

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra mikroelektroniky**



**Diplomová práce**

**Digitálně ovládané inteligentní ozvučení prostoru**

leden 2017

Diplomant: Petr Martinek

Vedoucí práce: Ing. Vít Záhlava, CSc.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 8. 1. 2017

.....

podpis diplomanta

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Martinek** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **392827**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**  
Studijní obor: **Elektronika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Digitálně ovládané inteligentní ozvučení prostoru**

Název diplomové práce anglicky:

**Digitally Controlled Intelligent Sound System**

Pokyny pro vypracování:

1. Navrhněte inteligentní ozvučení venkovního prostoru, skládající se z obvodů úprav signálu a aktivního ozvučení.
2. Úprava audio signálu 19 pásmovým analogovým ekvalizérem, bude řízena mikroprocesorem, s možností ukládání a zpětného vyvolání jeho konfigurací.
3. Banku filtrů ekvalizéru navrhněte co nejpřesněji ke středním kmitočtům pásem, bez použití sérioparalelních kombinací stejných součástek.
4. Aktivní ozvučení realizujte akumulátorově napájeným zesilovačem.
5. Zesilovač optimalizujte na účinnost, úsporu elektrické energie a hmotnost.

Seznam doporučené literatury:

1. Self Douglas: Small Signal Audio Design, Focal Press, Burlington 2013
2. Vobecký J., Záhlava V.: Elektronika - součástky a obvody, principy a příklady, Třetí rozšířené vydání, Grada Publishing, Praha 2005
3. Záhlava, V. : Návrh a konstrukce desek plošných spojů, BEN, Praha 2011
4. Katalogové a aplikační listy příslušných elektronických součástek

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

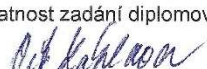
**Ing. Vít Záhlava CSc., katedra mikroelektroniky FEL**


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **08.09.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: **28.02.2019**

  
Podpis vedoucí(ho) práce


  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

**8.7.2018**  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta



## **Anotace**

V diplomové práci je popsán vývoj elektroniky komplexního audio zařízení ozvučení, vybaveného externím 19 pásmovým analogovým ekvalizérem, který je ovládán digitálně pomocí optočlenů s fotorezistory nahrazující potenciometry. Inovací práce je návrh vlastní metody efektivního výběru součástek z řady, která řádově zvyšuje přesnost návrhu banky filtrů ekvalizéru. Zařízení dále obsahuje předzesilovač se zkreslujícím efektem, zesilovač ve třídě D a nabíječku.

### **Klíčová slova:**

Ekvalizér, zesilovač ve třídě D, banka filtrů, zkreslující efekt

## **Summary**

The diploma thesis describes the development of the electronics of a complex audio equipment equipped with an external 19-band analogue equalizer, which is digitally controlled by means of opto-couplers with photoresistors replacing the potentiometers. Innovating work is the design of a customized method of efficient component selection from a series that increases the accuracy of the design of the filter bank of the equalizer. The device also includes a pre-amplifier with a distorting effect, a D class amplifier and a charger.

### **Index terms:**

Equalizer, D class amplifier, filter bank, distortion effect

# Obsah

1 Úvod.....	- 4 -
1.1 Úkol ekvalizéru v hudbě .....	- 4 -
1.2 Úloha zesilovače v hudbě .....	- 4 -
2 Typy ekvalizérů.....	- 5 -
2.1 Digitální ekvalizér .....	- 5 -
2.2 Analogový ekvalizér .....	- 5 -
2.3 Parametrický ekvalizér .....	- 5 -
2.4 Grafický ekvalizér .....	- 6 -
3 Návrh 19 pásmového grafického ekvalizéru.....	- 6 -
3.1 Návrh banky filtrů.....	- 6 -
3.1.1 Rozdělení pásem filtrů do akustického spektra.....	- 6 -
3.1.2 Filtr Multiple Feedback Bandpass Filter .....	- 7 -
3.2 Možnosti výpočtu hodnot součástek pro standardní řady.....	- 9 -
3.2.1 Metoda zaokrouhlení vypočtené hodnoty na nejbližší z řady .....	- 9 -
3.2.2 Metoda skládání součástek ze sériových a paralelních kombinací .....	- 10 -
3.2.3 Metoda použití obsáhlejší řady součástek .....	- 10 -
3.2.4 Metoda efektivního výběru součástek .....	- 10 -
3.2.5 Sumační obvod .....	- 12 -
3.2.6 Napájení.....	- 13 -
3.3 Simulace funkce ekvalizéru.....	- 14 -
3.4 Digitální ovládání analogové části ekvalizéru .....	- 16 -
3.4.1 Digitální potenciometry.....	- 16 -
3.4.2 Motorové potenciometry .....	- 17 -
3.4.3 Potenciometry vytvořené z optronů .....	- 17 -
3.4.4 Elektronika digitálního ovládání ekvalizéru.....	- 17 -
3.4.5 Mikroprocesor MSP430 .....	- 18 -

3.4.6	Zdroje proudu pro digitální potenciometry .....	- 18 -
3.4.7	Řízení zdrojů proudu .....	- 20 -
3.4.8	Klávesnice .....	- 21 -
3.4.9	Displej .....	- 21 -
3.4.10	Obslužný program .....	- 21 -
4	Ozvučení prostoru .....	- 23 -
4.1	Předzesilovač .....	- 23 -
4.1.1	Parametry vstupu .....	- 23 -
4.1.2	Zkreslený kanál .....	- 24 -
4.1.3	Obvod zkreslení Overdrive .....	- 24 -
4.1.4	Obvod zkreslení Distortion .....	- 28 -
4.1.5	Čistý kanál .....	- 29 -
4.2	Zesilovač ve třídě D .....	- 30 -
4.2.1	Výstupní filtr .....	- 30 -
4.2.2	Fázový invertor .....	- 32 -
4.3	Nabíječka .....	- 33 -
5	Vývoj plošných spojů .....	- 35 -
6	Osazování a oživení .....	- 36 -
7	Vybraná měření .....	- 36 -
7.1	Měření dynamického rozsahu, a zkreslení THD ekvalizéru .....	- 36 -
7.2	Měření přenosových charakteristik ekvalizéru .....	- 37 -
7.3	Měření na komunikaci DAC s mikroprocesorem po sběrnici I2C .....	- 41 -
7.4	Měření na audio zesilovači .....	- 41 -
8	Závěr .....	- 42 -
9	Použitá literatura .....	- 43 -
10	Přílohy .....	- 44 -

# 1 Úvod

Záměrem diplomové práce je vytvořit komplexní zařízení pro umožnění hlasitého zvukového projevu hudebního nástroje, například elektrické kytary, a to i s možností použití pro pouliční umělce. Zařízení bude obsahovat 19 pásmový ekvalizér a zesilovač s předzesilovačem, zkreslujícím hudebním efektem, nabíječkou a repro boxem.

## 1.1 Úkol ekvalizéru v hudbě

Úloha ekvalizéru spočívá v úpravě frekvenčního spektra audio signálu. Ekvalizér filtruje vstupní signál, některá frekvenční pásma zesílí, jiná může zeslabit podle nastavení uživatele. Úpravou své frekvenční charakteristiky ekvalizér pocitově změní zabarvení zvuku např. hudebního nástroje, což je umělci žádaná vlastnost. Nastavení ekvalizéru provádí hudebník podle svého vlastního hudebního cítění. Ekvalizérů existuje více druhů, vesměs platí, že čím má ekvalizér více stupňů volnosti ve své přenastavitelnosti, tím větší možnosti v nejrůznějších změnách subjektivního zabarvení zvuku skýtá.

