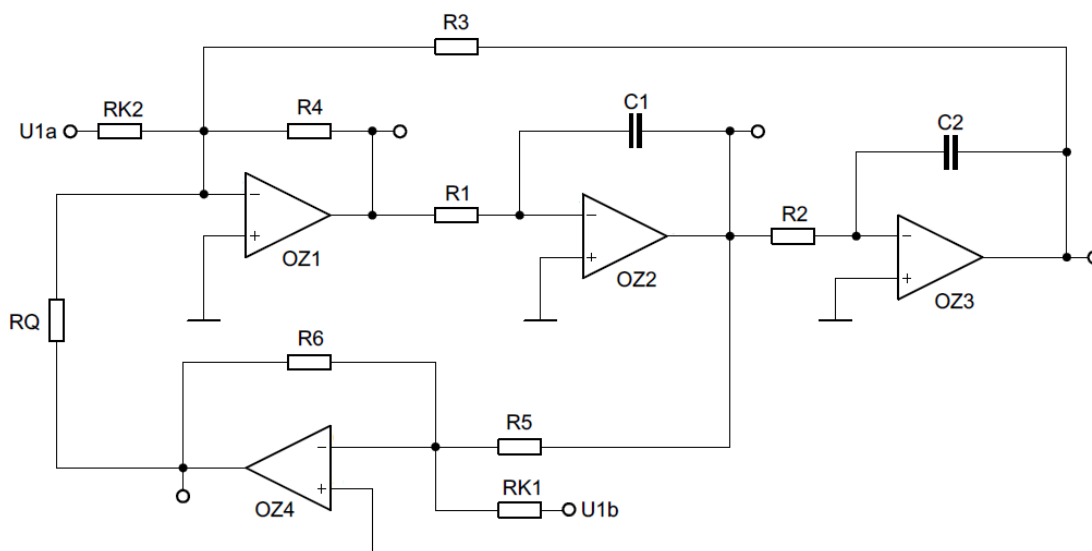


Obr. 2.6: Zapojení podle Kerwina-Huelsmana-Newcomba (upraveno podle [8]).



### 2.1.3 Univerzální filtr podle Akerberga-Mossberga

Zapojení Akerberga-Mossberga je velmi podobné jako u předchozího zapojení. Rozdílem oproti předchozímu obvodu je přidání čtvrtého OZ jako invertoru pro použití tlumicího prvku zpětné vazby. Výhoda této úpravy spočívá ve snadnějším řízení hodnoty  $Q$  a  $K_0$ . Další výhodou je vyšší použitelný kmitočtový rozsah. Na druhou stranu u tohoto zapojení hrozí nebezpečí parazitních oscilací na kmitočtu  $F_t/2$ . Toto zapojení má dvě varianty umístění vstupní svorky. Varianta vstupu  $U_{1a}$  se chová jako klasický univerzální filtr s DP, PP, HP. Varianta vstupu  $U_{1b}$  má na výstupu čtvrtého operačního zesilovače filtr typu PZ. Tato realizace PZ má jednu zásadní výhodu v tom, že všechny ostatní výstupy mají maximální přenosy při rezonanci jednotkové. Použijeme-li tudíž filtr jako úzkopásmovou zadrž s vyšší hodnotou  $Q$ , nedochází ke snižování dynamického rozsahu vzhledem k omezení maxima signálu na ostatních výstupech, což se u všech předchozích zapojení projevuje.[8] Na obr. 2.7 je zapojení univerzálního filtru podle Akerberga-Mossberga.



Obr. 2.7: Zapojení podle Akerberga-Mossberga (upraveno podle [8]).

## 3 ELEKTRONICKÉ ŘÍZENÍ

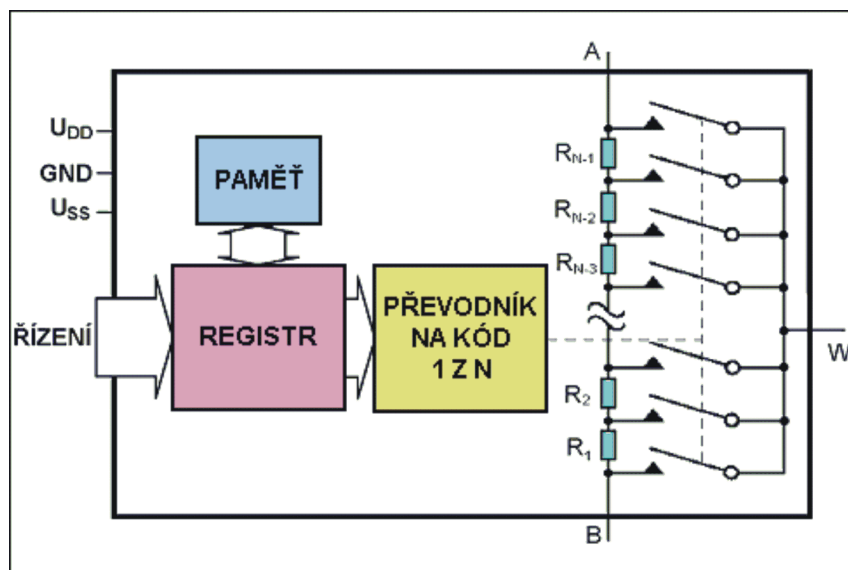
Problematika elektronického přeladování mezních kmitočtů filtrů je velmi obsáhlá. Filtry je možno přeladovat digitálními potenciometry, digitálně-analogovými převodníky, proudově řízenými zesilovači, analogovými násobičkami, vykompenzovanými fotorezistory, atd. Zde uvedu pouze první dvě nejrozšířenější varianty ladění, což jsou digitální potenciometry a digitálně-analogové převodníky.

### 3.1 Digitální potenciometry

Digitální potenciometry jsou v současné době velmi rozšířené prvky pro elektronické přeladování různých typů obvodů jako jsou např. laditelné kmitočtové filtry, laditelné generátory, laditelné zesilovače, atd. Na trhu je mnoho firem, které digitální potenciometry nabízejí. Jsou to firmy: Analog Devices[3], Texas Instruments[18], Maxim Integrated[12], Microchip[14].

#### 3.1.1 Princip funkce

Jestliže  $N$  je celkový počet poloh jezdce, pak mezi vývody A a B je sériově zapojeno  $N-1$  rezistorů, které tvoří odporovou dráhu. Jezdec potenciometru je označen vývodem W. Jezdec je pomocí elektronických spínačů postupně přepojován v rezistorové síti podle toho jaké do potenciometru vstupuje řídicí bitové slovo. Digitální potenciometr je možné ovládat pomocí mikrokontroléru, k tomu slouží sběrnice SPI, I2C, a nebo již méně častá paralelní sběrnice. Počet poloh jezdce bývá obvykle 32, 64, 128, 256. Potenciometry se vyrábějí s odporem dráhy 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ , 50 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$ , 500 k $\Omega$ , 1 M $\Omega$ . Přesnost odporu dráhy se pohybuje mezi 20–30%. Výrobci zaručují vysokou linearitu převodu čísla na odpor, proto lze relativně přesně spočítat nastavenou hodnotu odporu. Při řízení filtrů je důležitá souběžná změna dvou přesných odporů, toho lze dosáhnout použitím vícenásobného digitálního potenciometru. Vyrábí se dvojité, trojitě, i vícenásobné potenciometry. Mezi hlavní výhody digitálních potenciometrů patří digitální nastavování a absence mechanických částí, která zvyšuje spolehlivost a zamezuje vzniku špatného kontaktu mezi dráhou a jezdce. Výhodou jsou i velmi malé rozměry integrovaných pouzder. Nevýhodou digitálních potenciometrů je nezanedbatelný odpor jezdce, způsobený nenulovým odporem elektronického spínače. Jeho hodnota se pohybuje v desítkách až stovkách ohmů.[23] Velmi důležitá je i kmitočtová závislost na nastavování odporu. Na obr. 3.1 je schéma digitálního potenciometru.



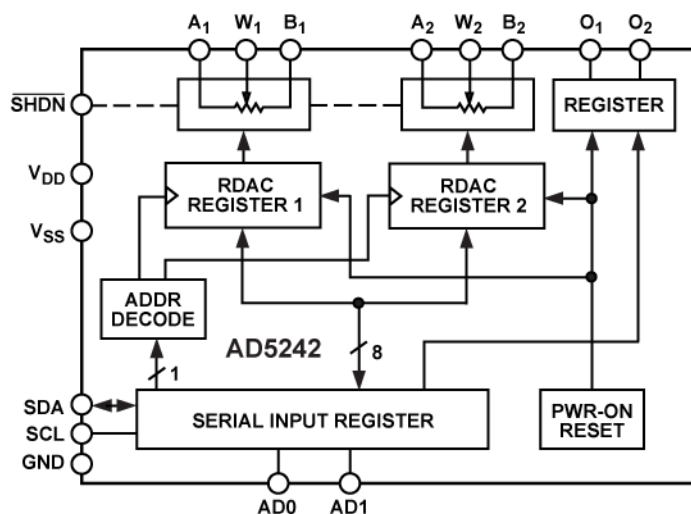
Obr. 3.1: Schéma digitálního potenciometru (převzato z [23]).

### 3.1.2 Integrovaný obvod AD5242

AD5242 je dvoukanálový digitální potenciometr od firmy Analog Devices[3]. Umožňuje přepínání jezdce ve 256 polohách s odporovým rozsahem 10 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$ , 1 M $\Omega$ . Potenciometr je kompatibilní se sběrnici I2C. Obvod se vyrábí v pouzdech: SOIC14, SOIC16, TSSOP14 a TSSOP16. Teplotní rozsah pro použití obvodu je: -40 °C až +105 °C. Obvod je možno využít v těchto aplikacích: multimedia, video, audio, komunikace, atd. Na obr. 3.2 je blokové schéma integrovaného obvodu AD5242. Přehled parametrů integrovaného obvodu AD5242 ukazuje tab. 3.1

Tab. 3.1: Shrnutí parametrů integrovaného obvodu AD5242.

Parametr	Hodnota
Počet poloh přeladění	256
Rozsahy odporové dráhy	10 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$ , 1 M $\Omega$
Počet kanálů	2
Tolerance mezi kanály	1%
Podporované sběrnice	I2C
Napájení obvodu	2,7 až 5,5 V nebo $\pm 2,7$ V
Teplotní rozsah použití	-40 °C až +105 °C
Dostupná pouzdra	SOIC, TSSOP



Obr. 3.2: Blokové schéma integrovaného obvodu AD5242 (převzato z [1]).

## 3.2 D/A převodníky

Digitálně-analogové převodníky převádějí vstupní diskrétní číslicové kódy na odpovídající výstupní diskrétní analogové hodnoty. Analogový signál je v závislosti na zakódovaném digitálním údaji odvozen od referenčního napětí. Přesnost referenčního napětí je proto limitujícím faktorem rozlišitelnosti D/A převodníku.[7]

D/A převodníky se dělí na dvě základní skupiny, a to napěťové a proudové. Pro digitální ladění obvodů D/A převodníky je možné použít pouze proudových převodníků, jelikož napěťové převodníky (označované buffered voltage) v pouzdře integrovaného obvodu obsahují oddělovací zesilovač, který je pro využití převodníku jako číslicového potenciometru nežádoucí.

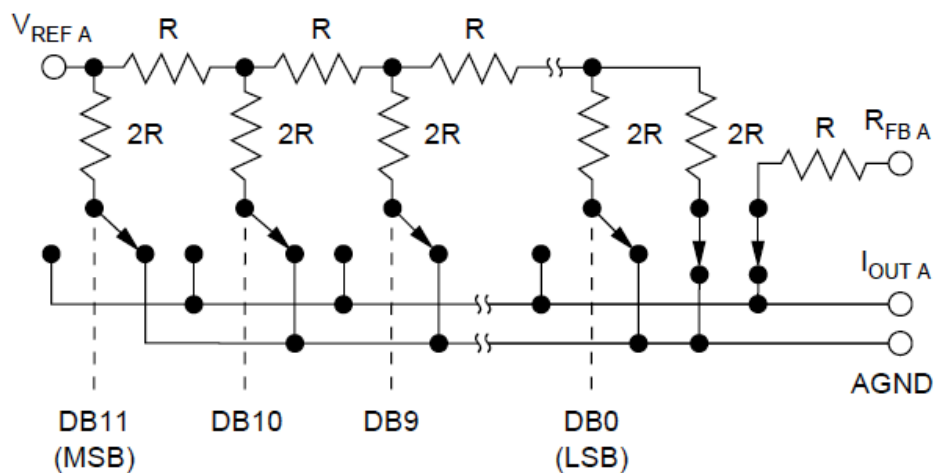
### 3.2.1 Princip funkce

Základním principem jednobitového převodníku je přepínač, který přepíná v závislosti na příchozím digitálním kódu do polohy 1 nebo 0. Proudový princip převodu je založen na vyhodnocení proudů protékajících paralelně řazenými rezistory.[7]

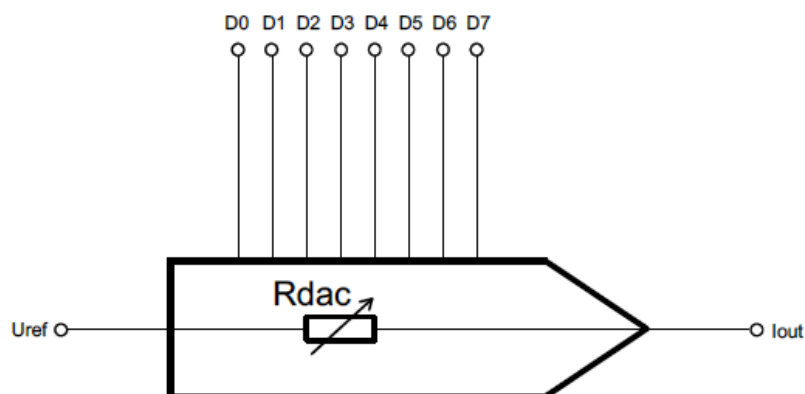
Pro použití D/A převodníku jako laditelného prvku je možno mezi piny  $U_{ref}$  a  $I_{out}$  využívat převodník jako číslicový potenciometr. Ekvivalentní odpor 8bitového D/A převodníku v tomto zapojení je:

$$R_{DAC} = \frac{256 \cdot R}{D}, \quad (3.1)$$

kde  $R$  je vnitřní příčkový odpor rezistorové sítě R-2R a  $D$  je bitové slovo řídicí D/A převodník. Na obr. 3.3 je schéma proudového D/A převodníku s rezistorovou sítí R-2R. Na obr. 3.4 je D/A převodník jako proměnný rezistor.



Obr. 3.3: Schéma proudového D/A převodníku R-2R (převzato z [19]).

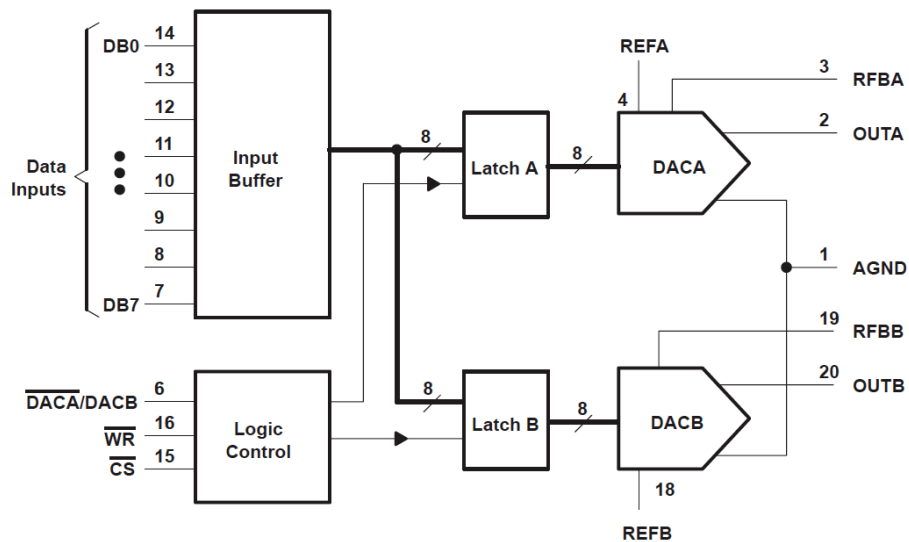


Obr. 3.4: D/A převodník jako proměnný rezistor (upraveno podle [7]).

### 3.2.2 Integrovaný obvod TLC7528

TLC7528 je 8bitový dvoukanálový proudový digitálně-analogový CMOS převodník od firmy Texas Instruments.[18] Počet hodnot převodníku je 256. Převodník využívá technologie R-2R přepínatelné odporové sítě. Převodník je možné ovládat pomocí paralelní sběrnice. Tento obvod vyniká nízkou cenou a snadnou připojitelností k mikrokontroléru. Obvod se vyrábí v pouzdrech: SOIC, PDIP, TSSOP, PLCC. Teplotní

rozsah pro použití obvodu je:  $-40^{\circ}\text{C}$  až  $+85^{\circ}\text{C}$ . Na obr. 3.5 je blokové schéma integrovaného obvodu TLC7528. Přehled parametrů integrovaného obvodu TLC7528 ukazuje tab. 3.2



Obr. 3.5: Blokové schéma integrovaného obvodu TLC7528 (převzato z [19]).

Tab. 3.2: Shrnutí parametrů integrovaného obvodu TLC7528.

Parametr	Hodnota
Druh převodníku	Proudový
Technologie výroby	CMOS
Rozlišení převodníku	8-bit
Počet úrovní	256
Zaměnitelný s obvody	AD7528, PM-7528
Počet kanálů	2
Podporované sběrnice	Paralelní
Napájení	5 až 15 V
Teplotní rozsah použití	$0^{\circ}\text{C}$ až $+70^{\circ}\text{C}$
Dostupná pouzdra	SOIC, PDIP, TSSOP, PLCC

## 4 NÁVRH UNIVERZÁLNÍHO FILTRU

S ohledem na co nejjednodušší realizaci univerzálního filtru spočívá návrh ve výběru vhodného integrovaného obvodu filtru. Pomocí návrhových vztahů spočítáme přesné hodnoty součástek pro požadované vlastnosti filtru. Tyto výpočty podložíme simulací konkrétního zapojení. Požadavkem je, aby byl filtr laditelný v rozmezí mezního kmitočtu 100 Hz až 15 kHz. Filtr jako celek bude ovládán mikrokontrolérem. Použité periferie jako tlačítkové spínače, rotační enkodér a LCD displej budou sloužit k nastavení a zobrazení mezního kmitočtu filtru.

### 4.1 Dostupná zařízení na trhu

Na webu se dají najít hotová řešení univerzálních laditelných filtrů např. od výrobců Krohn-Hite[9], Brüel & Kjær[5], Wavetek[24]. Konkrétně firma Krohn-Hite nabízí dvoukanálový univerzální aktivní filtr laditelný v rozmezí mezního kmitočtu 3 Hz až 2 MHz. Na obr. 4.1 je laditelný filtr Krohn-Hite 3940L.



Obr. 4.1: Krohn-Hite 3940L (převzato z [9]).