## 1.2 Úloha zesilovače v hudbě

Úkol zesilovače je výkonově zesílit audio signál takovým způsobem, aby mohl být vyzářen do ozvučovaného prostoru reproduktorem. Zesilovačů existuje mnoho typů. První audio zesilovače byly elektronkové. Elektronkové zesilovače jsou stále oblíbené v hudebním průmyslu i přesto, že elektronky jsou již překonány tranzistorovými zesilovači. To díky jejich technické nedokonalosti – zkreslení, které stálo za vznikem zkresleného zvuku elektrické kytary. Toto zkreslení je možné napodobit i speciálním zapojením křemíkových součástek nazývaným obvod Overdrive.



## 2 Typy ekvalizérů

### 2.1 Digitální ekvalizér

Digitální ekvalizér je v dnešní době stále více používaný typ, který na trhu postupně vytlačuje analogové ekvalizéry. Ekvalizace je po převedení AD převodníkem prováděna číslicově například na signálovém procesoru a následně je signál převeden zpět do analogové formy DA převodníkem.

Výhody jsou v použití číslicové filtrace, složitější signálové filtry se lépe nastavují a přeladují v číslicové formě, než ve formě analogové. Výhodou skýtá též méně použitých diskrétních součástek, které nahradí jeden digitální čip. Zpracování signálu probíhá digitálně, tedy není náchylné na analogové rušení, šum a zkreslení způsobené nelinearitami analogových součástek. Nevýhodou je latence, tedy zpoždění signálu mezi vstupem a výstupem ekvalizéru způsobené např. ukládáním segmentů signálu do paměti před provedením výpočtu po blocích a zpožděním a chybami AD a DA převodu.

### 2.2 Analogový ekvalizér

Celý proces ekvalizace je prováděn analogovými filtry. Výhodou je nulová latence mezi vstupem a výstupem. Velmi nízkou latenci požadují hudebníci při na zvučení svého nástroje. Nevýhodou je mnoho součástek na desce plošných spojů. Nevýhodou mohou být rovněž rušivé šumy a zkreslení, tyto nevýhody však lze minimalizovat správným návrhem.

### 2.3 Parametrický ekvalizér

Tento typ ekvalizéru obsahuje přeladitelné filtry, u kterých lze nastavit střední kmitočet, stupeň potlačení nebo zesílení středního kmitočtu, činitel jakosti. Parametrický ekvalizér může být použit například pro odstranění úzkopásmového šumu.

## 2.4 Grafický ekvalizér

Grafický ekvalizér obsahuje banku filtrů, která má střední kmitočty za sebou naladěny v akustickém pásmu. Činitel jakosti nebývá uživatelem nastavitelný. Grafický ekvalizér se uplatňuje v mixážích pultech nebo třeba jako hudební efekt. Bývá ovládán tahovými potenciometry, každý potenciometr je určen pro nastavování zesilování nebo potlačování daného pásma, střední poloha potenciometru 0 dB charakterizuje nezměněný přenos. Polohy potenciometrů kopírují frekvenční charakteristiku ekvalizéru.

## 3 Návrh 19 pásmového grafického ekvalizéru

### 3.1 Návrh banky filtrů

#### 3.1.1 Rozdělení pásem filtrů do akustického spektra

Pro ekvalizér jsem zvolil 19 pásem, jako kompromis mezi počtem součástí, tedy jeho složitostí a potřebným krokem, se kterým bude možno měnit frekvenční charakteristiku.

Pásma jsou rozdělena po oktávách, v každé oktávě jsou dvě pásma. Posun o oktávu je posun o dvojnásobnou frekvenci, to znamená, že se propustná šířka pásma filtrů směrem k vyšším frekvencím zvyšuje.

Výpočet středních kmitočtů banky filtrů se řídí následujícím vztahem:

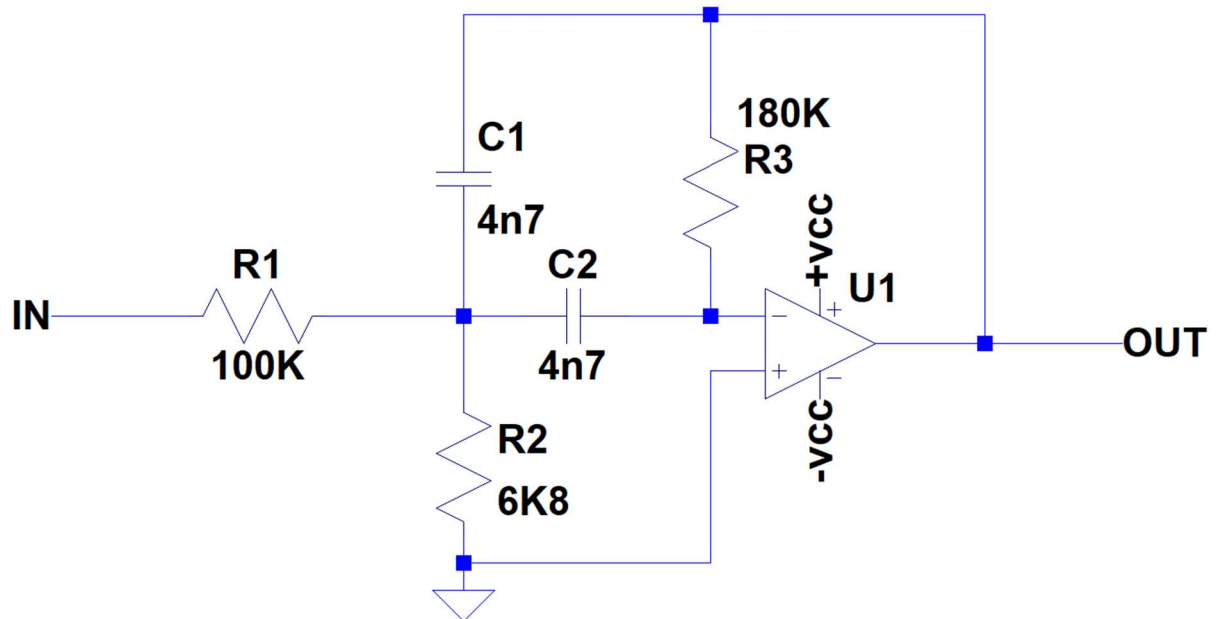
$$f_{n+1} = f_n \cdot 2^{1/2} \quad (1.1)$$

Příklad výpočtu středního kmitočtu 12. pásma vztaženému k 1 KHz

$$f_{n+1} = f_n \cdot 2^{1/2} = 1000 \cdot 2^{1/2} = 1414,21 \quad (1.2)$$

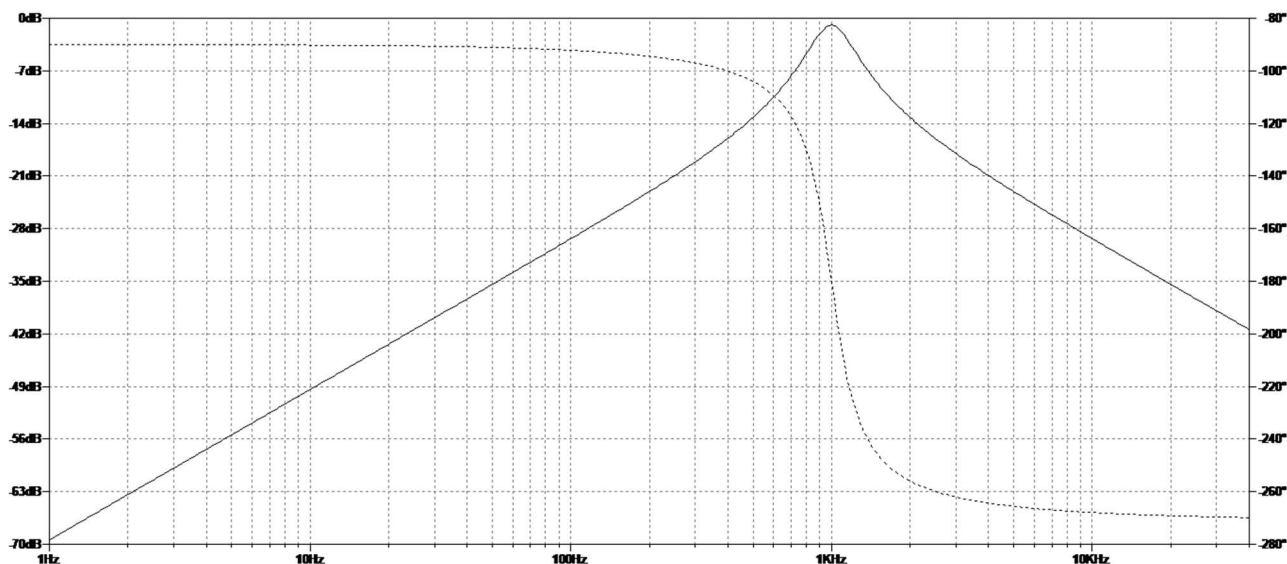
### 3.1.2 Filtr Multiple Feedback Bandpass Filter

Pro jednotlivé filtry jsem zvolil filtr pásmová propust typu Multiple Feedback Bandpass Filter [6]. Na obr. 1 je schéma tohoto filtru. Jedná se o filtr 2 řádu. Na obrázku 1. je filtr z banky pro kmitočet  $f_0 = 1$  KHz, hodnoty všech součástek jsou z řady E24.



Obr. 1 Filtr 1 KHz

Na obr. 2 je frekvenční a fázová charakteristika výše popsaného filtru 1 KHz.



Obr. 2 frekvenční a fázová charakteristika filtru

Tedy pro konstrukci jsem navrhnul banku těchto filtrů o 19 pásmech. Pro filtry byl zvolen činitel jakosti:

$$Q = \frac{f_0}{B} = \frac{f_0}{f_h - f_d} = 2,87 \quad (2.1)$$

Výpočet hodnot součástek do jednotlivých filtrů se řídí vzorci:

$$R_1 = \frac{Q}{G 2 \pi f C} \quad (2.2)$$

$$R_2 = \frac{Q}{(2 Q^2 - G) 2 \pi f C} \quad (2.3)$$

$$R_3 = \frac{Q}{\pi f C} \quad (2.4)$$

$$G = \frac{R_3}{2 R_1} \quad (2.5)$$

$$f_0 = \frac{1}{2 \pi C} \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3}} \quad (2.6)$$

Kondenzátory ve filtru C1 a C2 jsou stejné hodnoty.

## 3.2 Možnosti výpočtu hodnot součástek pro standardní řady

Při použití výše uvedených vzorců vychází hodnoty součástek k jednotlivým filtrům jako dlouhá desetinná čísla. Je ale potřeba vybrat hodnoty z řady E24, které se běžně vyrábějí. Tímto výběrem se vytváří chyba, protože řada E24 obsahuje pouze 24 hodnot na dekádu. V kapitole proto jsou podrobněji popsány používané metody výběru reálných hodnot součástek z vyráběných řad, včetně uvedení jejich výhod a nevýhod. Je uvedena rovněž navržená metoda výpočtu.

### 3.2.1 Metoda zaokrouhlení vypočtené hodnoty na nejbližší z řady

Tato metoda jednoduše pouze zaokrouhlí vypočtené výsledky ze vzorců na nejbližší hodnoty z vyráběné řady, v našem případě řady E24. Metoda se používá v některých konstrukcích ekvalizéru [1]. V následující tabulce je příklad této metody aplikované na banku filtrů.

Pásmo	Vypočtená $f_{0V}$	Reálná $f_{0R}$	Chyba $f_{0R} - f_{0V}$	C1, C2	R1	R2	R3	Q
1	31,25	31,78	0,53	0.1 u	130K	10K	270K	2,69
2	44,19	44,29	0,09	0.1 u	110K	6K2	220K	3,06
3	62,5	64,08	1,58	0.1 u	68K	5K1	130K	2,61
4	88,38	82,5	-5,87	0.1 u	56K	3K6	110K	2,85
5	125	122,71	-2,28	33n	120K	6K8	240K	3,05
6	176,77	186,77	9,99	33n	82K	4K7	150K	2,9
7	250	250,07	0,07	33n	51K	3K3	120K	3,11
8	353,55	334,14	-19,4	33n	43K	2K7	820K	2,84
9	500	547,95	47,95	33n	30K	1K6	510K	2,89
10	707,1	693,41	-13,68	33n	18K	1K2	430K	3,09
11	1000	998,61	-1,38	33n	15K	820	30K	3,1
12	1414,21	1444,8	30,58	22n	13K	1K	27K	2,69
13	2000	2013,24	13,24	22n	11K	620	22K	3,06
14	2828,42	2913,02	84,6	22n	6K8	510	13K	2,61
15	4000	3750,41	249,58	22n	5K6	360	11K	2,85
16	5656,85	5196,68	460,16	1n	7K5	5K6	180K	2,93
17	8000	7584,79	-415,2	1n	62K	3K9	120K	2,85
18	11313,7	12131,04	817,33	1n	24K	1K6	51K	2,91
19	16000	16060,1	60,1	1n	18K	1K3	36K	2,72

Pokud je použita tato metoda, dopouštíme se velké chyby v nastavení středních kmitočtů banky filtrů.

### **3.2.2 Metoda skládání součástek ze sériových a paralelních kombinací**

Po výpočtu teoretických ideálních hodnot součástek pomocí vzorců jsou výsledné hodnoty součástek sestaveny ze sériových nebo paralelních kombinací součástek. Takto může být dosaženo vysoké přesnosti, ale za cenu zvýšení počtu součástek, tedy ceny, místa na desce plošných spojů a složitosti, což považuji za značnou nevýhodu. Tato metoda se používá v některých konstrukcích ekvalizérů [1].

### **3.2.3 Metoda použití obsáhlejší řady součástek**

Dále je možné použít některou z obsáhlejších řad součástek E48, E96, E192 v kombinaci třeba se zaokrouhlováním, nebo součástkami vyrobenými přesně na zakázku. Čím více hodnot součástek řada obsahuje, tím větší je možnost výběru vhodných hodnot pro dosažení vyšší přesnosti. Nevýhoda této metody spočívá v tom, že se musí použít vyšší řady součástek, které se jsou nestandardní a ve výrobě málo používané, tudíž výroba bude dražší.