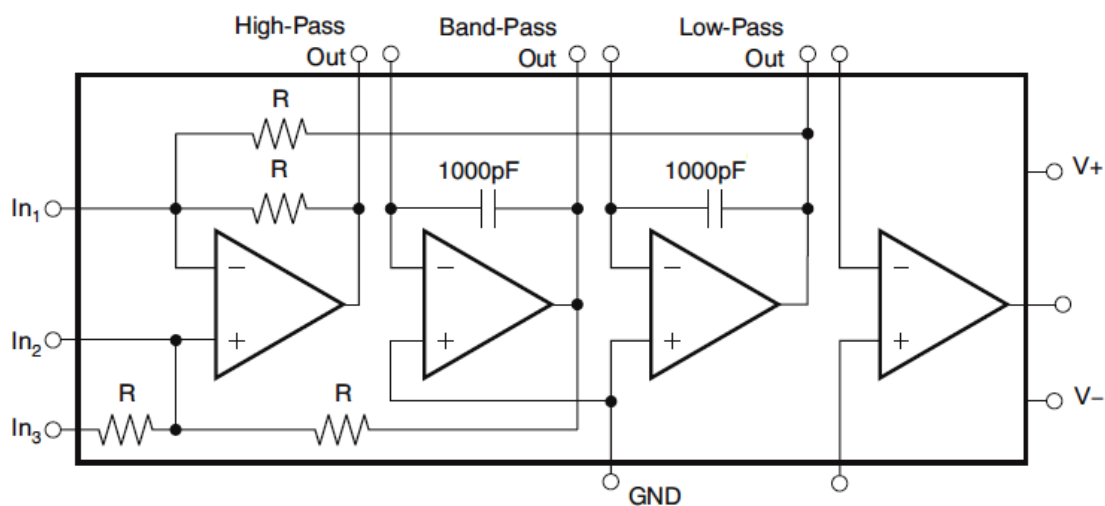
### 4.2 Přehled integrovaných filtrů

Na trhu existuje velké množství integrovaných filtrů. Většina z nich má bohužel specifické vlastnosti a tím je použití těchto filtrů v univerzálních aplikacích velmi omezeno. Toto omezení je dáno vnitřní strukturou filtru, která je daná a není možno ji upravovat podle vlastních představ. Nastavování parametrů je možno pouze připojováním externích komponent, většinou rezistorů. Valná většina integrovaných

filtrů umožňuje pouze některé realizace filtrů např. pouze dolní propust a pásmovou propust. Existuje málo obvodů, které jsou opravdu univerzální a mohou realizovat všechny typy filtrů. Pokud chceme opravdu univerzální filtr, který je schopen realizovat všechny typy filtrů a chceme využívat filtr ve velkém kmitočtovém rozsahu, tak je jedinou možností postavit přesný požadovaný filtr z diskretních součástek.

### 4.2.1 Integrovaný obvod UAF42

UAF42 je univerzální aktivní filtr 2. řádu od společnosti Texas Instruments[18]. Umožňuje realizaci všech základních typů filtrů jako je dolní propust, horní propust, pásmová propust a pásmová zadrž. V jeho pouzdře jsou integrovány 4 operační zesilovače odpovídající řadě TL08x s tranzitním kmitočtem  $F_t = 4$  MHz. Dále jsou v pouzdru integrovány dva velmi přesné kapacitory s kapacitou  $C = 1$  nF a tolerancí 0,5%. Obvod je možno zapojit jako univerzální filtr podle Kerwina-Huelsmana-Newcomba se dvěma integrátory ve smyčce. Filtr je možné použít pro oblast mezního kmitočtu 0 až 100 kHz a maximálního činitele jakosti 400. Parametry filtru: mezní kmitočet, činitel jakost  $Q$ , přenos filtru lze měnit pomocí externích rezistorů. Integrovaný obvod filtru je napájen symetrickým napětím  $\pm 15$  V. Teplotní rozsah použití obvodu je:  $-25^\circ\text{C}$  až  $+85^\circ\text{C}$ . Obvod je dostupný v pouzdrech PDIP-14 a SOIC-16. Na obr. 4.2 je schéma integrovaného obvodu UAF42. Přehled parametrů integrovaného obvodu UAF42 ukazuje tab. 4.1



Obr. 4.2: Schéma integrovaného obvodu UAF42 (převzato z [20]).

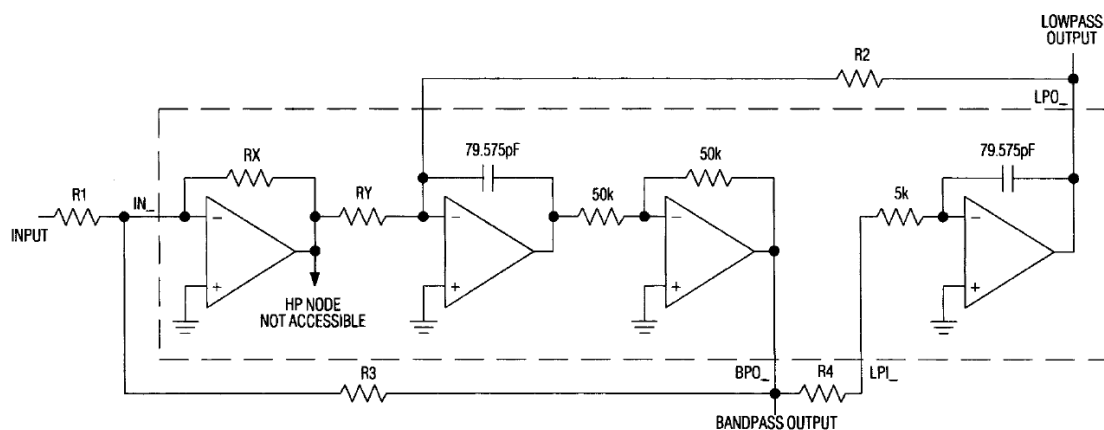


Tab. 4.1: Shrnutí parametrů integrovaného obvodu UAF42.

Parametr	Hodnota
Realizace filtru	Univerzální
Řád filtru	2
Maximální mezní kmitočet	100 kHz
Maximální činitel jakosti	400
Napájení	$\pm 15$ V
Šum	25 nV
Teplotní rozsah použití	$-25$ °C až $+85$ °C
Dostupná pouzdra	PDIP, SOIC

#### 4.2.2 Integrovaný obvod MAX-274/275

Obvody řady MAX-274/275 od firmy Maxim Integrated[12] jsou spojitě pracující aktivní filtry 2.řádu. Mohou být kaskádně spojovány do filtračních systémů vyšších řádů. Tyto konkrétní obvody umožňují použití filtru pouze jakou pásmové propusti nebo dolní propusti. Výhodou oproti řadám založených na principu spínaných kapacitorů je nízký šum obvodu. Doporučené použití filtrů v praxi je využití jako anti-aliasingové filtry. MAX-274/275 se dá použít v modemech, audio filtrech, atd. Na obr. 4.3 je schéma integrovaného obvodu MAX274. Přehled parametrů integrovaného obvodu MAX274 ukazuje tab. 4.2



Obr. 4.3: Schéma integrovaného obvodu MAX274 (převzato z [13]).

Tab. 4.2: Shrnutí parametrů integrovaného obvodu MAX274.

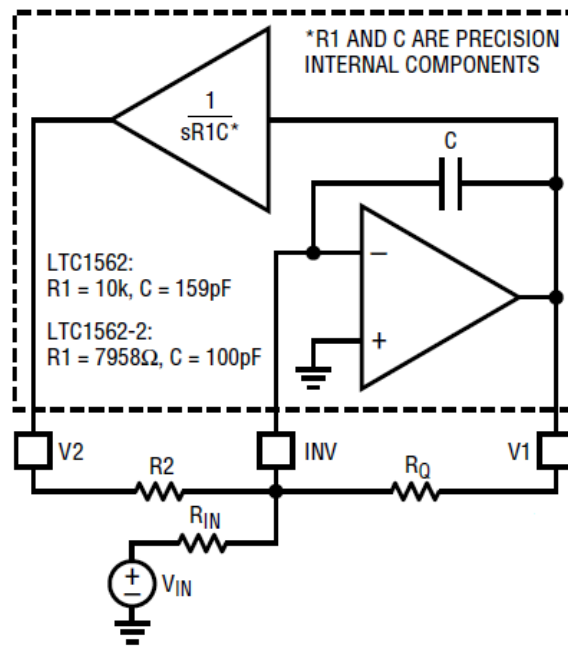
Parametr	Hodnota
Realizace filtru	DP, PP
Řád filtru	2
Maximální mezní kmitočet	150 kHz
Maximální činitel jakosti	-
Napájení	5 V nebo $\pm 5$ V
Šum	-86 dB
Teplotní rozsah použití	0 °C až +70 °C
Dostupná pouzdra	PDIP

### 4.2.3 Integrovaný obvod LTC1562

LTC1562 je nízkošumový aktivní filtr od společnosti Linear Technology[10]. Je to filtr 2. řádu s rozsahem použití od mezního kmitočtu 10 kHz do 150 kHz. Tento obvod lze kaskádně spojovat, a tím dosáhnout vyšších sudých řádů filtru. Mezní kmitočet filtru a činitel jakosti lze měnit pomocí tří externích rezistorů. Obvod umožňuje pouze návrh dolní propusti, horní propusti a pásmové propusti. Obvod je napájen nesymetrickým napájením 5 V. Na obr. 4.4 je schéma integrovaného obvodu LTC1562. Přehled parametrů integrovaného obvodu LTC1562 ukazuje tab. 4.3.

Tab. 4.3: Shrnutí parametrů integrovaného obvodu LTC1562.

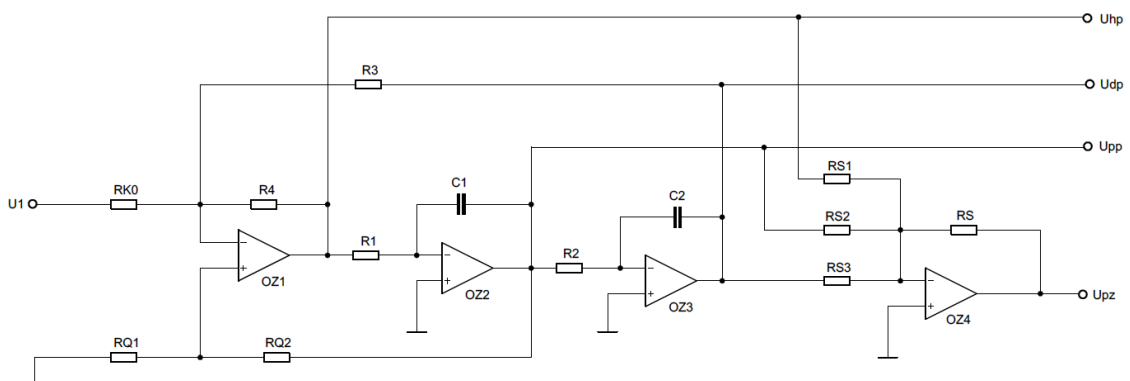
Parametr	Hodnota
Realizace filtru	DP, HP, PP
Řád filtru	2
Maximální mezní kmitočet	150 kHz
Maximální činitel jakosti	-
Napájení	5 až 10 V
Šum	-96 dB
Teplotní rozsah použití	-45 °C až +85 °C
Dostupná pouzdra	SSOP, PDIP



Obr. 4.4: Schéma integrovaného obvodu LTC1562 (převzato z [11]).

### 4.3 Volba zapojení obvodu

S ohledem na splnění zadání bakalářské práce byl vybrán integrovaný obvod UAF42 od firmy Texas Instruments[18], který umožňuje realizaci univerzálního filtru splňujícího všechny základní realizace typů filtrů jako je dolní propust, horní propust, pásmová propust a pásmová zadrž. Tento obvod je možné provozovat až do mezního kmitočtu 100 kHz. Výsledná topologie obvodu je zapojení dvou integrátorů ve smyčce podle Kerwina-Huelsmana-Newcomba. Na obr. 4.5 je uvedena topologie KHN pro realizaci všech 4 typů filtrů.



Obr. 4.5: Topologie KHN pro realizaci všech 4 typů filtrů (upraveno podle [8]).

## Návrhové vztahy pro topologii KHN

Přenosová funkce filtru je:

$$K(p) = \frac{N(p)}{p^2 + p \cdot \frac{R_{Q_1}(R_3R_4 + R_3R_{K_0} + R_4R_{K_0})}{R_1R_3R_{K_0}(R_{Q_1} + R_{Q_2})C_1} + \frac{R_4}{R_1R_2C_1C_2R_3}} = \frac{N(p)}{p^2 + p\Omega_0/Q + \Omega_0^2}. \quad (4.1)$$

Z tohoto vztahu plyne vztah pro výpočet rezonančního kmitočtu filtru:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_4}{R_1R_2C_1C_2R_3}}. \quad (4.2)$$

A také vztah pro výpočet činitele jakosti  $Q$ :

$$Q = \left(1 + \frac{R_{Q_1}}{R_{Q_2}}\right) \frac{R_{K_0} \sqrt{R_3R_4}}{(R_3R_4 + R_3R_{K_0} + R_4R_{K_0})} \sqrt{\frac{C_1R_1}{C_2R_2}}. \quad (4.3)$$

Tyto vztahy platí za předpokladu:  $C_1=C_2$ ,  $R_1=R_2$ ,  $R_3=R_4$ . Pro volbu operačních zesilovačů je důležitá rovnice udávající nejmenší možný použitelný tranzitní kmitočet OZ:

$$F_T \geq 100 \cdot F_0 \cdot Q. \quad (4.4)$$

Volba  $C_1$  a  $C_2$ :

$$C_1 = C_2 = C = 2 \cdot 10^{-7} / \sqrt{F_0}. \quad (4.5)$$

Skutečnou hodnotu  $C_2$  zvolíme z dostupných hodnot, např. řady E6. Výpočet  $R_1$  a  $R_2$ :

$$R_1 = R_2 = R = 1 / (2\pi F_0 C). \quad (4.6)$$

Volba hodnot  $R_3$ ,  $R_4$ : volíme  $R_3=R_4$  v rozmezí 300  $\Omega$  až 100 k $\Omega$ , s výhodou z řady E12 tak, aby jejich hodnota byla blízka hodnotě  $R$ . Výpočet  $R_{K_0}$ :

$$R_{K_0} = R_4 K_0, \quad (4.7)$$

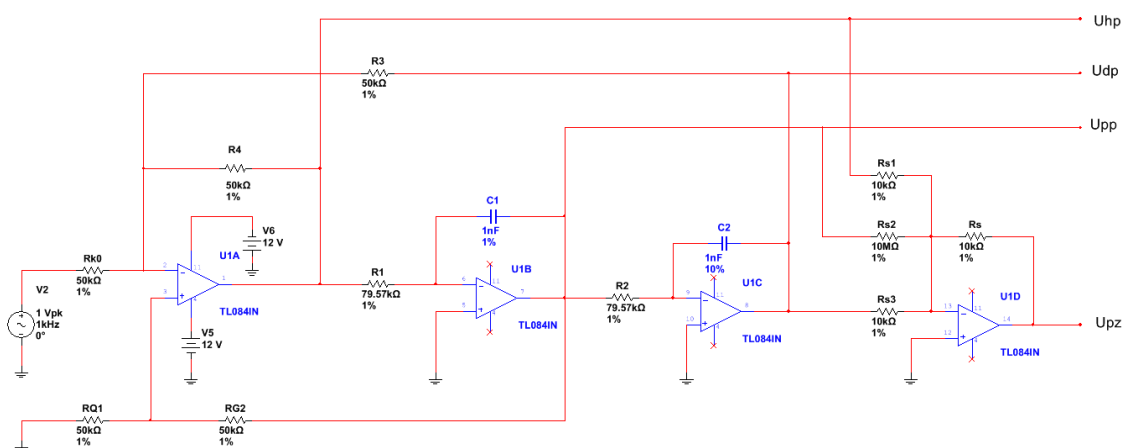
kde  $K_0$  je jednotkový přenos filtru. Volba a výpočet  $R_s$ ,  $R_{s_1}$ ,  $R_{s_2}$  a  $R_{s_3}$ :

$$R_{s_1} = R_{s_3} = R_s, R_{s_2} = \infty, \quad (4.8)$$

kde  $R_s$  volíme 10 k $\Omega$ . Návrhové vztahy zapojení KHN jsou převzaty z literatury[8].

## 4.4 Simulace konkrétního zapojení

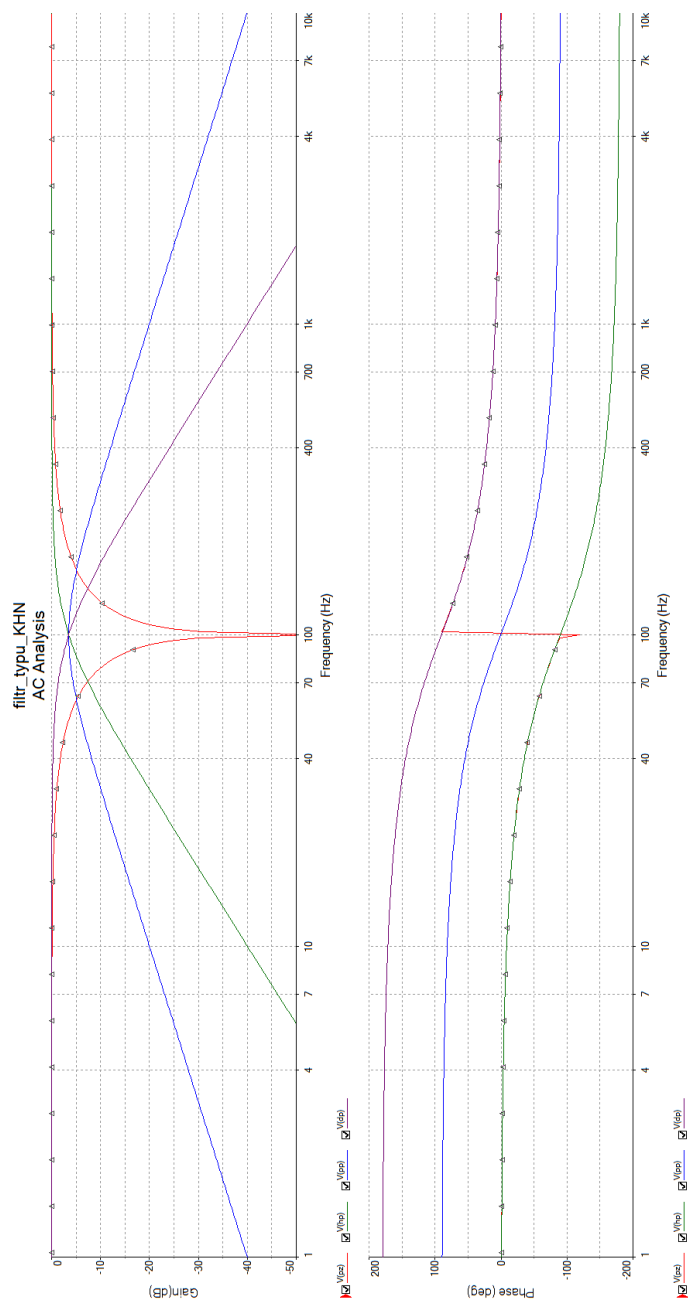
Simulace vlastností obvodu univerzálního filtru zapojeného podle Kervina-Huelsmana-Newcomba probíhala v simulačním programu Multisim. Výhodou tohoto programu je velká databáze modelů elektronických součástek a dostupnost velkého množství analýz obvodů. Konkrétně byla zvolena analýza AC. Pomocí této analýzy si můžeme zobrazit modulovou kmitočtovou charakteristiku a fázovou kmitočtovou charakteristiku simulovaného obvodu. Na obr. 4.6 je zapojení univerzálního filtru v simulátoru Multisim.



Obr. 4.6: Zapojení univerzálního filtru v simulátoru Multisim.