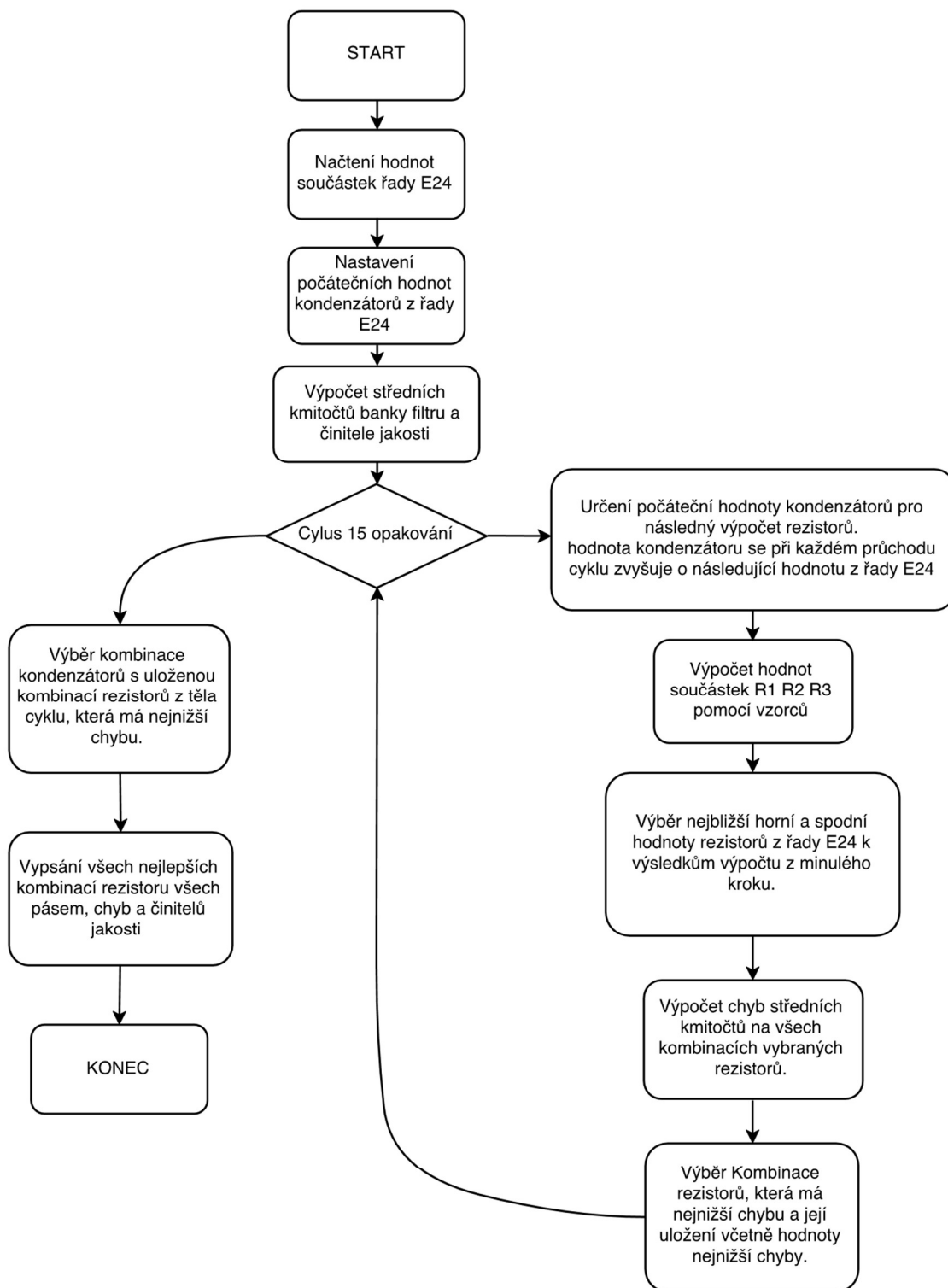
### **3.2.4 Metoda efektivního výběru součástek**

Protože jsem chtěl dosáhnout vysoké přesnosti nastavení středních kmitočtů a zároveň jsem nechtěl používat serioparalelní kombinace součástek nebo nestandardní řady, navrhl jsem vlastní metodu.

Její princip spočívá v efektivním výběru součástek takovým způsobem, aby se chyby způsobené zaokrouhlováním jednotlivých součástek obvodu ve výsledné funkci obvodu navzájem odečetly.

Postup výpočtu jsem navrhoval v prostředí Matlab,

Na obr. 3 je blokové schéma, které objasňuje princip výpočtu v jednotlivých krocích.



Obr. 3 blokové schéma postupu výpočtu pomocí Metody efektivního výběru součástek

Hodnoty součástí, středních kmitočtů banky filtrů a jejich chyb při aplikaci metody efektivního výběru součástí při použití řady E24 jsou v následující tabulce.

Pásmo	Vypočtená $f_{0V}$	Reálná $f_{0R}$	Chyba $f_{0R} - f_{0V}$	C1, C2	R1	R2	R3	Q
1	31,25	31,31	0,06	470n	33K	2K	62K	2,87
2	44,19	44,24	0,05	150n	75K	4K7	130K	2,87
3	62,50	62,53	0,03	68n	100K	6K8	220K	2,87
4	88,38	88,35	-0,03	82n	62K	4K3	120K	2,86
5	125,00	125,04	0,04	150n	24K	1K5	51K	2,87
6	176,77	176,55	-0,21	220n	11K	820	22K	2,86
7	250,00	250,02	0,02	33n	56K	3K6	110K	2,87
8	353,55	353,34	-0,20	68n	18K	1K2	39K	2,86
9	500,00	501,22	1,22	22n	43K	2K7	82K	2,87
10	707,10	707,26	0,15	22n	27K	1K8	62K	2,87
11	1000,00	1000,26	0,26	4n7	100K	6K8	180K	2,87
12	1414,21	1414,65	0,44	5n6	62K	3K9	110K	2,87
13	2000,00	2000,70	0,70	15n	15K	1K	30K	2,87
14	2828,42	2827,42	-1,00	3n9	43K	2K7	82K	2,86
15	4000,00	4001,64	1,64	6n8	18K	1K1	33K	2,87
16	5656,85	5648,90	-7,94	5n6	15K	1K	27K	2,86
17	8000,00	8002,96	2,96	3n	20K	1K3	36K	2,87
18	11313,70	11332,05	18,32	2n2	20K	1K2	36K	2,87
19	16000,00	16005,92	5,92	1n5	20K	1K3	36K	2,87

Navržená metoda efektivního výběru součástí odstraňuje některé popsání nevýhody předešlých metod. Při použití standardní řady E24 bez skládání sériových a paralelních součástí poskytuje vysokou přesnost.

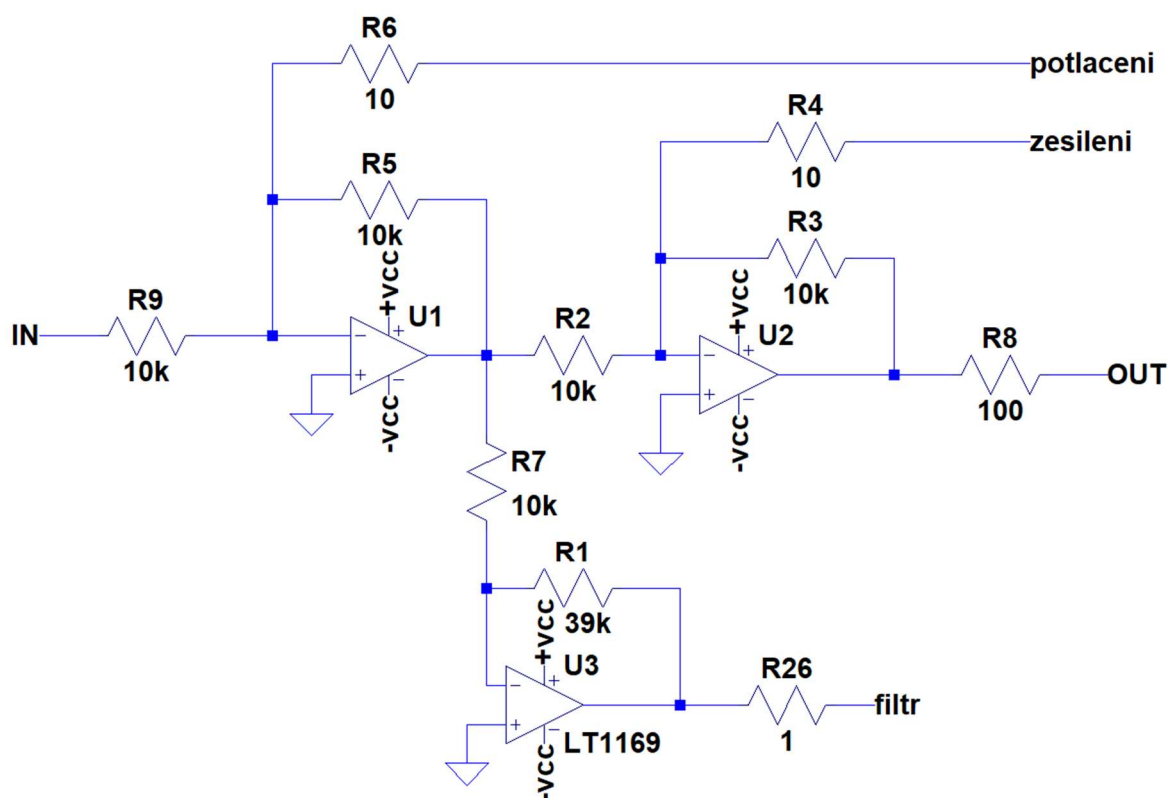
### 3.2.5 Sumační obvod

Sumační obvod, který je na obr. 4, má za úkol sčítat a odčítat jednotlivé příspěvky signálů od všech paralelně zapojených filtrů, tedy z celé banky. Na obrázku jsou 3 operační zesilovače. Zesilovače U1 a U2 jsou zapojeny jako sumační. Sumační zesilovače jsou k sobě sériově propojeny, tedy výstup zesilovače U1 je zapojen na vstup zesilovače U2. Zesilovače jsou invertující, to znamená, že otáčejí fázi o 180°. Otočení fáze v protifázi a sečení znamená ve výsledku odečtení. Tímto způsobem zapojení jsem získal dva vstupy, první „potlacení“, který je se znaménkem – a druhý „zesilení“ se znaménkem +.



Zesilovač U3 je výstupní zesilovač, ze kterého jde signál do banky filtrů.

Toto zapojení [5] jsem vybral hlavně kvůli jeho dobrým šumovým vlastnostem. Každý filtr v bance generuje nějaký vlastní šum. Pokud jsou potenciometry ve střední poloze, tedy příspěvek „potlacení“ a „zesilení“ je roven, tyto příspěvky se odečtou, tímto se odečte nekorelovaný šum z banky a ten proto nepronikne na výstup. V celém zařízení používám precizní audio operační zesilovače OPA1664AIDR [18].

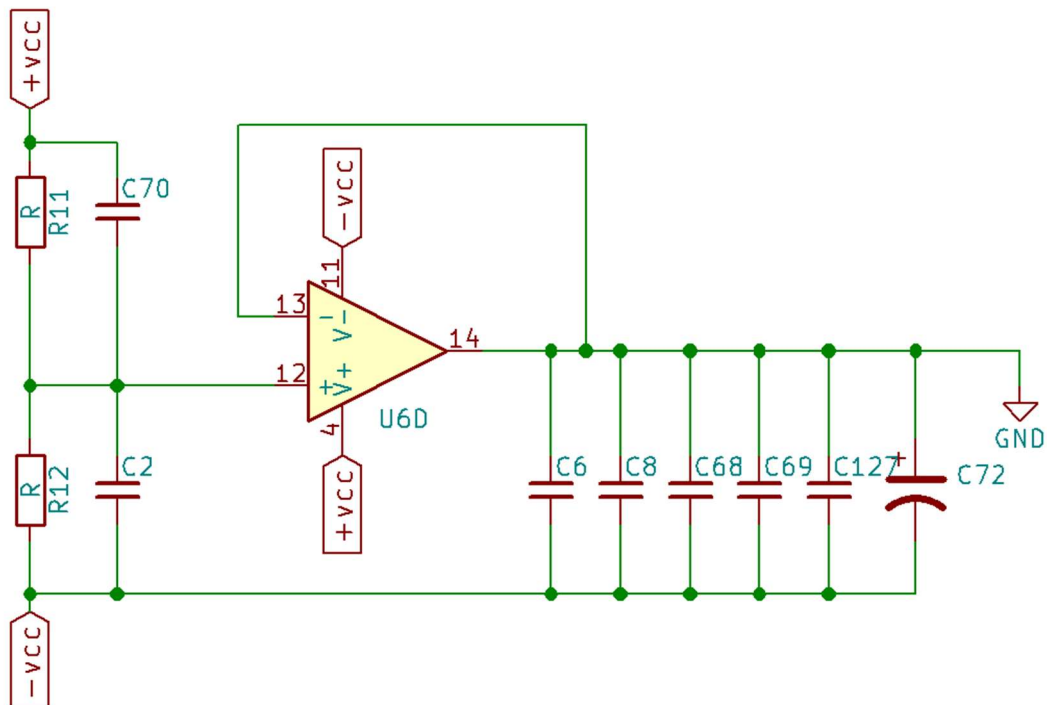


Obr. 4 Obvod sumačního zesilovače [5]

### 3.2.6 Napájení

Pro napájení operačních zesilovačů analogové části ekvalizéru je potřeba symetrické napájení. Protože je ekvalizér napájen z nesymetrického zdroje napětí, je potřeba symetrické napájení vytvořit.

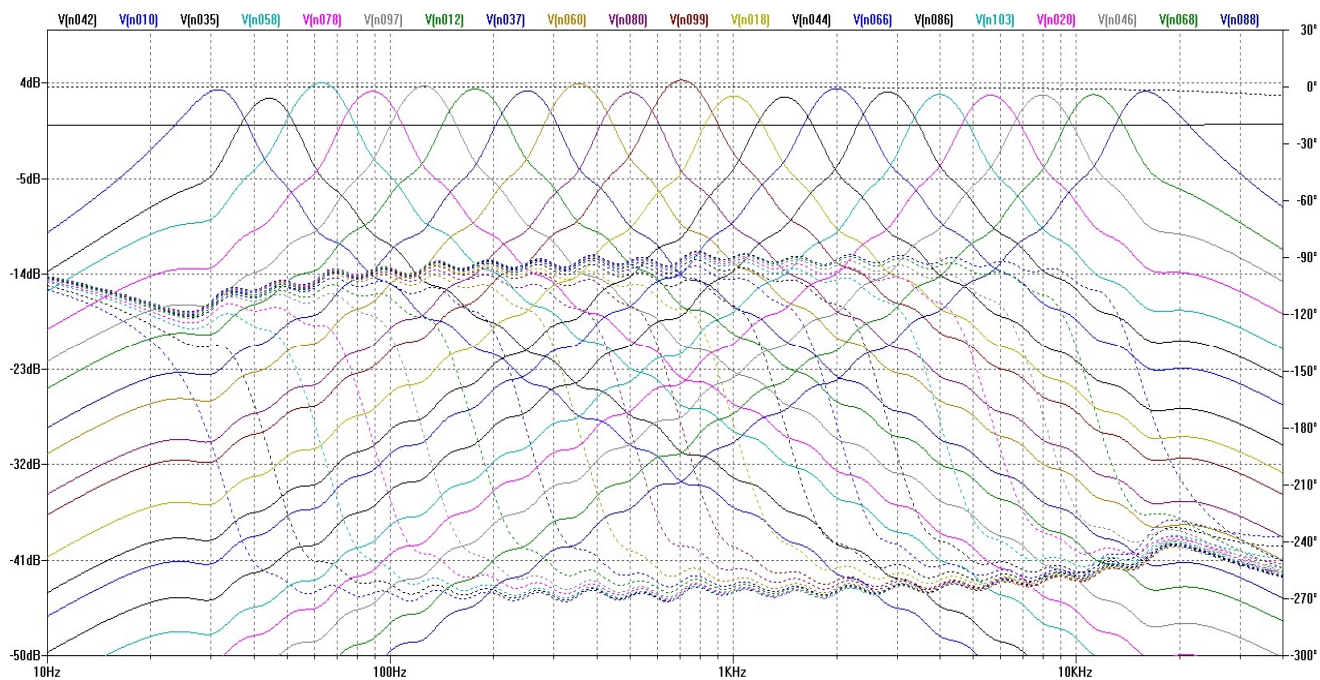
Symetrické napájení jsem vytvořil přidáním napětového potenciálu v polovině napájecího napětí pomocí souměrného napětového děliče, který je proudově posílen operačním zesilovačem zapojeným, jako sledovač. Symetrické napájení je filtrováno blokovacími kondenzátory.