V simulacích nejsou patrné jakékoliv úrovně šumů a rušivých signálů, které jsou v reálném obvodu očekávatelné. S tímto hlediskem je potřeba v praxi počítat. Z výsledků simulací je patrné, že přenos filtru je pro mezní kmitočty v rozsahu od 100 Hz do 15 kHz stabilní. Z modulové kmitočtové charakteristiky je možné odečíst, že modul dolní a horní propusti klesá rychlostí -40 dB na dekádu. Filtr typu pásmová zadrž vzniká sumací filtrů typu dolní a horní propust, proto přenos filtru typu pásmová zadrž klesá rychlostí -80 dB. Výhodou typu filtru pásmová zadrž v tomto zapojení je tedy největší strmost ze všech typů filtrů. U fázové kmitočtové charakteristiky se projevuje skoková změna fáze u typu horní propust. Tato skoková změna je pravděpodobně způsobena vlastnostmi zapojení KHN, jelikož se projevuje i v simulaci při použití ideálních operačních zesilovačů. Činitel jakosti v tomto obvodovém zapojení dosahuje nízké hodnoty, konkrétně  $Q = 0,65$ . S rostoucím činitelem jakosti roste i strmost filtru, ovšem tento jev se negativně projevuje zvlněním v propustném pásmu filtru. Proto je potřeba v každé konkrétní aplikaci zvolit vždy kompromis mezi strmostí a zvlněním v propustném pásmu filtru. Pro hodnotu činitele jakosti  $Q = 0,65$  zvlnění v propustném pásmu filtru není viditelné. Simulace pro ostatní mezní

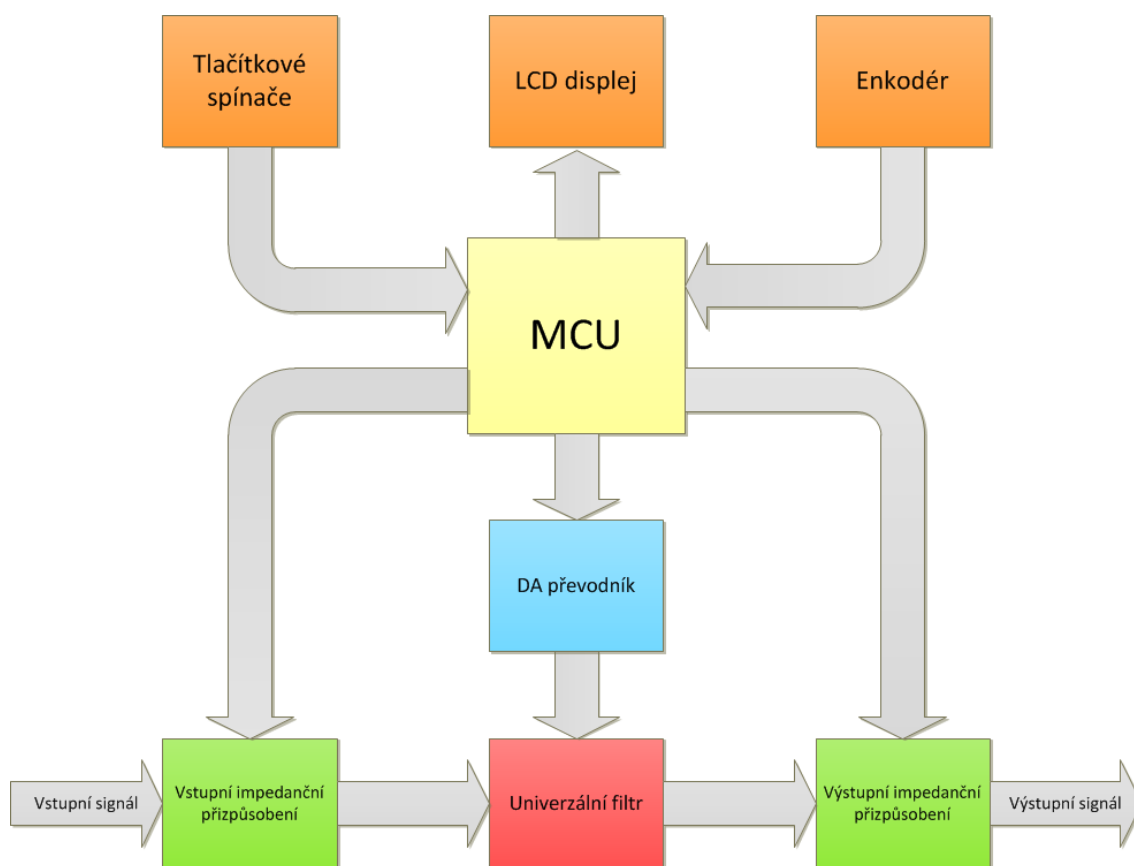
kmitočty jsou uvedeny v přílohách. Na obr. 4.7 je modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 100 Hz.



Obr. 4.7: Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 100 Hz.

## 4.5 Řízení filtru a periferie

Řízení univerzálního filtru spočívá v použití mikrokontroléru jako centrální řídicí jednotky. K mikrokontroléru je možno připojit periferie jako tlačítkové spínače, enkodér a LCD displej. Mezní kmitočet univerzálního filtru bude přeladován pomocí rotačního enkodéru. LCD displej bude sloužit k zobrazení informace o hodnotě mezního kmitočtu filtru, typu filtru a hodnotě impedančního přizpůsobení. Pomocí relé bude možné přepínat vstupní i výstupní impedanci v hodnotách  $50\ \Omega$  a impedanci vysokou v řádech  $M\Omega$ . Na obr. 4.8 je blokové schéma univerzálního filtru řízeného mikrokontrolérem.



Obr. 4.8: Blokové schéma univerzálního filtru.

### Tlačítkové spínače

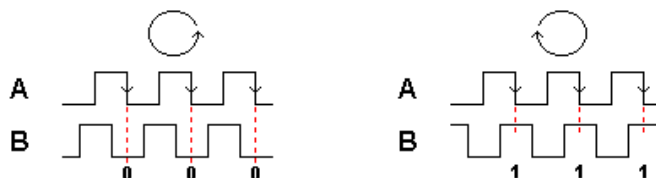
Tlačítkové spínače jsou periferie, které lze použít pro změnu stavu různých procesů v obvodu. Pomocí tlačítkových spínačů je v obvodovém zapojení univerzálního filtru možné volit typ filtru a hodnotu impedančního přizpůsobení. Zapojení tlačítkových spínačů je doplněno o RC článek, který zabraňuje vzniku zákmitů při stlačení spínače.

## LCD displej

Alfanumerický LCD displej slouží k zobrazení podrobných informací o nastavených parametrech filtru. V našem konkrétním případě to bude mezní kmitočet filtru, typ filtru a impedanční přizpůsobení filtru. Na trhu dostupné LCD moduly již obsahují i řadič.

## Enkodér

Rotační enkodér je periferie pomocí, které lze díky mechanickému otáčení generovat digitální signál v závislosti na směru otáčení. Princip enkodéru spočívá v generování dvou obdélníkových průběhů. Oba průběhy jsou navzájem posunuty o 90 stupňů. Pak jednoduše při jedné hraně jednoho průběhu čteme stav druhého signálu a podle toho, zda je v log. 1 nebo log. 0 přičítáme nebo odečítáme.[15] Na obr. 4.9 je princip rotačního enkodéru.



Obr. 4.9: Princip rotačního enkodéru (převzato z [15]).

## Mikrokontrolér ATmega16

ATmega16 je 8bitový mikrokontrolér od firmy Atmel. Tento mikrokontrolér je postaven na Harvardské architektuře. To znamená, že paměť dat je oddělena od paměti programu. Program se ukládá do paměti typu FLASH. Pro data je vyhrazena paměť SRAM a EEPROM. Mikrokontrolér obsahuje 3 základní části:

- Centrální řídicí jednotku CPU,
- Paměti pro obslužný program a data,
- Vstupně/výstupní jednotku pro komunikaci s externími zařízeními.

Součástí CPU je aritmeticko-logická jednotka ALU. Aritmeticko-logická jednotka provádí aritmetické a logické operace s daty, která jsou reprezentována dvěma binárními čísly. Výsledky operací ukládá do paměti registru. K tomu je zde 32 8bitových registrů. Při výpočtu se tedy zpracovávají data z pracovních registrů, uskuteční se operace a výsledek se opět uloží do registru.

O vykonávání a dekódování instrukcí se stará především programový čítač a instrukční registr. Programový čítač obsahuje adresu vykonávané instrukce, která je zpravidla inkrementována.

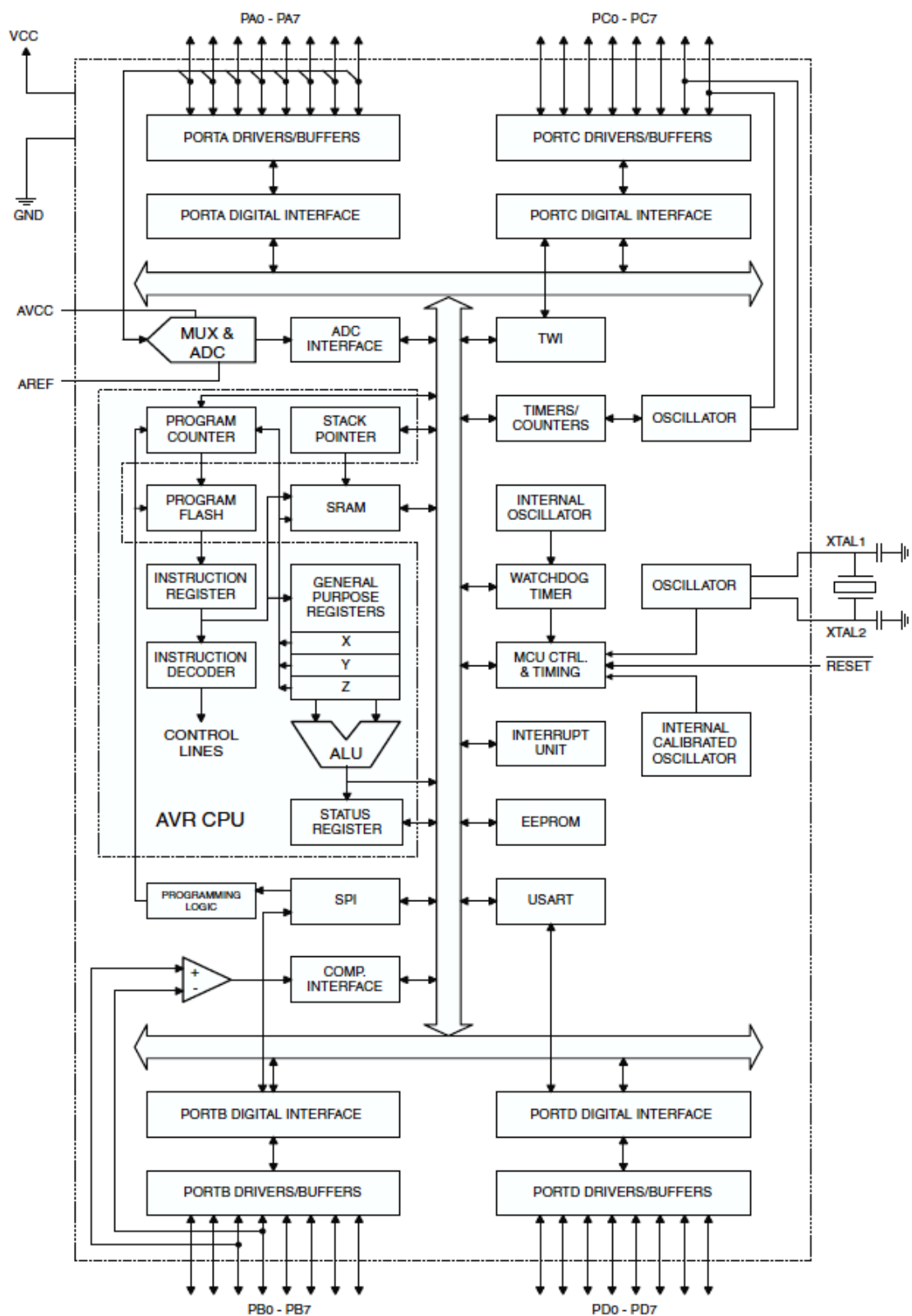


Při volání podprogramu musí být stanoveno, od které instrukce bude dále program pokračovat po vykonání podprogramu. K tomuto účelu slouží zásobník, který obsahuje návratovou adresu a je uložen v SRAM. Návratová adresa musí být následující instrukce po instrukci volání podprogramu. Zapisovat a číst ze zásobníku lze pomocí ukazatele na zásobník.

Všechny uvedené bloky mikrokontroléru mezi sebou komunikují pomocí sběrnic. Další periférie a bloky mikrokontroléru jsou 4 vstupně/výstupní porty o 8 pinech, vnitřní oscilátor, watchdog, 10bitový A/D převodník, čítač, časovač, UART, obsluha přerušování. Přehled parametrů mikrokontroléru ATmega16 ukazuje tab. 4.4. Na obr. 4.5 je blokové schéma mikrokontroléru ATmega16.

Tab. 4.4: Shrnutí parametrů mikrokontroléru ATmega16.

Parametr	Hodnota
Architektura čipu	RISC 8bit
Frekvence	16 MHz
Počet instrukcí	131
Paměť FLASH	16K Bytes
Paměť EEPROM	512 Bytes
Paměť SRAM	1K Bytes
Periférie	Časovač, Čítač, Oscilátor, A/D převodník
Externí programovatelné sběrnice	SPI, USART
Počet programovatelných pinů	32
Napájecí napětí	4,5 až 5,5 V



Obr. 4.10: Blokové schéma mikrokontroléru ATmega16 (převzato z [4]).

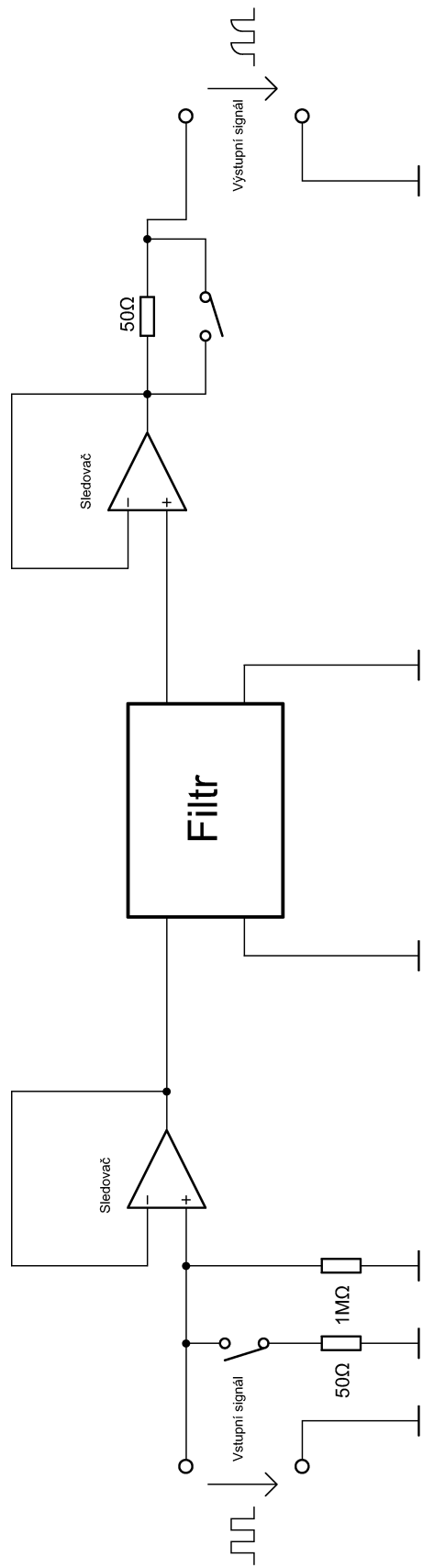
## D/A převodník

V případě použití konkrétního 8bitového digitálně-analogového převodníku pro účely ladění mezního kmitočtu je možné přeladovat v 256 úrovních. Pokud budeme vycházet z předpokladu již uvedeného vztahu pro výpočet ekvivalentního odporu D/A převodníku, zjistíme, že je možné dosáhnout intervalu impedance převodníku od  $10\text{ k}\Omega$  do  $2,56\text{ M}\Omega$ . Skutečnost, že není možné dosáhnout odporu převodníku menšího než  $10\text{ k}\Omega$  limituje rozsah přeladění mezního kmitočtu filtru. A to konkrétně tak, že není možné dosáhnout mezního kmitočtu vyššího jak  $15\text{ kHz}$ , i když integrovaný filtr UAF42 je schopen pracovat až do mezního kmitočtu  $100\text{ kHz}$ . Podrobné teoretické výpočty ukazující možnosti ladění zapojení filtru KHN pomocí D/A převodníku jsou uvedeny v příloze A.1.

## Impedanční přizpůsobení

Impedanční přizpůsobení je stav, při kterém v obvodu nedochází k odrazu vln a naopak dochází k maximálnímu přenosu energie ze zdroje do zátěže. Impedančním přizpůsobením rozumíme situaci, při níž činitelé odrazu zátěže a zdroje jsou komplexně sdruženy. Za této situace nedochází ke vzniku stojatého vlnění a degradaci vstupního nebo výstupního signálu.[17]

V našem konkrétním případě je požadavek na přepínatelné impedanční přizpůsobení vstupní i výstupní části pomocí relé. Relé jsou vybrána s ohledem na velmi nízký odpor kontaktů v sepnutém stavu a mechanickou spolehlivost. Impedanční přizpůsobení bude přepínatelné ve dvou stavech. Prvním stavem bude impedanční přizpůsobení  $50\ \Omega$  (na vstupu i výstupu), které bude sloužit pro impedanční přizpůsobení koaxiálního kabelu s impedancí  $50\ \Omega$ . Druhým stavem bude velmi vysoká impedance v řádech  $\text{M}\Omega$  na vstupu filtru, která je důležitá pro minimální zatěžování předcházejících bloků a velmi nízká impedance na výstupu filtru dána vlastnostmi použitého OZ. Popisované impedanční přizpůsobení je realizováno pomocí přidaných napěťových sledovačů. V zapojení OZ jako sledovače je jeho impedance rovna reálné vstupní a výstupní impedanci OZ. Při použití JFET operačních zesilovačů např. řady TL07x od firmy Texas Instruments[18] je možné dosáhnout impedančního přizpůsobení v řádech  $\text{M}\Omega$ . Na obr. 4.11 je návrh impedančního přizpůsobení pro univerzální filtr.



Obr. 4.11: Návrh impedančního přizpůsobení pro univerzální filtr.

## 5 NÁVRH HARDWAROVÉ ČÁSTI

### 5.1 Zapojení napájecí části

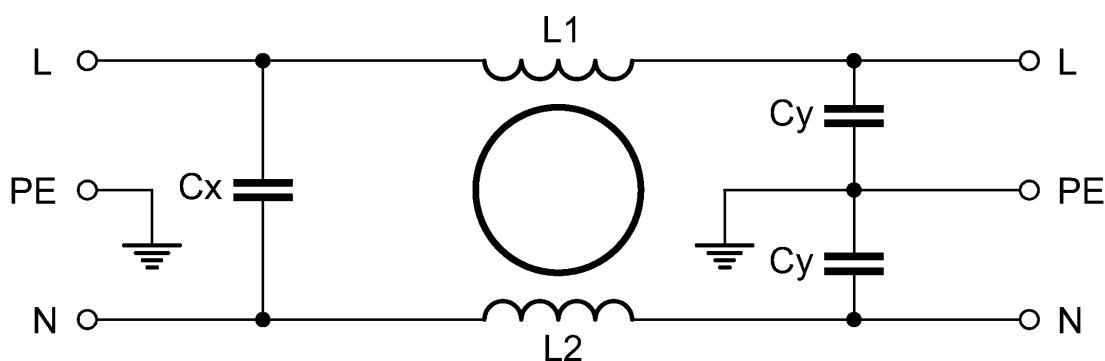
Zařízení je napájeno ze síťového střídavého napětí 230 V s kmitočtem 50 Hz, proto je nutno toho napětí dvojnásobně usměrnit pomocí Graetzova můstku, vyfiltrovat a pomocí lineárních stabilizátorů stabilizovat. Na obr. 5.1 je blokové schéma napájecí části. Na obr. D.1 je schéma zapojení napájecí části.



Obr. 5.1: Blokové schéma napájecí části.

#### LC filtr a pojistka

Odrušovací LC filtr slouží k zamezení pronikání rušivých impulzních signálů ze síťového rozvodu do přístroje. Filtr částečně brání i pronikání rušení z přístroje do sítě. Toto rušení je velmi nežádoucí jev, při kterém může docházet např. k náhodným změnám stavů digitálních obvodů. Na obr. 5.2 je schéma zapojení odrušovacího LC filtru. Tyto typy LC filtrů jsou použitelné do frekvenčního pásma kolem 30 MHz. Filtr je složen z tlumivky se dvěma opačnými vinutími navinuté na stejném toroidním jádře a kapacitorů typu X a Y.[22] V našem konkrétním použití byl vybrán napájecí EURO konektor, který obsahuje LC filtr s parametry: jedna tlumivka s indukčností 1,5 mH a kapacitory 10 nF a 3,3 nF.



Obr. 5.2: Schéma zapojení odrušovacího LC filtru (upraveno podle [22]).