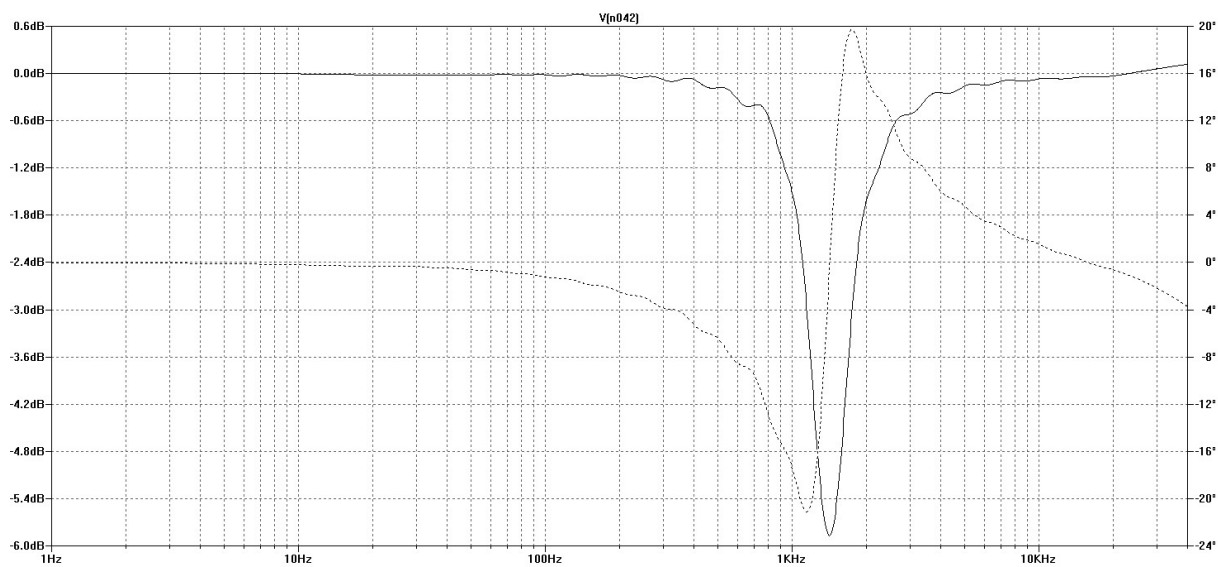
Obr. 5 Obvod symetrického napájení

### 3.3 Simulace funkce ekvalizéru

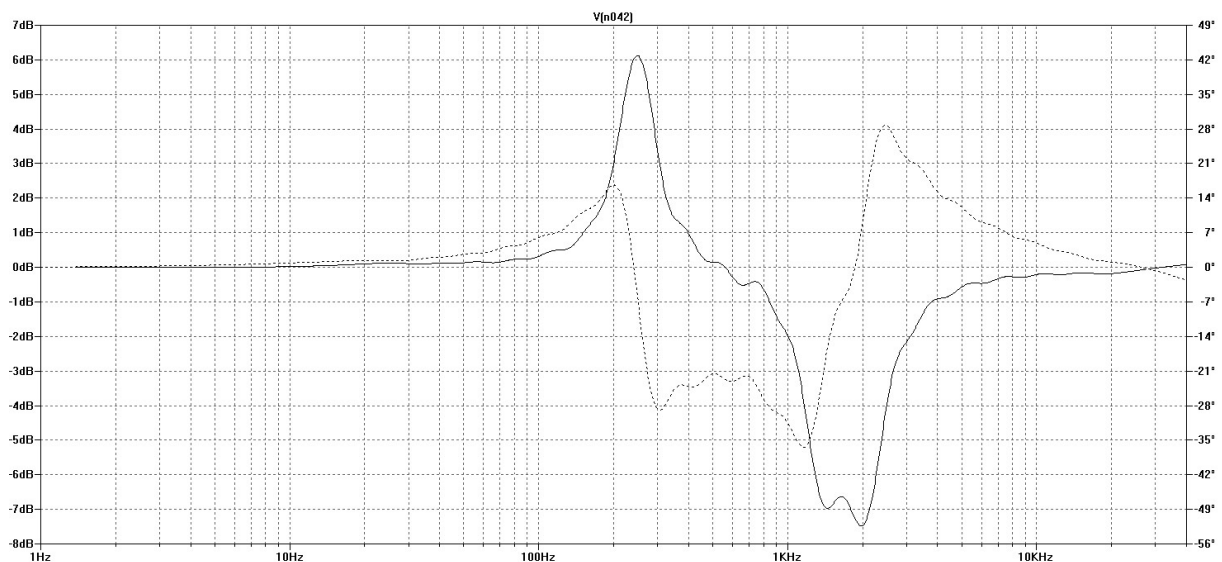
Pro ověření funkce jsem provedl simulaci ekvalizéru v programu LTSpice [7]. Přenosové charakteristiky pro některá vybraná nastavená jsou na následujících obrázcích.



Obr. 6 Přenosy všech filtrů banky



Obr. 7 Frekvenční charakteristika při přenosu filtru 1414 KHz - 6 dB



Obr. 8 Frekvenční charakteristika při přenosu filtrů 1414 Hz – 6 dB, 2000 Hz – 6 dB, 250 Hz 6 dB

Přenosové charakteristiky odpovídají očekávání, včetně chyb způsobených výběrem reálných součástek. Při návrhu byla snaha tyto chyby minimalizovat, a to se povedlo. Přenosové charakteristiky jednotlivých filtrů v bance se navzájem mírně ovlivňují, vychází to z použité topologie se sumačními zesilovači. Mírné ovlivňování filtrů navzájem není na závadu.

### 3.4 Digitální ovládání analogové části ekvalizéru

Navržený ekvalizér může být ovládán 19 analogovými potenciometry ale výhodnější je možnost ovládat ekvalizér digitálně. Digitální ovládání přináší výhody, jako možnost ukládat si nastavení ekvalizéru do paměti a poté jej z paměti vyvolat a bleskově změnit nastavení ekvalizéru třeba i na nastavením dálku po sběrnici.

Bylo nezbytné vyřešit problém digitálního ovládání odporu potenciometrů ekvalizéru.

Možností, jak toto provést je více, tyto možnosti jsem prozkoumal.

#### 3.4.1 Digitální potenciometry

Použití digitálních potenciometrů [8] je jedno z řešení. Digitální potenciometr je na čipu vyrobená struktura, skládající se z velkého počtu rezistorů, spínačů a ovládající logiky. Rezistory se spínači připojují k výstupům takovým způsobem, aby ve výsledku daly požadovanou hodnotu odporu, přičemž hodnota odporu se většinou řídí 8 bitovým číslem. Digitální potenciometry mají

většinou napájení jen 5 V. Nevýhoda digitálních potenciometrů může v audio aplikacích spočívat tom, že při změně odporu potenciometru se hodnota odporu mění po skocích podle toho, jak elektronické spínače na bázi tranzistorů MOSFET spínají. Skoková změna odporu vytváří v pocházejícím signálu digitálním potenciometrem nežádoucí skoky, které se projeví nepříjemným lupáním ve zvuku.

### 3.4.2 Motorové potenciometry

Motorové potenciometry jsou klasické potenciometry, kterými pohybuje motor. Tyto potenciometry nacházejí uplatnění například v mixážích pultech. Jejich cena je ale vysoká [9].

### 3.4.3 Potenciometry vytvořené z optronů

Pro svoji aplikaci ekvalizéru jsem se rozhodl použít potenciometry vytvořené z fotorezistoru a LED diody. Tyto potenciometry jsem si zhotovil stažením fotorezistoru a LED diody pomocí černé smršťovací bužírky.

V podstatě se jedná o galvanicky oddělený proudem řízený odpor. Jas led diody je řízen proudem, kdy LED dioda osvětluje fotorezistor a, tím mění jeho odpor. Optron je na obr. 9.



Obr. 9 Optron

### 3.4.4 Elektronika digitálního ovládání ekvalizéru

V následujících podkapitolách je popsána funkce a vývoj elektroniky digitálního ovládání ekvalizéru.