Pro ochranu proti zkratu výstupního napětí je na primárním vinutí transformátoru použita proudová trubičková pojistka s parametry: napětí 250 V a zkratový proud 500 mA.

## Transformátor

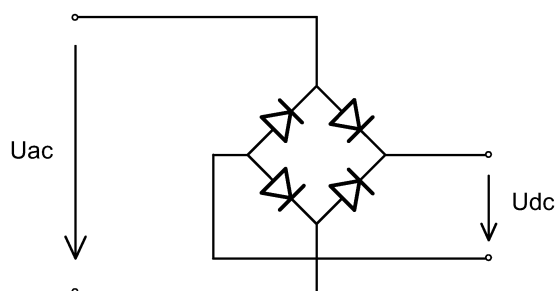
Pro transformaci střídavého napětí je použit transformátor do DPS s jedním primárním a dvěma sekundárními vinutími. Dvě sekundární vinutí jsou použita z důvodu potřeby kladného i záporného výstupního napětí. Přehled parametrů použitého transformátoru EI 54 ukazuje tab. 5.1

Tab. 5.1: Shrnutí parametrů transformátoru EI 54.

Parametr	Hodnota
Výkon	16 VA
Primární napětí	230 V
Sekundární napětí	15 V
Počet sekundárních vinutí	2
Výstupní proud	534 mA
Sekundární napětí naprázdno	2x 19,1 V

## Graetzův můstek a filtrační kapacitory

Pro usměrnění střídavého napětí na napětí stejnosměrné je použit Graetzův usměrňovací můstek. Princip Graetzova můstku je dvoucestné usměrnění pomocí čtyř diod zapojených do můstku. Na obr. 5.3 je zapojení Graetzova můstku.



Obr. 5.3: Schéma zapojení Graetzova můstku.

Filtrační kapacitory slouží k vyfiltrování dvoucestně usměrněného stejnosměrného napětí. Konkrétně jsou použity dva elektrolytické filtrační kapacitory s nízkou hodnotou ekvivalentního seriového odporu pro obě větve kladného a záporného napětí.

### **Lineární stabilizátory**

Vyfiltrované stejnosměrné napětí by již bylo možné použít pro napájení součástek ve schématu, ovšem je výhodné použít ještě jeden blok s lineárními stabilizátory pro stabilizaci napětí. Výhodou použití lineárních stabilizátorů je nezávislost výstupního napětí na změně vstupního napětí a případné změny teploty. Nevýhodou stabilizátorů je to, že nedokáží dosáhnout účinnosti 100%. Z této nevýhody plyne fakt, že kvůli nižší účinnosti se stabilizátory zahřívají, a proto je potřeba je chladit pasivním chladičem. V našem případě byl kladen požadavek na tři větve výstupního napětí, proto byly použity tři stabilizátory napětí. Dva pro kladné výstupní napětí (větve 12 V a 5 V) a jeden pro záporné výstupní napětí (větev -5 V). Konkrétně se jedná o integrované obvody firmy Texas Instruments: LM2940C-12, LM2940C-5 a LM2990-12. Tyto obvody vynikají nízkým úbytkem napětí, proto zaručují větší kompaktnost napájecího zdroje. Úbytek napětí u těchto obvodů je 0,5 až 1 V v závislosti na vstupním napětí.

## 5.2 Zapojení části s filtrem

Schéma zapojení filtru je složeno z několika velmi důležitých částí. Základní rozdělení je analogová a digitální část. Do analogové části patří: spínací relé a jejich obvodové zapojení pro spínání, integrovaný filtr UAF42 a operační zesilovače pro impedanční přizpůsobení. Digitální část zahrnuje mikrokontrolér ATmega16. D/A převodník obsahuje jak část analogovou, tak i část digitální. Na obr. D.2 je schéma zapojení části s filtrem.

### Řidicí část

Řidicí část zapojení, jak již bylo uvedeno je tvořena mikrokontrolérem ATmega16. Zapojení obsahuje externí oscilátor 16 MHz se zakončovacími kapacitami. Dále zapojení obsahuje tlačítko pro reset mikrokontroléru a LC filtr s blokovacími kapacitami pro referenční napětí vnitřního A/D převodníku.

### Spínací relé

Použitá relé jsou jazýčková. Tato relé byla vyvinuta pro telekomunikační účely. Principem funkce je spínání zataveného magnetického kontaktu ve skleněné trubičce (uvnitř trubičky je vakuum) pomocí cívky. Výhodou této konstrukce je menší potřebný proud cívky pro spínání a menší rušení spínacího kontaktu. S ohledem na malé proudové zatížení výstupních portů mikrokontroléru jsou relé spínána přes bipolární tranzistor.

### Periferie

Použité periferie jsou: rotační enkodér, LCD displej a dvě tlačítka pro přepínání typu filtru a přepínání impedančního přizpůsobení. Tyto periferie jsou součástí předního ovládacího panelu na krytu celého přístroje.

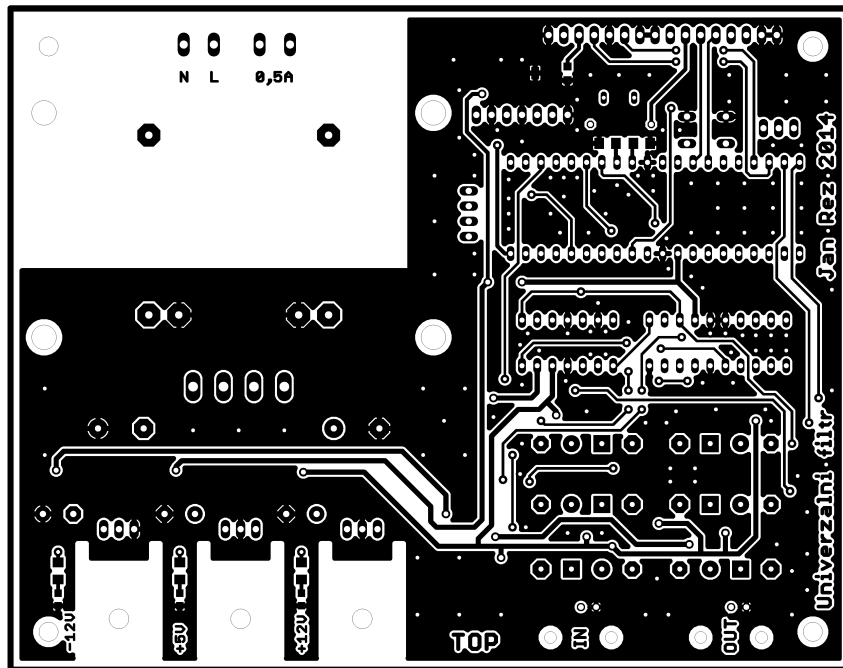


## 5.3 Návrh desky plošných spojů

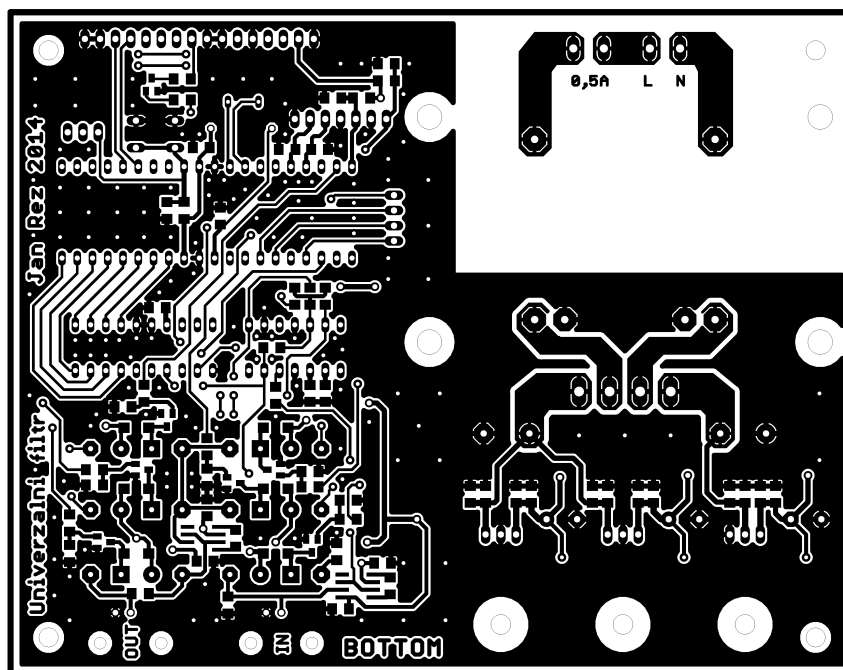
Byla zvolena konstrukce dvouvrstvého plošného spoje v konstrukční třídě 5. Deska plošných spojů byla navrhována v programu EAGLE. V tomto programu je možno velice snadno navrhovat desky plošných spojů, ovšem pro návrh vysoce složitých desek již program vhodný není. Navržená deska byla konstruována s ohledem na co největší jednoduchost, proto je pouze dvouvrstvá. V obou vrstvách je rozlita měď, která slouží jako rozvod společné země a měď slouží také jako stínění proti případnému rušení. Měď je rozlita i pod pouzdry integrovaných obvodů, jelikož mikrokontrolér pracující na kmitočtu 16 MHz je velkým zdrojem rušení.

Vrstva top slouží k montáži všech vývodových součástek a slouží také k rozvodu napájecích napětí. Vrstva bottom je využita pro montáž většiny SMD součástek. Signálové spoje jsou s ohledem na složitost desky vedeny v obou vrstvách. Pro lepší stínící efekt a lepší vlastnosti rozvodu zemí je rozlita měď v obou vrstvách spojena pomocí prokovů.

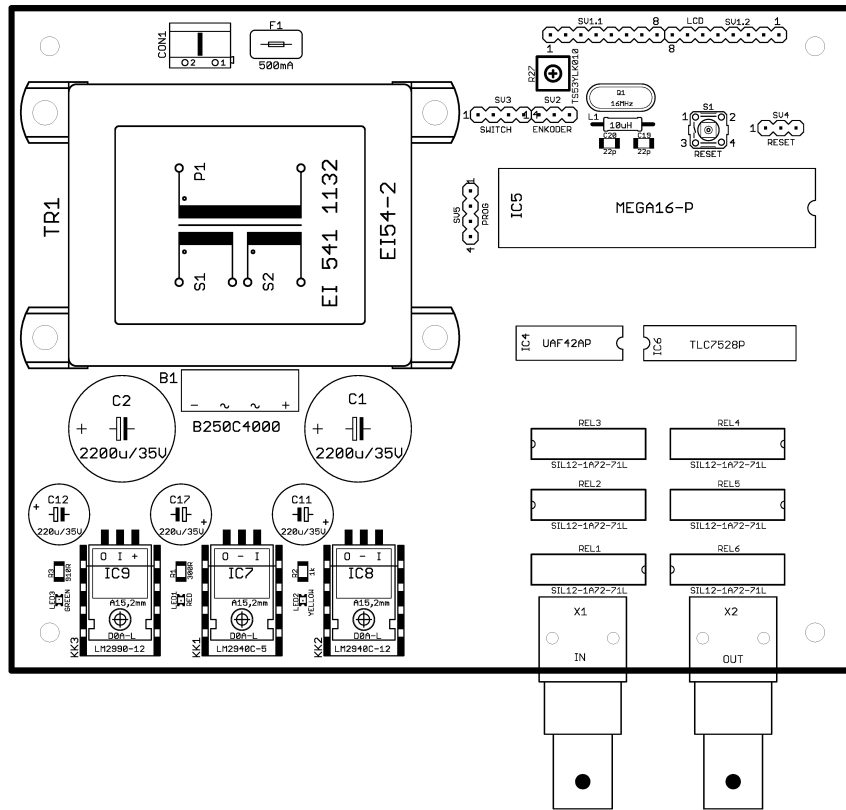
Při postupu návrhu desky byla snaha o co největší dodržení základních návrhových pravidel. Jako základní pravidla uvedu např.: umístění blokovacích kapacitorů co nejbližší k pouzdru integrovaných obvodů, signálové spoje konstruovat co nejkratší, napájecí spoje s co největší možnou šířkou, pod pouzdra logických obvodů rozlévat měď, zpětné vazby a sčítací body operačních zesilovačů konstruovat jako co nejkratší spoje, vytvářet co nejmenší smyčky, atd. Výkresy jednotlivých vrstev jsou uvedeny na jednotlivých obrázcích. Na obr. 5.4 je vrstva TOP. Na obr. 5.5 je vrstva BOTTOM. Na obr. 5.6 je osazovací výkres strany TOP. Na obr. 5.7 je osazovací výkres strany BOTTOM.



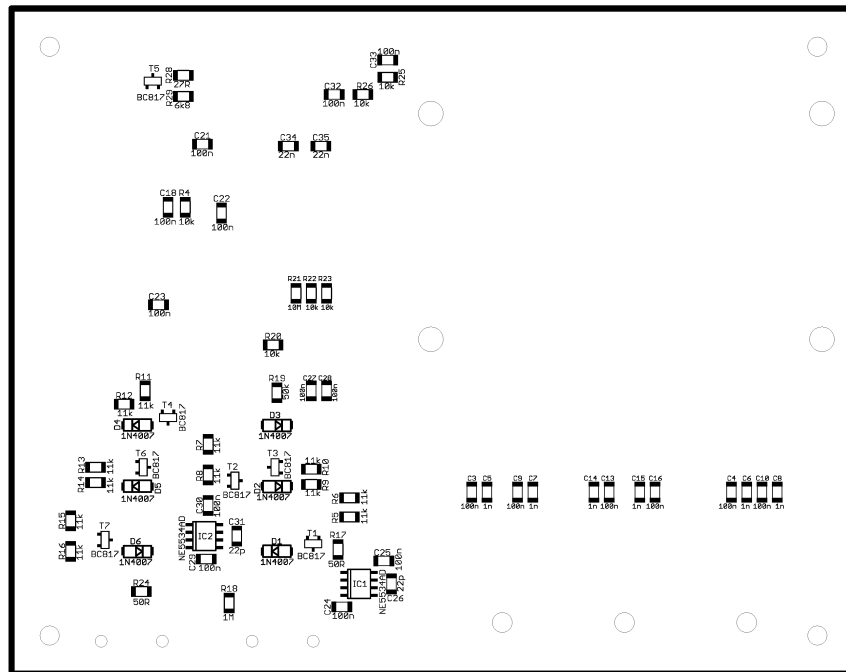
Obr. 5.4: Vrstva TOP.



Obr. 5.5: Vrstva BOTTOM.



Obr. 5.6: Osazovací výkres strany TOP.



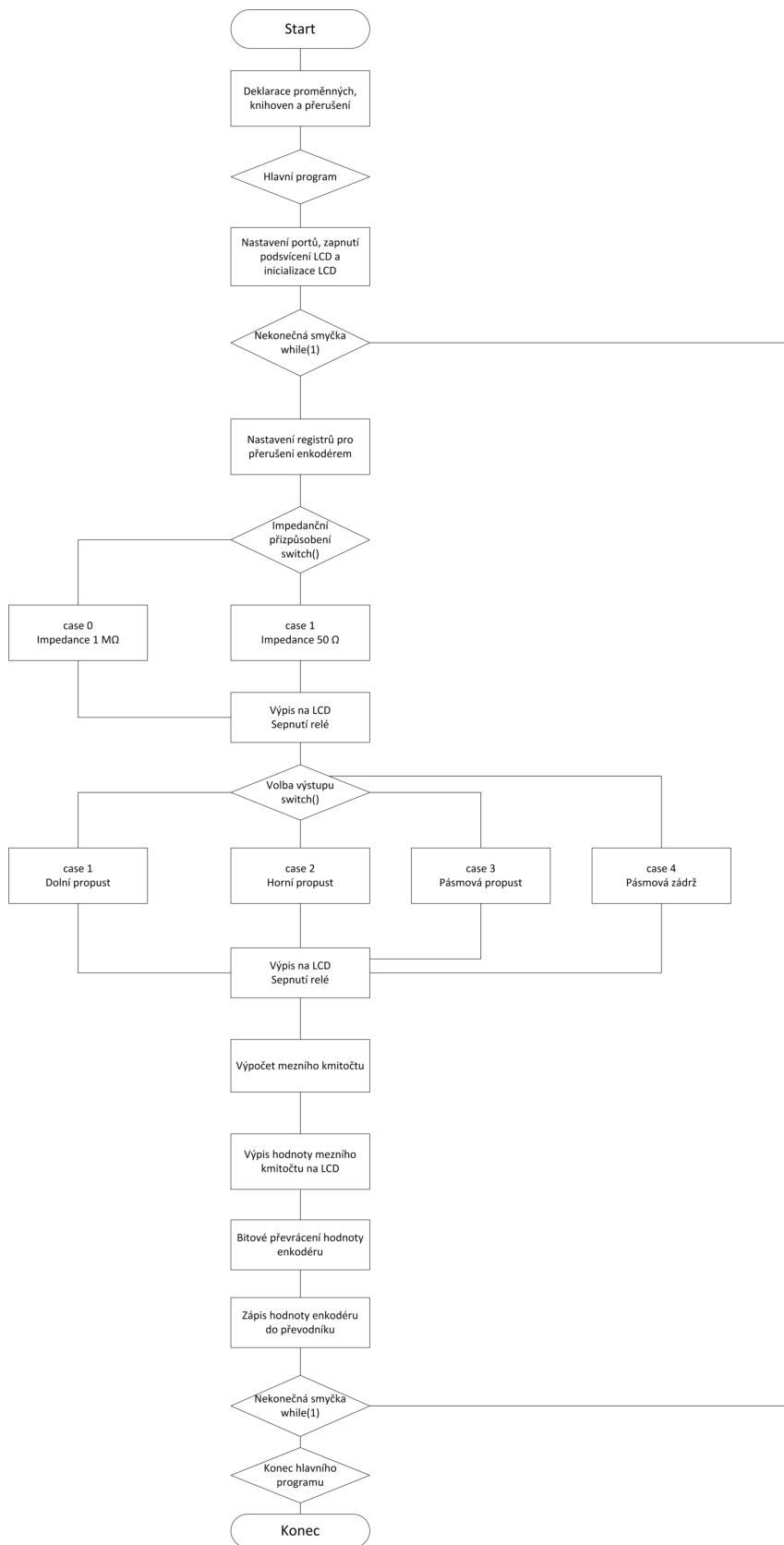
Obr. 5.7: Osazovací výkres strany BOTTOM.

## 6 NÁVRH SOFTWAREVÉ ČÁSTI

### 6.1 Řidicí program pro mikrokontrolér AVR

Software pro mikrokontrolér ATmega16 byl napsán ve vývojovém prostředí AVR studio 4. Výhoda tohoto vývojového prostředí je ta, že AVR studio je dostupné jako freeware a je přímo od vývojářů firmy Atmel, proto je zaručena maximální kompatibilita s mikrokontroléry Atmel. Spojení mezi konkrétním mikrokontrolérem a vývojovým prostředím je vytvořeno pomocí programátoru JTAG. Jde o paralelní programování. Výhodou JTAG programátoru je vyšší rychlost komunikace s mikrokontrolérem a možnost krokování programu přímo v cílové aplikaci. Cílový mikrokontrolér je spojen s JTAG programátorem pomocí 5 pinů (TMS, TCK, TDI, TDO, RESET). Zdrojový kód je napsán v jazyce C. Kromě běžných příkazů a funkcí obsahuje program knihovnu LCD určenou pro ovládání řadiče LCD displeje.

Program je rozdělen do několika částí. První část obsahuje deklaraci všech použitých knihoven, proměnných a deklaraci externího přerušení pro rotační enkodér. Další částí je hlavní program (funkce main). Na začátku hlavního programu je nastavení všech portů mikrokontroléru, toto nastavení slouží pro rozlišení vstupních a výstupních pinů mikrokontroléru. Dále v této části najdeme příkazy pro zapnutí podsvícení a inicializaci LCD displeje. Třetí částí programu je hlavní nekonečná smyčka while. Ve smyčce while jsou příkazy pro volbu impedančního přizpůsobení, volbu typu filtru, obsluhu rotačního enkodéru, výpočet mezního kmitočtu, zobrazení všech údajů na LCD displej a zápis hodnoty enkodéru do D/A převodníku. Na obr. 6.1 je vývojový diagram programu pro řízení univerzálního filtru.