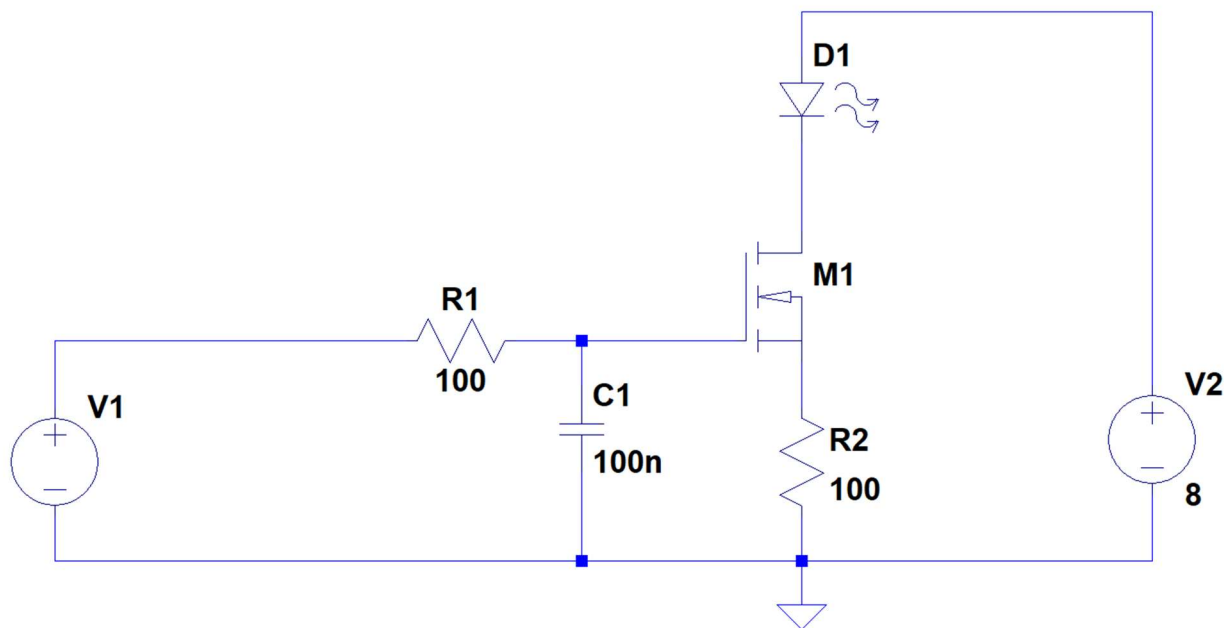
### 3.4.5 Mikroprocesor MSP430

Pro logické řízení ovládání ekvalizéru jsem vybral mikroprocesor MSP430FR4133 [12]. Jedná se o nízkopříjmový 16 bitový mikroprocesor v 64 pinovém pouzdře. Hodinový kmitočet procesoru může být generován interními oscilátory, nebo externím krystalem. Pro svoji aplikaci nepotřebuji nijak vysokou přesnost hodin, proto používám interní oscilátor. Tím, že jsem nepoužil krystal, uvolnili se mi dva piny vstupně výstupní brány, které cíleně využívám. V aplikaci využívám všechny piny procesoru. Mikroprocesor programuji pomocí rozhraní eZ-FET, které se nachází na většině vývojových desek k MSP430 a umožňuje debugování firmware pomocí možnosti krokování a čtení obsahu registrů a paměti. Napájení mikroprocesoru jsem zvolil pomocí stabilizátoru napětí 3,3 V.

### 3.4.6 Zdroje proudu pro digitální potenciometry

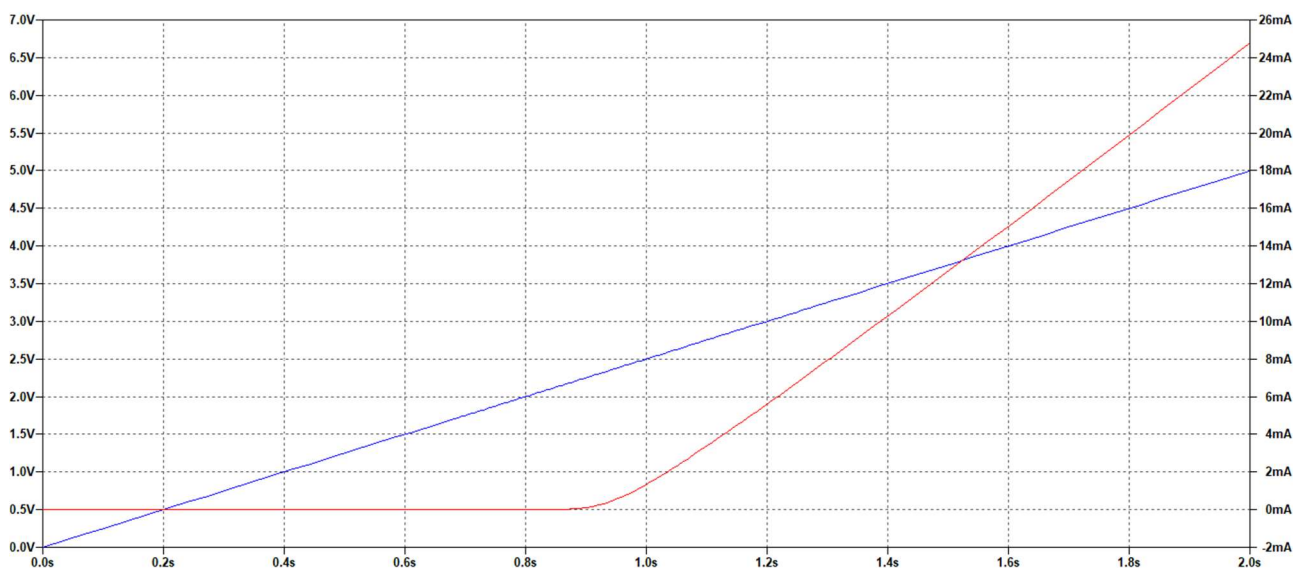
Jako zdroje proudu pro digitální potenciometry jsem navrhl obvod, který funguje zároveň jako zdroj proudu pro LED diodu a zároveň jako analogová paměť, která si po nějakou dobu dokáže nastavený proud zapamatovat a držet ho konstantní. Obvod je na obrázku 9.

Obvod je tvořen NMOS tranzistorem, který je zapojen, jako převodník napětí na proud. Mezi zemí a elektrodou source tranzistoru je zapojen rezistor jako záporná zpětná vazba zesilovače. Rezistor snižuje zesílení a linearizuje převodní charakteristiku zesilovače. Do gate tranzistoru je zapojen filtr typu dolní propust tvořený rezistorem a kondenzátem. Tento filtr má dvojí funkci. Vyhlazuje napěťové skoky na vstupu, čímž zamezuje rychlým změnám proudu, které by při změnách hodnot potenciometru mohly ve zvukovém signálu procházejícím ekvalizérem vytvářet rušivé praskání. Druhá funkce je, že kondenzátor C1 po odpojení vstupu funguje jako analogová paměť, tedy drží napětí na gate tranzistoru. Protože se jedná o tranzistor řízený elektrickým polem, do gate tranzistoru neteče žádný proud, tudíž kondenzátor zůstává nabitý.