Obr. 6.1: Vývojový diagram programu.

## 6.1.1 Důležité části programu

### Volba typu filtru

Tato část programu začíná příkazem if-else. Podmínka testuje stav pinu PD6. Pokud je na pinu PD6 log. 0 (stisk tlačítka), tak proběhne inkrementace proměnné swout. Příkaz if-else obsahuje vnořený příkaz if, který ošetřuje maximální velikost proměnné swout. Pokud je proměnná swout větší nebo rovna hodnotě čtyři, tak se hodnota proměnné vrátí na hodnotu jedna. Toto ošetření je důležité pro příkaz switch, který dále následuje. Příkaz switch větví program do čtyř částí. Konkrétní část se vybere podle aktuální hodnoty proměnné swout. Podle výběru větve v příkazu switch se zvolí typ filtru, vypíše se tato informace na LCD displej a sepne se příslušné spínací relé. Ostatní relé jsou vypnuta log. 0. Příkaz delay slouží k jednoduchému ošetření záskmitů při sepnutí tlačítka.

```
if ((PIND&(1<<PD6))==0) // test stisku tlačítka na pinu PD6
{
    if (sw_out >= 4) // ošetření max velikosti sw_out
    {
        sw_out = 1;
        _delay_ms(100); // zpoždění 100 ms
    }
    else
    {
        sw_out++;
        _delay_ms(100); // zpoždění 100 ms
    }
    switch (sw_out)
    {
        case 1: sw_out = 1;
        lcd_gotoxy(10,1);
        lcd_puts("Typ:DP");
        PORTD |= (1<<PD4); // zapis log 1 na pin PD4
        PORTD &= ~(1<<PD1); // zapis log 0 na pin PD1
        PORTD &= ~(1<<PD5); // zapis log 0 na pin PD5
        PORTB &= ~(1<<PB0); // zapis log 0 na pin PB0
        break;

        case 2: sw_out = 2;
        lcd_gotoxy(10,1);
        lcd_puts("Typ:HP");
        PORTD |= (1<<PD1); // zapis log 1 na pin PD1
        PORTD &= ~(1<<PD4); // zapis log 0 na pin PD4
        PORTD &= ~(1<<PD5); // zapis log 0 na pin PD5
        PORTB &= ~(1<<PB0); // zapis log 0 na pin PB0
        break;

        case 3: sw_out = 3;
        lcd_gotoxy(10,1);
        lcd_puts("Typ:PP");
        PORTD |= (1<<PD5); // zapis log 1 na pin PD5
```

```

PORTD &= ~(1<<PD1); // zapis log 0 na pin PD1
PORTD &= ~(1<<PD4); // zapis log 0 na pin PD4
PORTB &= ~(1<<PB0); // zapis log 0 na pin PB0
break;

case 4: sw_out=4;
lcd_gotoxy(10,1);
lcd_puts("Typ:PZ");
PORTB|=(1<<PB0); // zapis log 1 na pin PB0
PORTD &= ~(1<<PD1); // zapis log 0 na pin PD1
PORTD &= ~(1<<PD4); // zapis log 0 na pin PD4
PORTD &= ~(1<<PD5); // zapis log 0 na pin PD5
break;
}

```

## Výpočet a zobrazení hodnoty mezního kmitočtu na LCD

Úkolem této části programu je výpočet a zobrazení hodnoty mezního kmitočtu na LCD displej. Do proměnné `rdac` ukládáme hodnotu vypočteného odporu D/A převodníku. Odpor převodníku je počítán podle vztahu uvedeného v podkapitole 3.2.1. Bitové slovo `D` je reprezentováno hodnotou proměnné `enc` z rotačního enkodéru. Dále počítáme mezní kmitočet filtru podle zjednodušeného vztahu:

$$F_m = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (6.1)$$

Vypočtená hodnota mezního kmitočtu filtru se ukládá do proměnné `fmez`. Proměnná `fmez` je typu `integer`, proto je výsledná hodnota proměnné zaokrouhlována. Ve výpočtu mezního kmitočtu filtru figuruje i proměnná korekce typu `float`, která slouží k odstranění rozdílu mezi vypočtenou hodnotou zobrazovanou na LCD displeji a hodnotou reálnou. O vypsání hodnoty mezního kmitočtu na LCD displej se stará funkce `lcdputs(void)` z knihovny `LCD`. Nejprve, ale funkce `sprintf` předá text a hodnotu proměnné `fmez` řetězci `str`, který se předá funkci `lcdputs` k vypsání na displej.

```

rdac=(2560000)/(enc); // vypocet odporu prevodniku

fmez=(1/(2*pi*rdac*c))*korekce; // vypocet meznihokmitoctu

lcd_gotoxy(0,0); // jdi na pozici x=0, y=0

sprintf(str, "Fm = %5d Hz", fmez); // vytiskni do retezce

lcd_puts(str); // vypis retezec na displej

```

## Zápis hodnoty enkodéru do převodníku

Před zápisem hodnoty enkodéru do D/A převodníku je hodnota proměnné `enc` zkopírována do proměnné `enk` typu `unsigned char`. Proměnná typu `unsigned char` je 8bitové číslo. Tento datový typ je nutný pro správnou funkci následujícího cyklu `for`. Mohlo by se totiž stát, že by při operacemi s proměnnou `enk` mohla proměnná nabývat větší hodnoty než je 8bitové číslo. Tato situace by byla nežádoucí, protože převodník je 8bitový a je možné do něj zapsat pouze 8bitové číslo. Cyklus `for` je zde z důvodu potřeby zrcadlového překlopení bitové hodnoty proměnné `enk`. Zrcadlové překlopení bitové hodnoty proměnné `enk` je nutné kvůli prohozeným pinům pro LSB a MSB v zapojení D/A převodníku s mikrokontrolérem. Dále následuje příkaz pro zapsání již převrácené hodnoty proměnné `enk` na piny D/A převodníku. Příkaz zapsání `log. 1` na pin `PC1` a následné vynulování tohoto pinu slouží k aktivaci druhého kanálu v D/A převodníku. Pro změnu mezního kmitočtu filtru je potřeba souběžná změna dvou rezistorů, proto se tedy využívají oba kanály v D/A převodníku. Příkazy `delay` slouží k bezpečnému načasování zápisů na port C pinu `PC1`.

```
enk=enc; // prevedeni enc do enk

for ( i = 0 ; i < 8 ; i ++ ) // zrcadlove prevraceni cisla enk
{
    out <<= 1;
    out |= ( (enk & (1 << i)) >> i);
}

PORTA=out; // zapis prevraceneho cisla na port A

_delay_ms(10); // zpozdeni 10 ms

PORTC|=(1<<PC1); // prepnuti kanalu v prevodniku (zapis log. 1 na pin PC1)

_delay_ms(10); // zpozdeni 10 ms

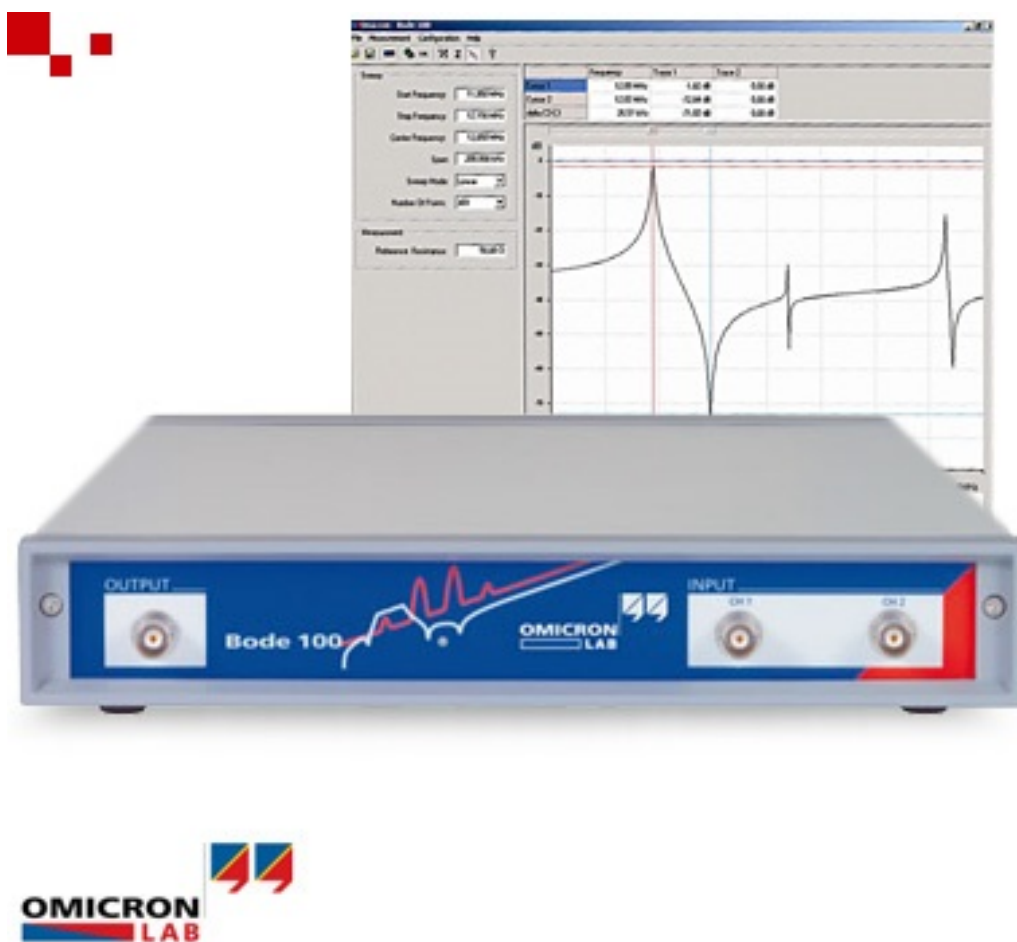
PORTC &= ~(1<<PC1); // zapis log. 0 na pin PC1
```



# 7 OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ FILTRU POMOCÍ MĚŘENÍ

## 7.1 Měřicí soustava

Měření probíhalo na vektorovém analyzátoru Bode 100 od firmy Omicron Lab[16]. Tento vektorový analyzátor funguje v kmitočtovém pásmu 1 Hz až 40 MHz. Pomocí tohoto přístroje je možné velmi snadno analyzovat různé elektronické obvody. Přístroj lze také využít pro měření frekvenční odezvy, impedance, fáze a zisku signálu, anebo jej použít jako generátor sinusového průběhu. Další výhodou toho přístroje je propojení s PC kabelem USB. Díky tomu je možné zobrazovat charakteristiky měřeného obvodu na monitoru počítače a výsledná data ukládat např. do programu MS Excel. Na obr. 7.1 je vektorový analyzátor Omicron Lab Bode 100.

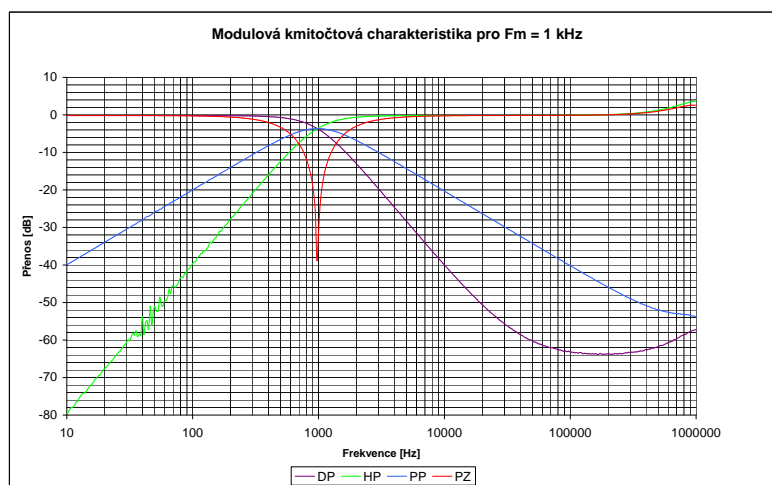


Obr. 7.1: Vektorový analyzátor Omicron Lab Bode 100.

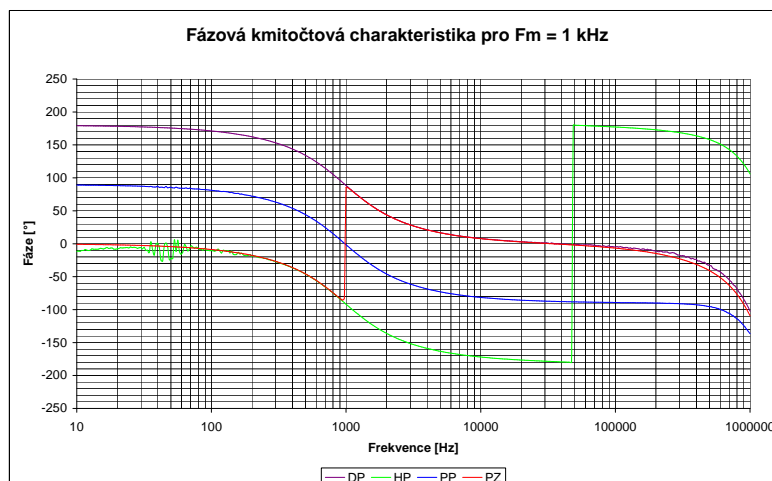
## 7.2 Naměřené charakteristiky univerzálního filtru

Cílem ověření vlastností filtru je porovnání naměřených výsledků s výsledky simulací. Postup měření začal volbou impedančního přizpůsobení. Hodnotu impedančního přizpůsobení jsem zvolil  $1\text{ M}\Omega$ . Poté jsem naladil vhodný mezní kmitočet filtru a postupně jsem přepínal jednotlivé typy filtru. Data z každého měření jsem poté uložil do souboru programu MS Excel, z těchto dat jsem vytvořil grafické závislosti. Pro každý typ filtru a vybrané mezní kmitočty jsem naměřil modulovou kmitočtovou charakteristiku a fázovou kmitočtovou charakteristiku.

Naměřené charakteristiky odpovídají provedeným simulacím. Ovšem na praktických výsledcích měření je možné si všimnout reálných vlastností skutečných obvodů a součástek. Konkrétně u modulové kmitočtové charakteristiky pro filtr s mezním kmitočtem  $1\text{ kHz}$  vidíme, že již od kmitočtu  $1\text{ MHz}$  není přenos stabilní pro všechny typy filtrů. Tento jev je pravděpodobně způsoben reálnými vlastnostmi operačních zesilovačů. Dále můžeme vidět, že u typu horní propust se u malých hodnot přenosu vyskytuje nezanedbatelný šum. Jsou to hodnoty přenosu kolem  $-50\text{ dB}$ . Tento šum je pravděpodobně způsoben vlastním šumem použitých součástek, parazitními kapacitami na desce plošných spojů a případným rušením. Co se týče fázové kmitočtové charakteristiky, tak u ní je také patrný šum u nižších hodnot fáze, nestabilní průběh fáze na vyšších kmitočtech a skoková změna fáze u typu horní propust. V přílohách jsou uvedeny grafické závislosti pro další mezní kmitočty. Konkrétně pro kmitočty  $3\text{ kHz}$ ,  $5\text{ kHz}$ ,  $10\text{ kHz}$  a  $15\text{ kHz}$ . U těchto vyšších mezních kmitočtů je patrné podobné chování jako u charakteristik pro mezní kmitočet  $1\text{ kHz}$ , ovšem zaznamenáváme rostoucí úroveň šumu. Na obr. 7.2 je modulová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem  $1\text{ kHz}$ . Na obr. 7.3 je fázová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem  $1\text{ kHz}$ .



Obr. 7.2: Naměřená modulová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 1 kHz.

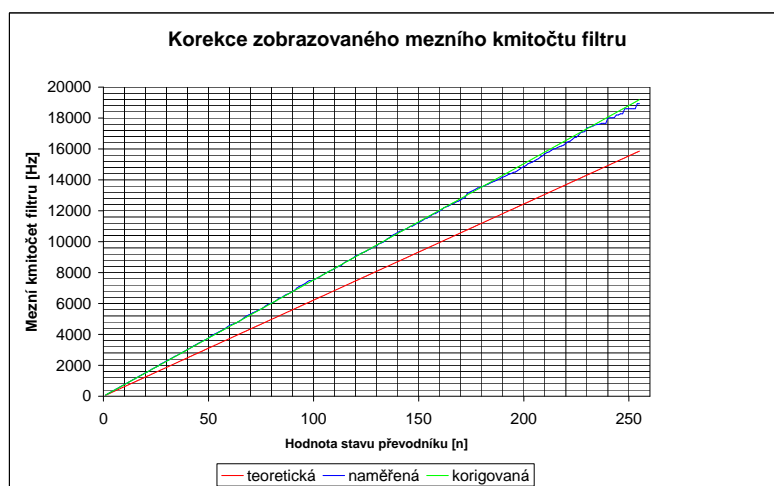


Obr. 7.3: Naměřená fázová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 1 kHz.

## 7.3 Korekce zobrazovaného mezního kmitočtu na LCD displeji

Během měření se objevila nepříjemná vlastnost hotového prototypu. Zjistil jsem, že teoretická hodnota mezního kmitočtu zobrazovaná na LCD displeji neodpovídá reálné naměřené hodnotě. Podle porovnání teoretických a reálných hodnot se rozdíl pohyboval v desítkách procent. Tento rozdíl je způsoben reálným integrovaným obvodem TLC7528. Konkrétně odpory v jeho rezistorové síti. Hodnota příčkového odporu v D/A převodníku se totiž u různých obvodů může lišit, a proto u jiného integrovaného obvodu bychom naměřili podobné, ale odlišné výsledky.

Abych odstranil tuto nepříjemnou vlastnost rozhodl jsem se změřit všechny možné stavy přeladění filtru a porovnat je s teoretickými hodnotami. Z výsledků měření jsem zjistil, že obě závislosti mezního kmitočtu na číslu v převodníku, a to teoretická i reálná se blíží lineární závislosti. Proto je možné tento rozdíl korigovat. Tento úkon provedeme vynásobením teoretického výpočtu mezního kmitočtu vhodnou konstantou. Výpočet konstanty probíhal v první fázi výpočtem poměrů všech reálných stavů ku teoretickým a poté výpočtem aritmetického průměru všech poměrů. Výsledná konstanta pro korekci zobrazovaného mezního kmitočtu má hodnotu 1,209. Každý stav jsem poté vynásobil touto opravnou konstantou. Výsledky jsou uvedeny v grafických závislostech. Na ose x je vynášeno číslo stavu v převodníku a na ose y je mezní kmitočet. Konstanta je implementována i do programu pro řízení filtru, proto již LCD displej zobrazuje velmi blízkou hodnotu hodnotě reálné. Na obr. 7.4 je grafické znázornění korekce zobrazovaného mezního kmitočtu filtru. Z grafického znázornění je patrné, že u vyšších mezních kmitočtů se bude projevat větší chyba. Toto je způsobeno ne zcela lineární závislostí.



Obr. 7.4: Korekce zobrazovaného mezního kmitočtu filtru.

## 8 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vysvětlit základní principy analogových kmitočtových filtrů a navrhnout prototyp elektronicky laditelného univerzálního filtru určeného pro měřicí účely v laboratoři UTEE. Z hlediska teoretické části práce je kladen důraz na univerzální aktivní filtry druhého řádu. Jsou uvedena základní zapojení aktivních filtrů ARC. Principiálně jsou vybrány a popsány dvě možnosti elektronického ladění filtrů, a to pomocí digitálních potenciometrů nebo digitálně-analogových převodníků. Jsou rozebrány výhody a nevýhody těchto dvou řešení. Dále jsou popsány konkrétní vybrané integrované obvody potenciometru a převodníku. Byly také provedeny simulace konkrétního zapojení a návrh filtru z hlediska řízení a implementace dostupných periférií. V praktické části práce se již zaměřuji na návrh desek plošných spojů, návrh řídicího softwaru pro mikrokontrolér a ověření vlastností filtru pomocí měření.

Z naměřených výsledků usuzuji, že se podařilo navrhnout funkční prototyp univerzálního kmitočtového filtru použitelného v kmitočtovém pásmu od 70 Hz do 17 kHz. Naměřené charakteristiky odpovídají teoretickým simulacím. Ovšem ve výsledcích měření lze pozorovat negativní vlastnosti a reálné nedostatky elektronických součástí, především operačních zesilovačů. Tyto negativní vlastnosti se projevují u modulové kmitočtové charakteristiky šumem při nízkých hodnotách přenosu a nestabilním přenosem filtru při vyšších kmitočtech. U fázové kmitočtové charakteristiky se projevuje stejně jako v simulacích skoková změna fáze u typu horní propust. Tato skoková změna je pravděpodobně způsobena vlastnostmi zapojení KHN filtru. Všechny tyto negativní jevy, ale neomezují působnost prototypu pro navržené kmitočtové pásmo. Měřením bylo zjištěno, že zobrazovaná hodnota mezního kmitočtu se liší od reálné hodnoty. Tento jev je způsoben nedokonalostí integrovaného obvodu D/A převodníku. Z výsledků měření lze usoudit, že závislost teoretické zobrazované hodnoty na čísle stavu v převodníku je lineární a závislost reálné hodnoty na čísle stavu v převodníku je také lineární funkce. Rozdíl zobrazované a reálné hodnoty mezního kmitočtu je tedy možné korigovat vynásobením teoretické hodnoty vypočtenou korekční konstantou. Korekční konstanta je vypočtena z naměřených stavů převodníku, tedy všech měření mezních kmitočtů. Nejprve byl vypočten poměr všech reálných a teoretických hodnot a poté byl proveden z hodnot poměrů aritmetický průměr. Výsledná konstanta je zanesena do programu pro řízení filtru a filtr zobrazuje hodnotu velmi blízkou hodnotě reálné.

V přílohách jsou uvedeny teoretické výpočty pro mezní kmitočet filtru, simulace zapojení univerzálního filtru, fotogalerie, naměřené charakteristiky hotového funkčního prototypu, výkresy schémat a obsah příloženého CD.

## LITERATURA

- [1] AD5242 Digital potentiometer. Datasheet, Analog Devices. [online]. 2009, poslední aktualizace 23.10.2013 [cit. 23.10.2013]. Dostupné z URL: <[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD5241\\_5242.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD5241_5242.pdf)>.
- [2] AD7528 D/A converter. Datasheet, Analog Devices. [online]. 1998, poslední aktualizace 23.10.2013 [cit. 23.10.2013]. Dostupné z URL: <[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD7528.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7528.pdf)>.
- [3] ANALOG DEVICES. [online]. [cit. 2013-09-15]. Dostupné z URL:<<http://www.analog.com/en/index.html>>.
- [4] ATmega16 Microcontroller. Datasheet, Atmel Corp. [online]. 2010, poslední aktualizace 16.10.2013 [cit. 16.10.2013]. Dostupné z URL: <<http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf>>.
- [5] BRÜEL & KJÆR. [online]. [cit. 2013-11-12]. Dostupné z URL:<<http://www.bksv.com/>>.
- [6] Digitally Programmed State Variable Filter. Mini tutorial, Analog Devices. [online]. 2009, poslední aktualizace 17.11.2013 [cit. 17.11.2013]. Dostupné z URL:<<http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-208.pdf>>.
- [7] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektrotechniky: Kmitočtové filtry, generátory signálů a převodníky dat. 1. vydání*. Praha: Technická literatura BEN, 2009. 272 s. ISBN 978-80-7300-240-4.
- [8] HÁJEK, Karel. *Kmitočtové filtry. 1.vyd.* Praha: Technická literatura BEN, 2002. 535 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [9] KROHN-HITE. [online]. [cit. 2013-11-22]. Dostupné z URL:<<http://www.krohn-hite.com/>>.
- [10] LINEAR TECHNOLOGY. [online]. [cit. 2013-11-18]. Dostupné z URL:<<http://www.linear.com/>>.
- [11] LTC1562 Analog filter. Datasheet, Linear Devices. [online]. 1998, poslední aktualizace 23.11.2013 [cit. 19.11.2013]. Dostupné z URL: <<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/15622fa.pdf>>.
- [12] MAXIM INTEGRATED. [online]. [cit. 2013-11-19]. Dostupné z URL:<<http://www.maximintegrated.com/>>.

- [13] MAX274/275 Analog filter. Datasheet, Maxim Integrated. [online]. 1996, poslední aktualizace 23.11.2013 [cit. 19.11.2013]. Dostupné z URL: <<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX274-MAX275.pdf>>.
- [14] MICROCHIP. [online]. [cit. 2013-12-10]. Dostupné z URL:<<http://www.microchip.com/>>.
- [15] NAVRÁTIL, Petr. *Didaktická příručka pro vývojový kit s ATMEL*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 52 s.
- [16] OMICRON LAB. [online]. [cit. 2014-5-15]. Dostupné z URL:<<http://www.omicron-lab.com/>>.
- [17] RAIDÁ, Zbyněk. *Multimediální učebnice: Elektromagnetické vlny, Mikrovlnná technika* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010, 2013-12-25 [cit. 2013-12-25]. Dostupné z URL:<<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php>>.
- [18] TEXAS INSTRUMENTS. [online]. [cit. 2013-12-07]. Dostupné z URL:<<http://www.ti.com/>>.
- [19] TLC7528 D/A converter. Datasheet, Texas Instruments. [online]. 2008, poslední aktualizace 23.11.2013 [cit. 23.11.2013]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc7528.pdf>>.
- [20] UAF42 Analog filter. Datasheet, Texas Instruments. [online]. 2010, poslední aktualizace 23.11.2013 [cit. 23.11.2013]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uaf42.pdf>>.
- [21] VÁŇA, Vladimír. *Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C : popis a práce ve vývojovém prostředí CodeVisionAVR C*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 215 s. ISBN 80-730-0102-0.
- [22] VRBA, Kamil. *Konstrukce elektronických zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, ústav telekomunikací, 2011, 250 s. ISBN 978-802144395-2.
- [23] VRBA, Kamil , KUBÁNEK David. *Použití digitálních potenciometrů k řízení parametrů kmitočtových filtrů* [online]. 2002 Dostupné z URL: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02050/index.html#22>>.
- [24] WAVETEK. [online]. [cit. 2013-12-15]. Dostupné z URL:<<http://www.wavetek.net/>>.



## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ALU	Aritmeticko-logická jednotka
ARC	Aktivní filtry RC
$D$	Vstupní bitové slovo
DP	Dolní propust
D/A	Digitálně-analogový
$f_m$	Mezní kmitočet
$F_t$	Tranzitní kmitočet operačního zesilovače
$F_0$	Rezonanční kmitočet filtru
$f_1$	Kmitočet vstupního signálu
HP	Horní propust
$I_{out}$	Výstupní proud proudového D/A převodníku
KHN	Kerwin-Huelsman-Newcomb
$K_u$	Přenos harmonického signálu
$\Omega_0$	Mezní kruhový kmitočet
OZ	Operační zesilovač
PP	Pásmová propust
PZ	Pásmová zádrž
$Q$	Činitel jakosti filtru
$R$	Příčkový odpor proudového D/A převodníku s rezistorovou sítí R-2R
$R_{dac}$	Ekvivalentní odpor D/A převodníku
$U_{ref}$	Referenční napětí proudového D/A převodníku
$U_1$	Amplituda vstupního signálu
$U_2$	Amplituda výstupního signálu

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A Tabulky</b>	<b>66</b>
A.1 Teoretické výpočty pro mezní kmitočet filtru . . . . .	66
<b>B Simulace</b>	<b>75</b>
B.1 Simulace univerzálního filtru . . . . .	75
<b>C Obrázky a grafy</b>	<b>85</b>
C.1 Fotogalerie . . . . .	85
C.2 Výsledky měření univerzálního filtru . . . . .	86
<b>D Výkresy</b>	<b>90</b>
D.1 Výkresy schémat . . . . .	90
<b>E Obsah přiloženého CD-ROM</b>	<b>92</b>

## A TABULKY

### A.1 Teoretické výpočty pro mezní kmitočet filtru

Tab. A.1: Výpočet prvků pro strukturu KHN.

Bitová hodnota [n]	Odpor převodníku [ $\Omega$ ]	Mezní kmitočet filtru [Hz]
1	2560000	62
2	1280000	124
3	853333	187
4	640000	248
5	512000	311
6	426666	373
7	365714	435
8	320000	497
9	284444	560
10	256000	622
11	232727	684
12	213333	746
13	196923	808
14	182857	870
15	170666	933
16	160000	995
17	150588	1057
18	142222	1119
19	134737	1181
20	128000	1243
21	121905	1306
22	116364	1368
23	111304	1430
24	106666	1492
25	102400	1554
26	98462	1616
27	94815	1679
28	91429	1741
29	88276	1803
30	85333	1865

Bitová hodnota [n]	Odpor převodníku [ $\Omega$ ]	Mezní kmitočet filtru [Hz]
31	82581	1927
32	80000	1989
33	77576	2052
34	75294	2114
35	73143	2176
36	71111	2238
37	69189	2300
38	67368	2362
39	65641	2425
40	64000	2487
41	62439	2549
42	60952	2611
43	59535	2673
44	58182	2735
45	56889	2798
46	55652	2860
47	54468	2922
48	53333	2984
49	52245	3046
50	51200	3109
51	50196	3171
52	49231	3233
53	48302	3295
54	47407	3357
55	46545	3419
56	45714	3482
57	44912	3544
58	44138	3606
59	43390	3668
60	42667	3730

Bitová hodnota [n]	Odpor převodníku [ $\Omega$ ]	Mezní kmitočet filtru [Hz]
61	41967	3792
62	41290	3855
63	40635	3917
64	40000	3979
65	39385	4041
66	38788	4103
67	38209	4165
68	37647	4228
69	37101	4290
70	36571	4352
71	36056	4414
72	35556	4476
73	35068	4538
74	34595	4601
75	34133	4663
76	33684	4725
77	33247	4787
78	32821	4849
79	32405	4911
80	32000	4974
81	31605	5036
82	31220	5098
83	30843	5160
84	30476	5222
85	30118	5284
86	29767	5347
87	29425	5409
88	29091	5471
89	28764	5533
90	28444	5595

Bitová hodnota [n]	Odpor převodníku [ $\Omega$ ]	Mezní kmitočet filtru [Hz]
91	28132	5657
92	27826	5720
93	27527	5782
94	27234	5844
95	26947	5906
96	26667	5968
97	26392	6031
98	26122	6093
99	25859	6155
100	25600	6217
101	25347	6279
102	25098	6341
103	24854	6404
104	24615	6466
105	24381	6528
106	24151	6590
107	23925	6652
108	23704	6714
109	23486	6777
110	23273	6839
111	23063	6901
112	22857	6963
113	22655	7025
114	22456	7087
115	22261	7150
116	22069	7212
117	21880	7274
118	21695	7336
119	21513	7398
120	21333	7460

Bitová hodnota [n]	Odpor převodníku [ $\Omega$ ]	Mezní kmitočet filtru [Hz]
121	21157	7523
122	20984	7585
123	20813	7647
124	20645	7709
125	20480	7771
126	20317	7833
127	20157	7896
128	20000	7958
129	19845	8020
130	19692	8082
131	19542	8144
132	19394	8206
133	19248	8269
134	19104	8331
135	18963	8393
136	18824	8455
137	18686	8517
138	18551	8579
139	18417	8642
140	18286	8704
141	18156	8766
142	18028	8828
143	17902	8890
144	17778	8952
145	17655	9015
146	17534	9077
147	17415	9139
148	17297	9201
149	17181	9263
150	17067	9326

Bitová hodnota [n]	Odpor převodníku [ $\Omega$ ]	Mezní kmitočet filtru [Hz]
151	16954	9388
152	16842	9450
153	16732	9512
154	16623	9574
155	16516	9636
156	16410	9699
157	16306	9761
158	16203	9823
159	16101	9885
160	16000	9947
161	15901	10009
162	15802	10072
163	15706	10134
164	15610	10196
165	15515	10258
166	15422	10320
167	15329	10382
168	15238	10445
169	15148	10507
170	15059	10569
171	14971	10631
172	14884	10693
173	14798	10755
174	14713	10818
175	14629	10880
176	14545	10942
177	14463	11004
178	14382	11066
179	14302	11128
180	14222	11191



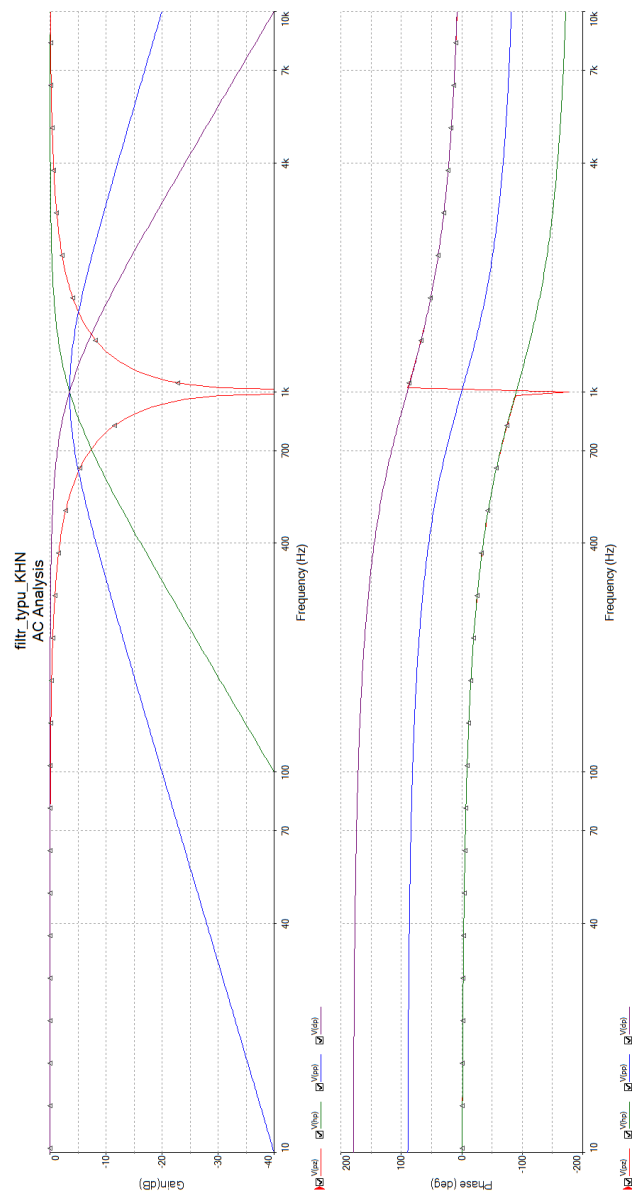
Bitová hodnota [n]	Odpor převodníku [ $\Omega$ ]	Mezní kmitočet filtru [Hz]
181	14144	11253
182	14066	11315
183	13989	11377
184	13913	11439
185	13838	11501
186	13763	11564
187	13690	11626
188	13617	11688
189	13545	11750
190	13474	11812
191	13403	11874
192	13333	11937
193	13264	11999
194	13196	12061
195	13128	12123
196	13061	12185
197	12995	12247
198	12929	12310
199	12864	12372
200	12800	12434
201	12736	12496
202	12673	12558
203	12611	12620
204	12549	12683
205	12488	12745
206	12427	12807
207	12367	12869
208	12308	12931
209	12249	12994
210	12190	13056

Bitová hodnota [n]	Odpor převodníku [ $\Omega$ ]	Mezní kmitočet filtru [Hz]
211	12133	13118
212	12075	13180
213	12019	13242
214	11963	13304
215	11907	13367
216	11852	13429
217	11797	13491
218	11743	13553
219	11690	13615
220	11636	13677
221	11584	13740
222	11532	13802
223	11480	13864
224	11429	13926
225	11378	13988
226	11327	14050
227	11278	14113
228	11228	14175
229	11179	14237
230	11130	14299
231	11082	14361
232	11034	14423
233	10987	14486
234	10940	14548
235	10894	14610
236	10847	14672
237	10802	14734
238	10756	14796
239	10711	14859
240	10667	14921

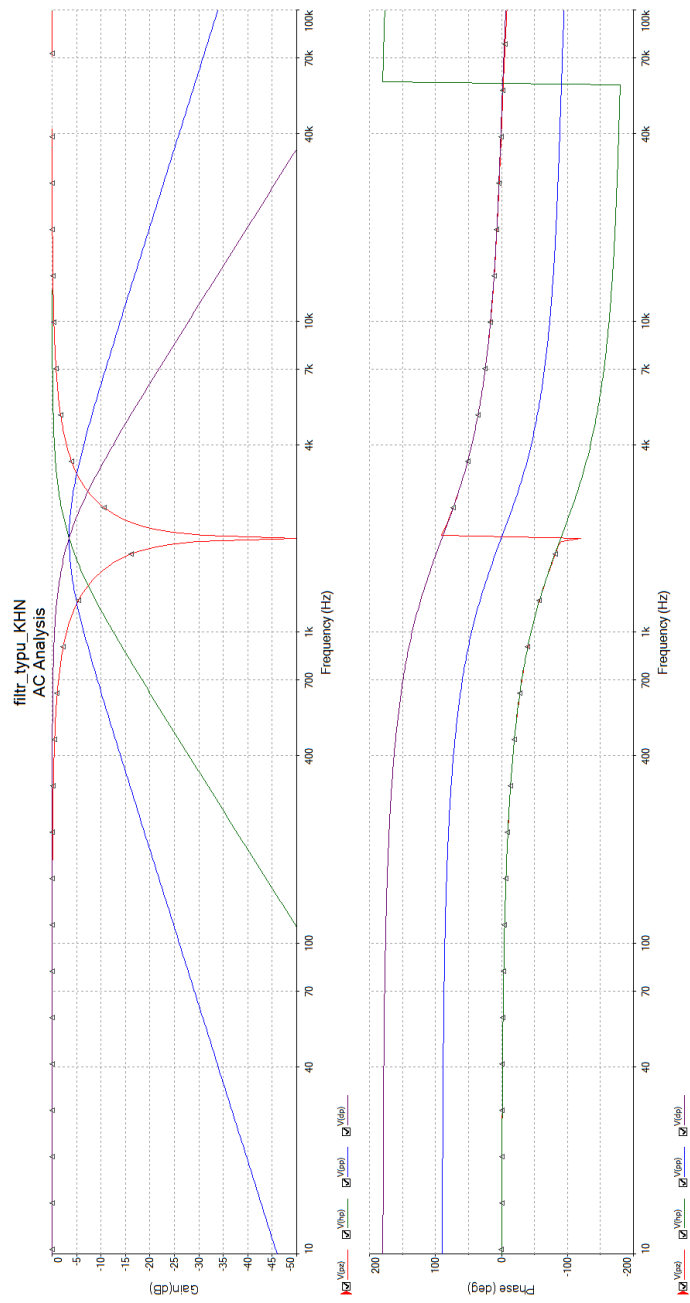
Bitová hodnota [n]	Odpor převodníku [ $\Omega$ ]	Mezní kmitočet filtru [Hz]
241	10622	14983
242	10579	15045
243	10535	15107
244	10492	15169
245	10449	15232
246	10407	15294
247	10364	15356
248	10323	15418
249	10281	15480
250	10240	15542
251	10199	15605
252	10159	15667
253	10119	15729
254	10079	15791
255	10039	15853

## B SIMULACE

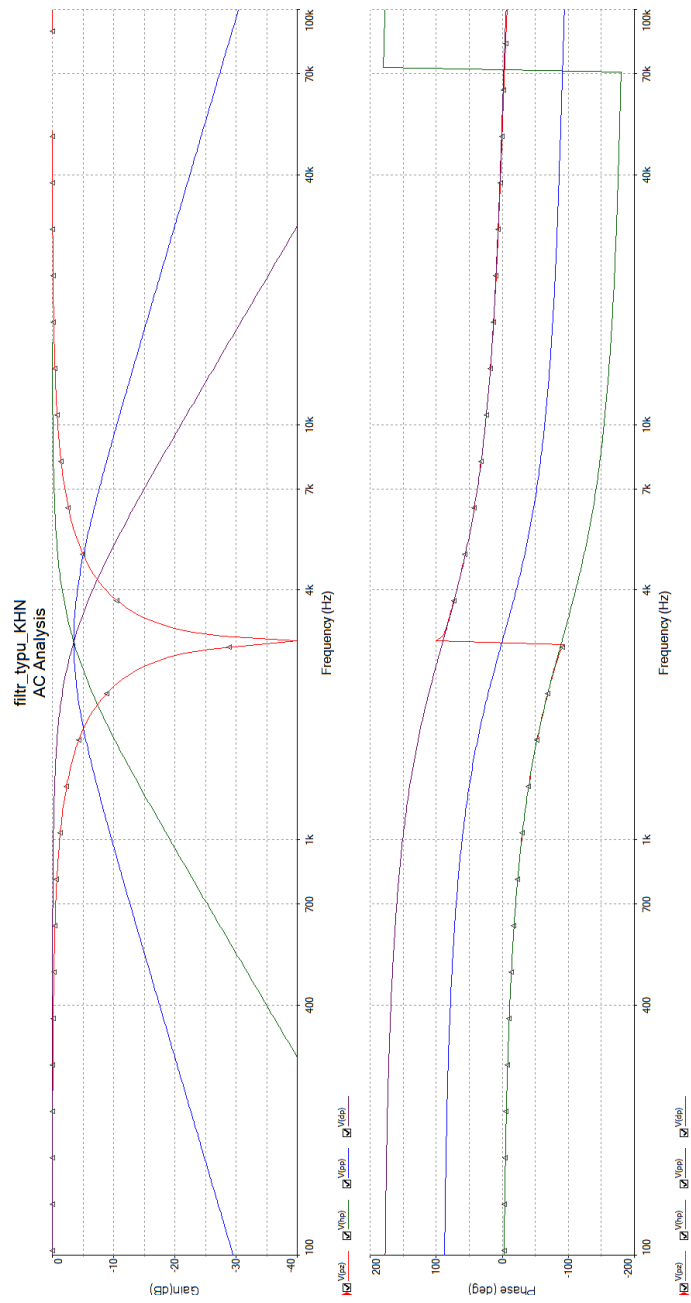
### B.1 Simulace univerzálního filtru



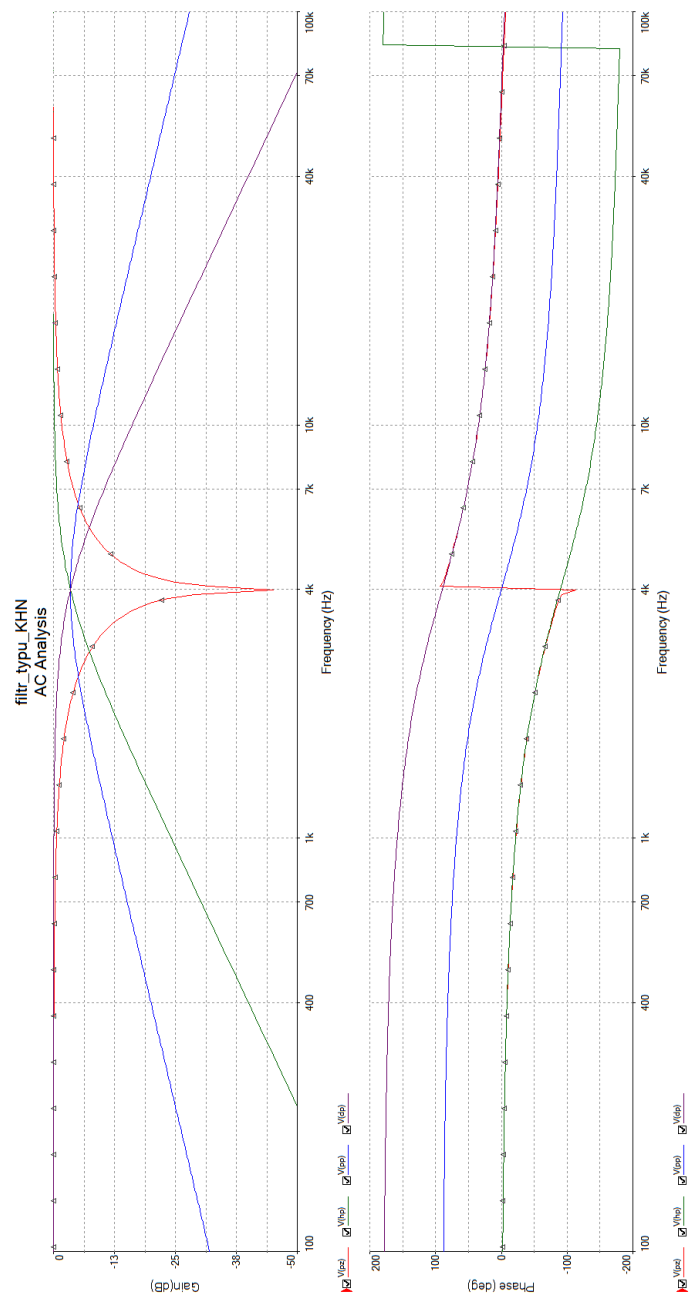
Obr. B.1: Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 1 kHz.



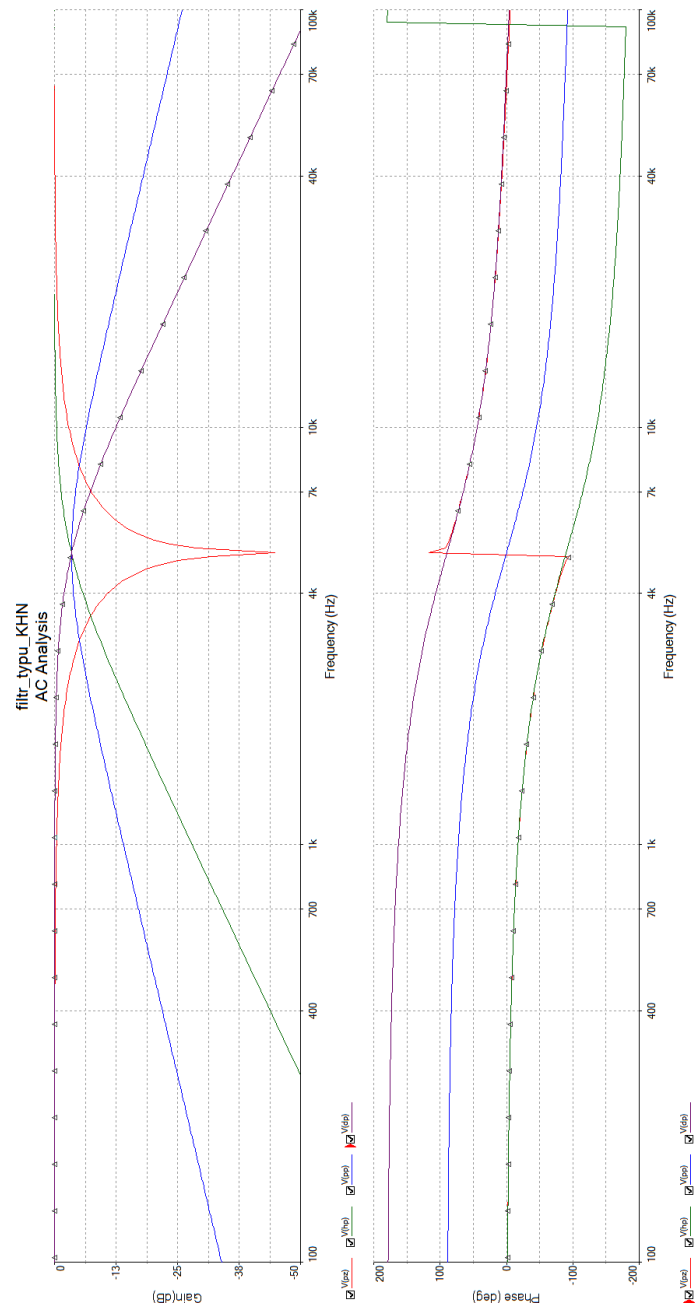
Obr. B.2: Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 2 kHz.



Obr. B.3: Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 3 kHz.

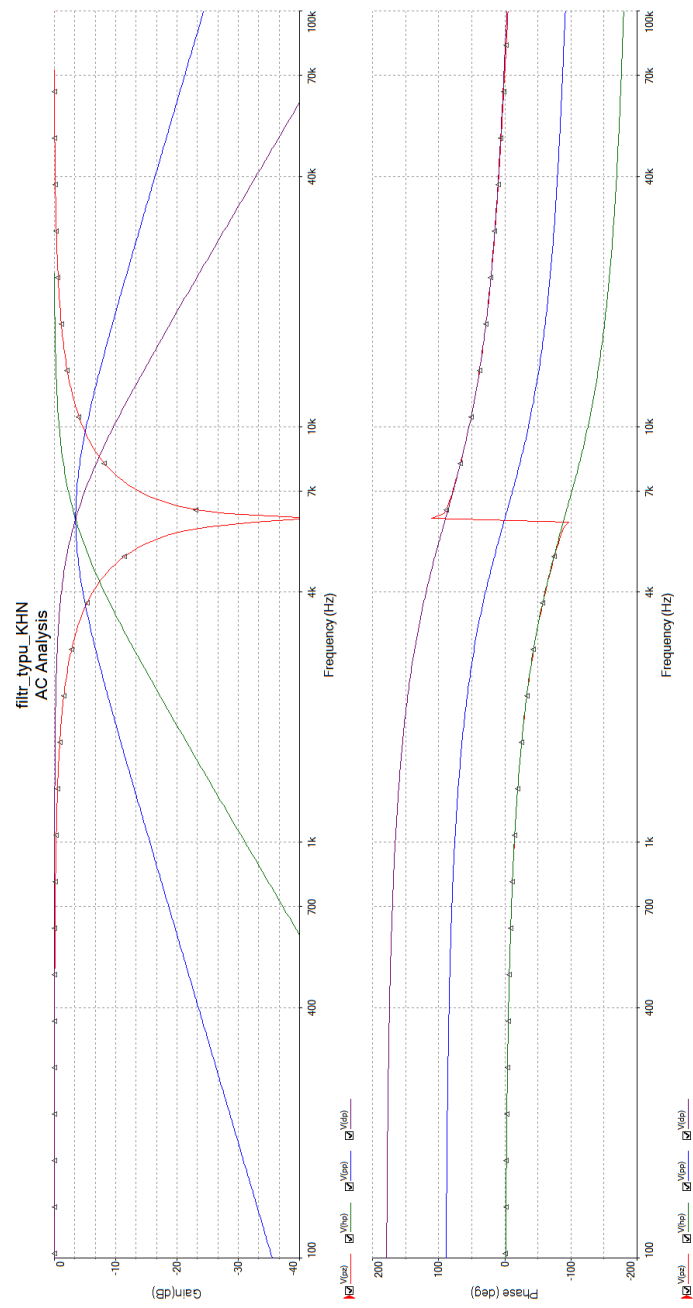


Obr. B.4: Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 4 kHz.

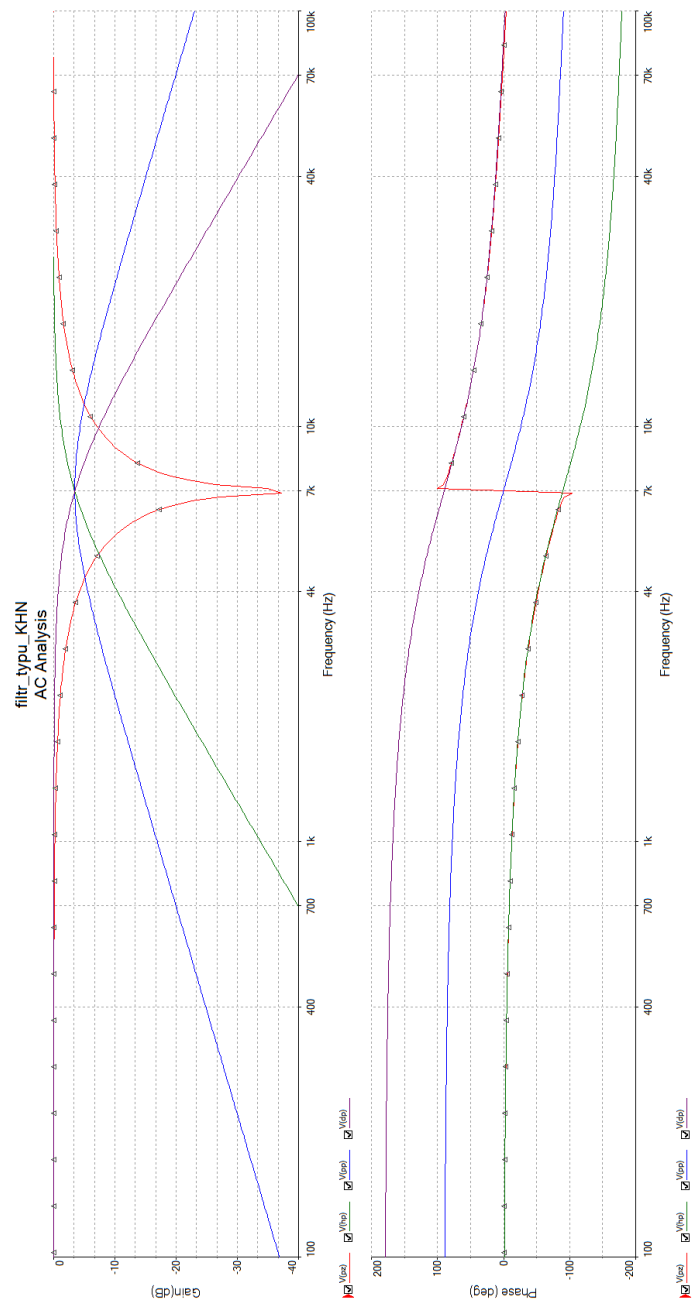


Obr. B.5: Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 5 kHz.

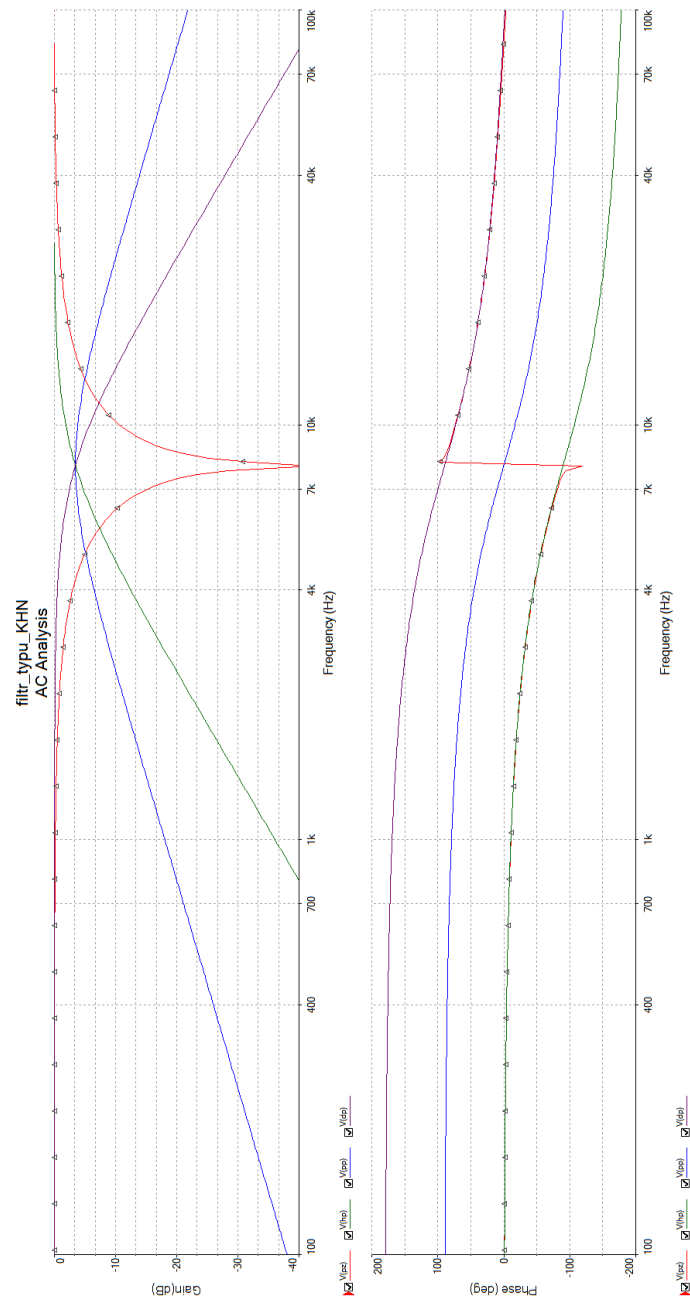




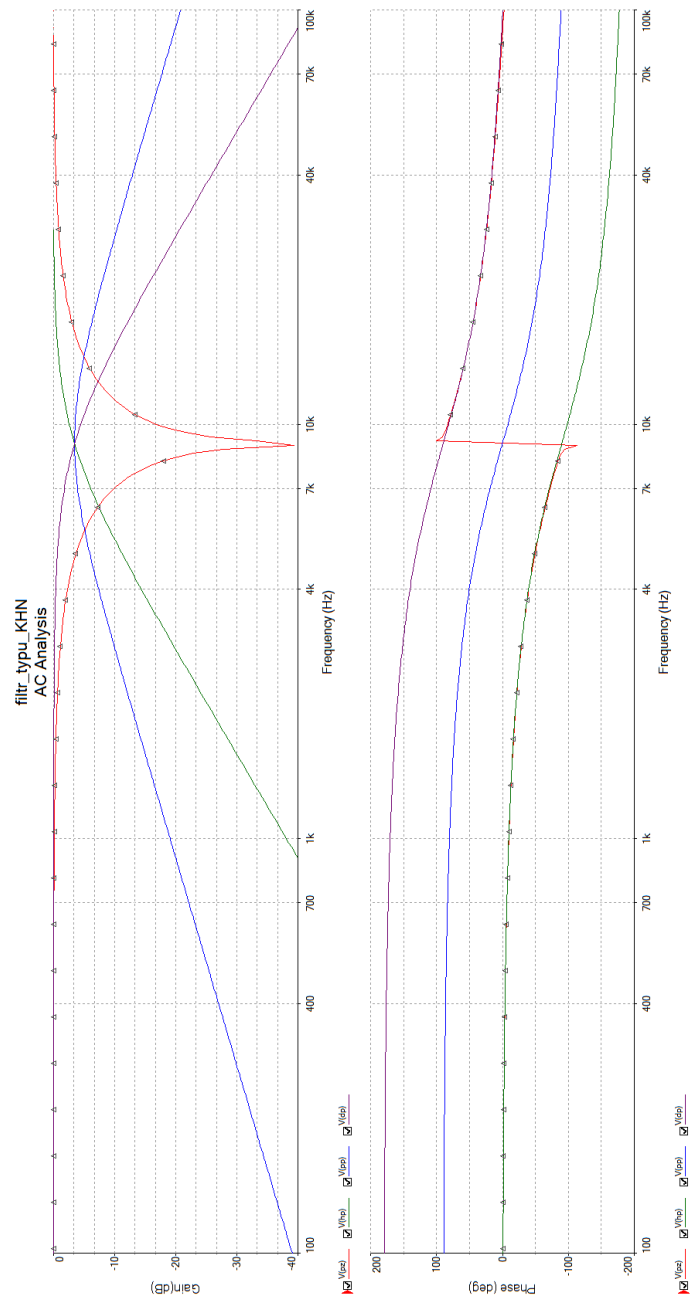
Obr. B.6: Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 6 kHz.



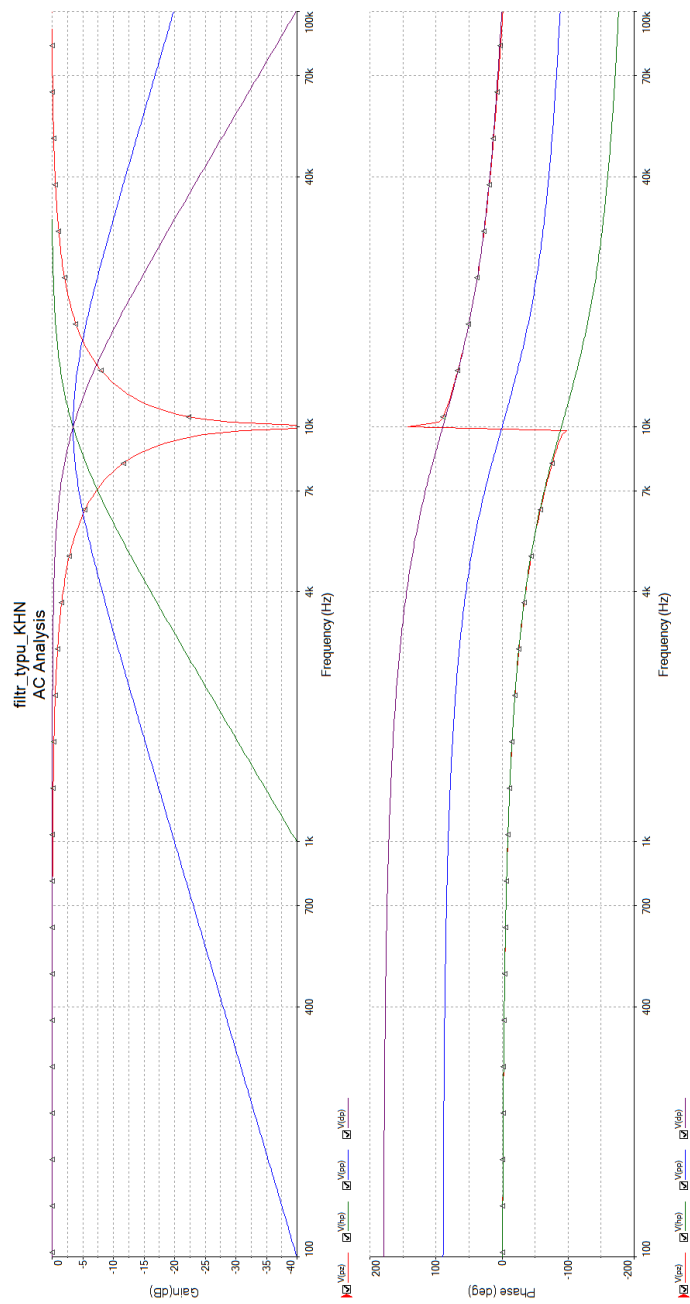
Obr. B.7: Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 7 kHz.



Obr. B.8: Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 8 kHz.



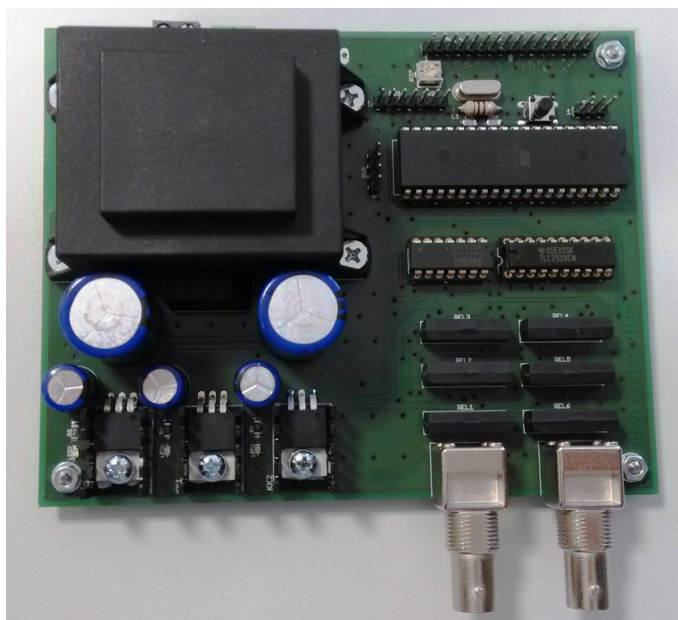
Obr. B.9: Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 9 kHz.



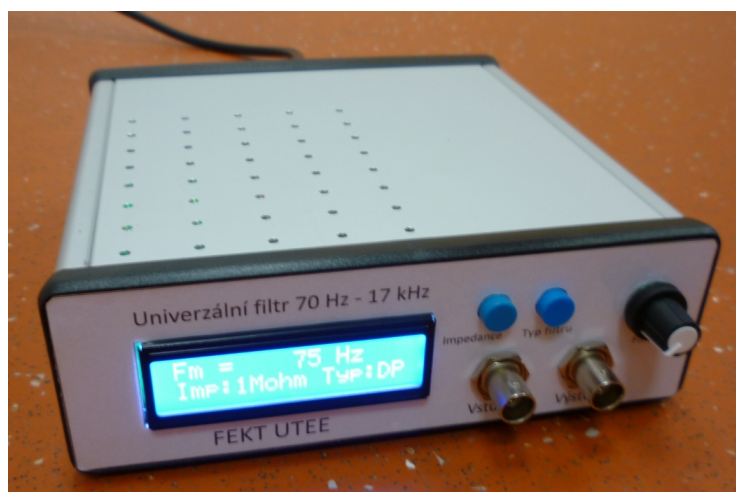
Obr. B.10: Modulová a fázová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 10 kHz.

## C OBRÁZKY A GRAFY

### C.1 Fotogalerie

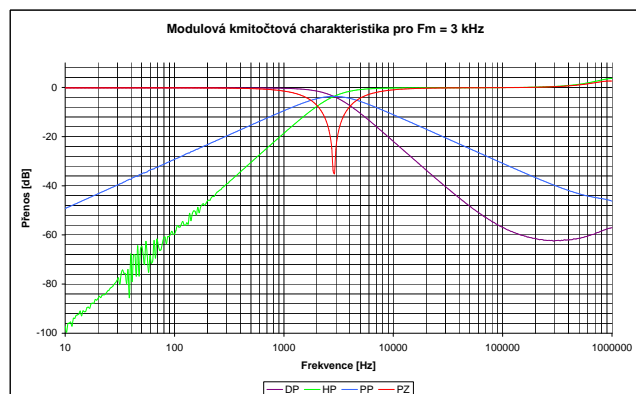


Obr. C.1: Osazená deska plošných spojů.

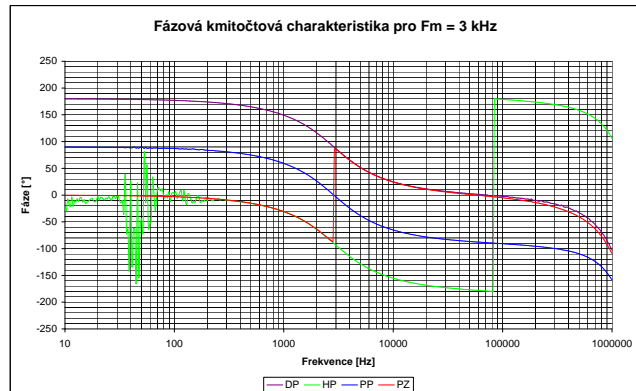


Obr. C.2: Výsledný prototyp.

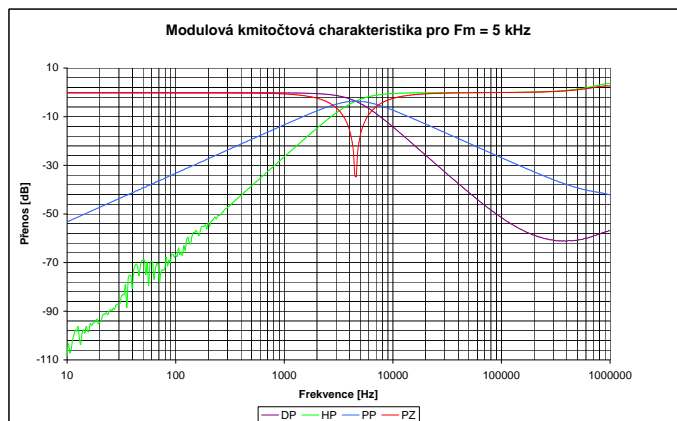
## C.2 Výsledky měření univerzálního filtru



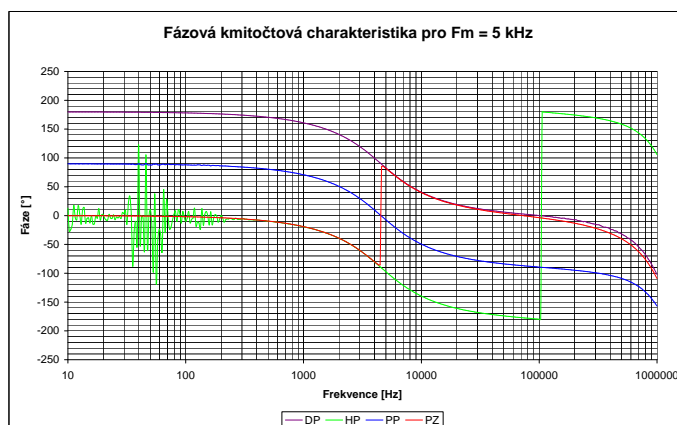
Obr. C.3: Naměřená modulová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 3 kHz.



Obr. C.4: Naměřená fázová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 3 kHz.

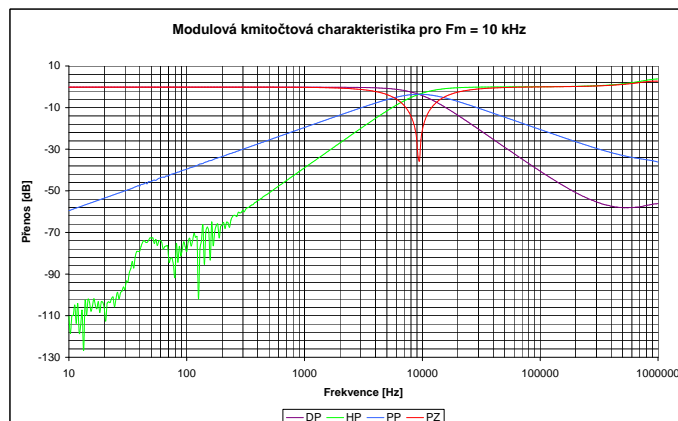


Obr. C.5: Naměřená modulová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 5 kHz.

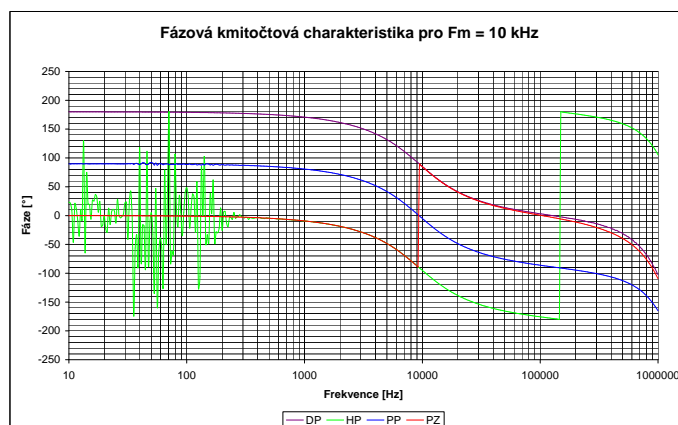


Obr. C.6: Naměřená fázová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 5 kHz.





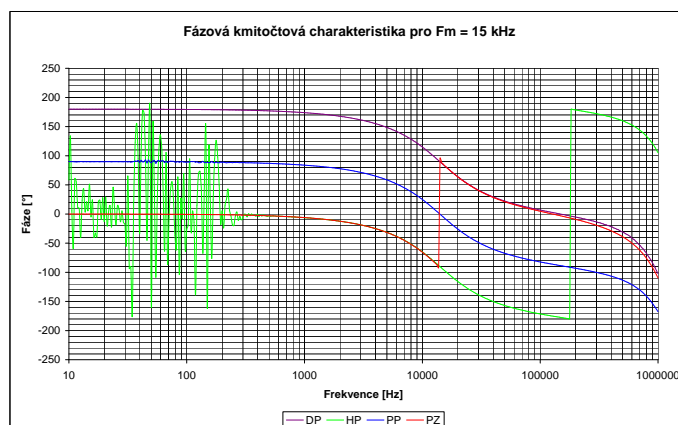
Obr. C.7: Naměřená modulová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 10 kHz.



Obr. C.8: Naměřená fázová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 10 kHz.



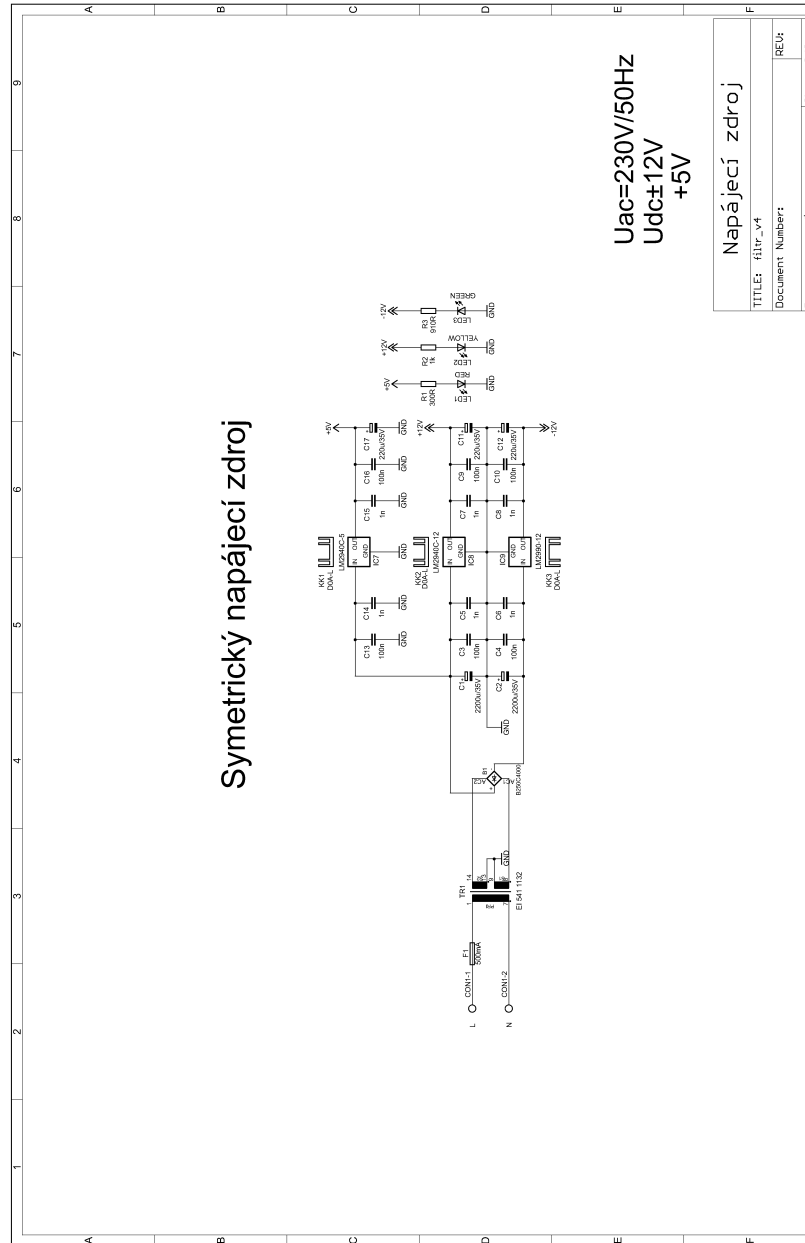
Obr. C.9: Naměřená modulová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 15 kHz.



Obr. C.10: Naměřená fázová kmitočtová charakteristika filtru s mezním kmitočtem 15 kHz.

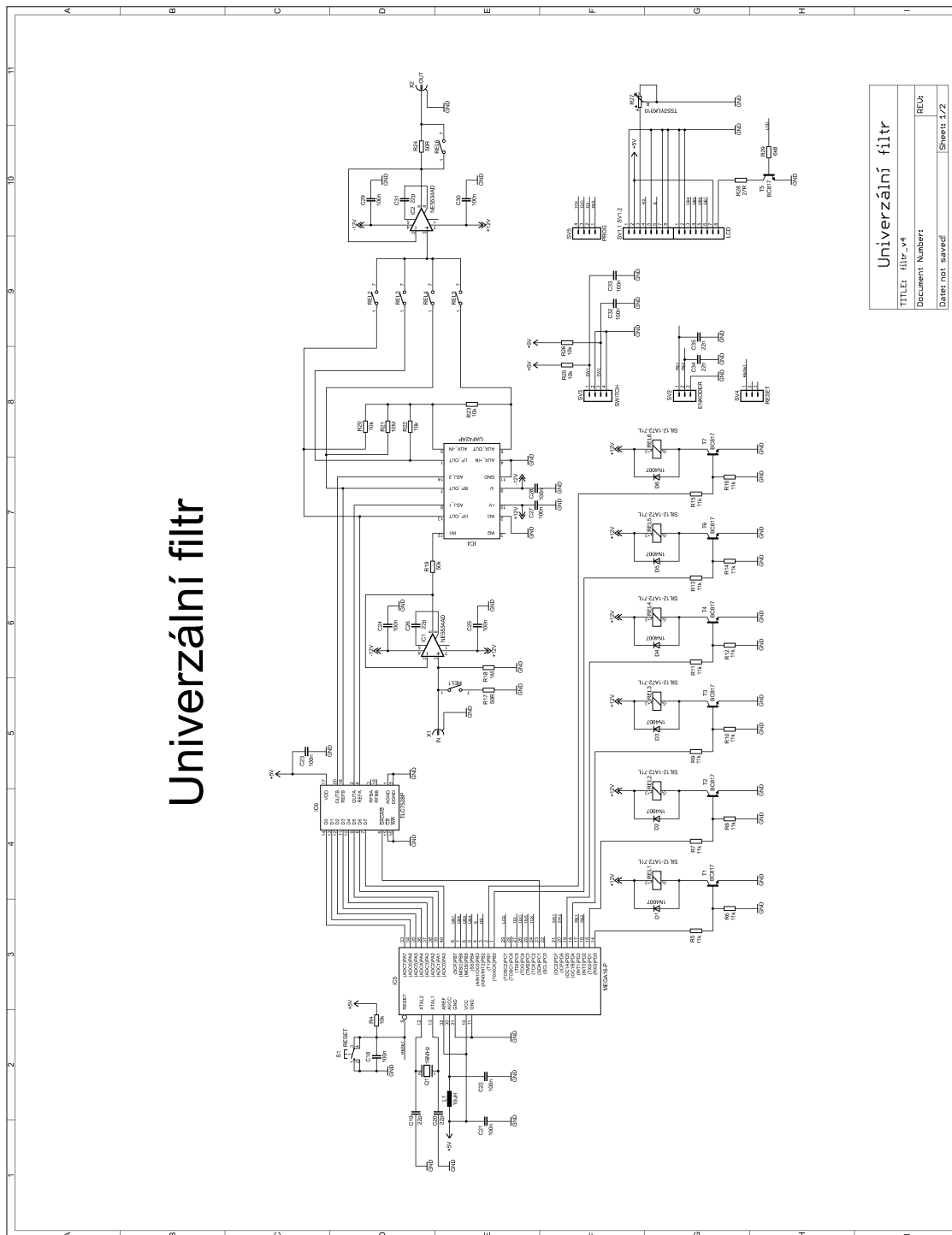
# D VÝKRESY

## D.1 Výkresy schémat



Obr. D.1: Schéma zapojení napájecí části.

# Univerzální filtr



<b>Univerzální filtr</b>	
TITLE: filtr_v4	RELU
Document Number:	Sheet 1/2
Date: not saved	

Obr. D.2: Schéma zapojení části s filtrem.

## **E OBSAH PŘILOŽENÉHO CD-ROM**

Na přiloženém médiu se nachází kromě elektronické verze bakalářské práce také projekt řídicího programu pro mikrokontrolér AVR napsaný ve vývojovém prostředí AVR studio 4 a projekt návrhu desek plošných spojů vytvořený v programu EAGLE.