Obr. 9 programovatelný zdroj proudu

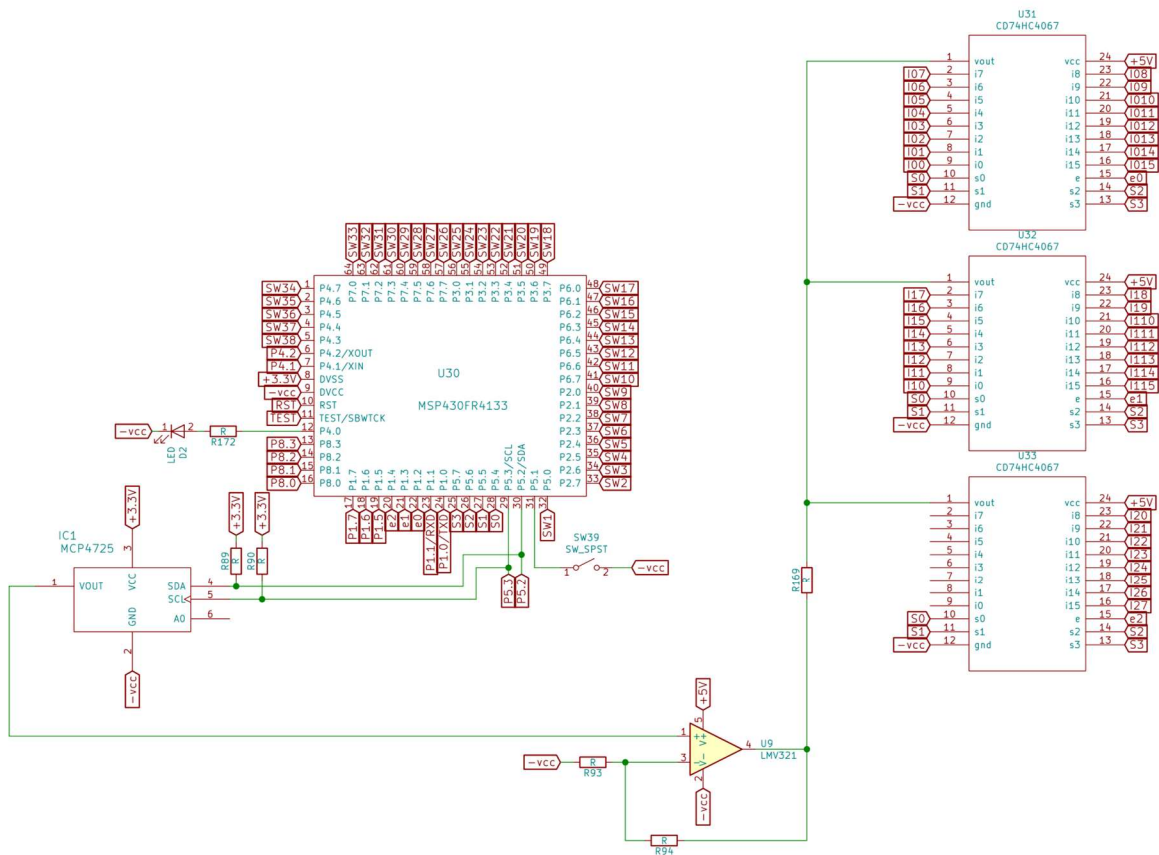
Na obrázku Obr. 10 je simulace protékajícího proudu zdrojem proudu v závislosti na lineárně se zvyšujícím vstupním napětím. Zdrojem proudu začíná protékat proud od prahového napětí tranzistoru. Prahová napětí tranzistorů MOSFET mají velký výrobní rozptyl, který může být 1 V - 2 V. Tento rozptyl je možné kompenzovat softwarově.



Obr. 10 graf proudu řízeného zdroje vůči vstupnímu napětí

### 3.4.7 Řízení zdrojů proudu

V celém zařízení je celkem 38 výše popsaných zdrojů proudu, pro každé pásmo ekvalizéru jsou 2 tyto zdroje. Vystala otázka, jak tyto zdroje řídit mikroprocesorem. Navrhnul jsem řešení spočívající v použití jednoho 12 bitového DA převodníku MCP4725 [15], připojeného k makroprocesoru sběrnici I2C. Signál z DA převodníku je zesílen operačním zesilovačem a multiplexován třemi 16 bitovými multiplexory CD74HC4067 [13]. Jedná se o analogové obousměrné multiplexory, které jsou napájeny 5 V, odpor multiplexoru v sepnutém stavu je přibližně 70  $\Omega$ . Stav multiplexorů řídím pomocí mikroprocesoru s 4 bitovou adresou a vstupem E, který v log 0 aktivuje obvod. Řízení zdrojů proudu probíhá postupně přepínáním multiplexorů a postupným nastavováním hodnot analogových pamětí tvořených kondenzátory zapojeným do gate tranzistoru v proudových zdrojích.



Obr. 11 schéma připojení DAC a multiplexorů k mikroprocesoru



### 3.4.8 Klávesnice

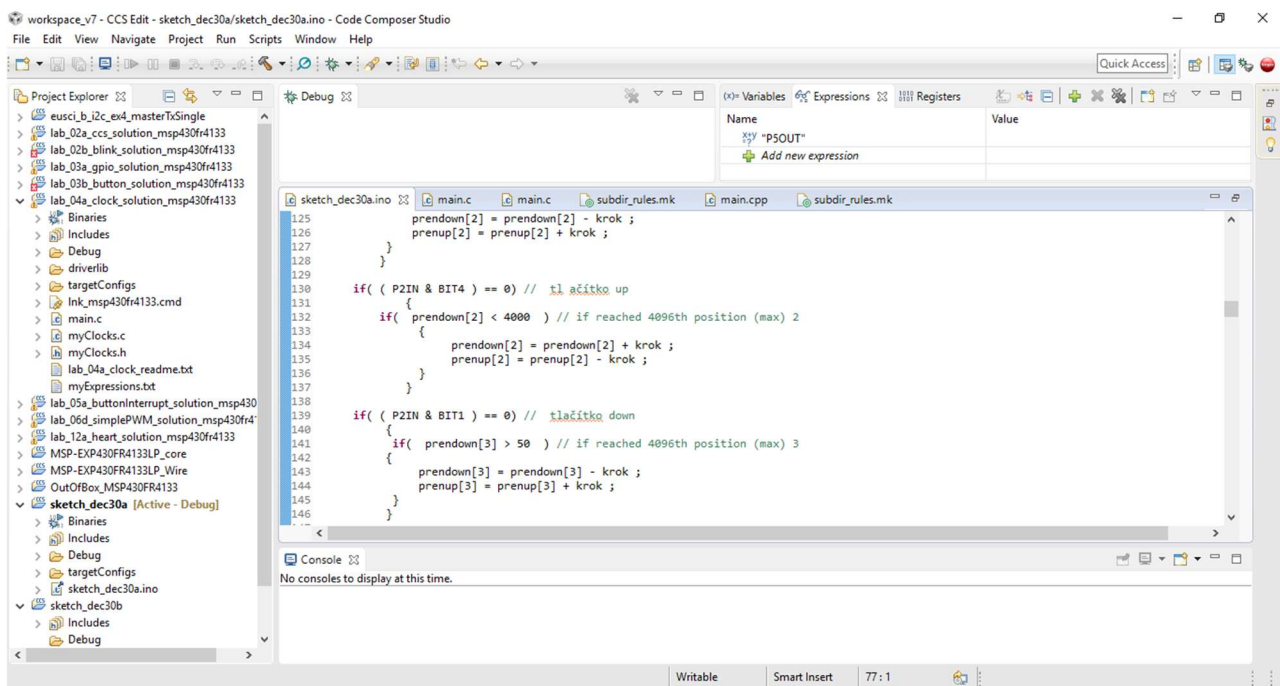
Klávesnice obsahuje 38 tlačítek a další tlačítka pro ukládání nastavení. Ke každému pásmu ekvalizéru náleží dvojice tlačítek, přičemž horní tlačítko zvyšuje přenos filtru a spodní tlačítko snižuje přenos filtru. Tlačítka jsou připojena k mikroprocesoru, pomocí zapojení s pull-up rezistory, tyto rezistory jsou nastaveny interně v branách mikroprocesoru MSP430. Použití interních rezistorů šetří součástky na plošném spoji.

### 3.4.9 Displej

Nastavení přenosů jednotlivých filtrů může být zobrazeno na displeji nebo přes sériovou linku RS232 v terminálu počítače. Displej je připojen přes konektor J30 k mikroprocesoru. Display je řízen zabudovaným řadičem HD44780, který zobrazuje ASCII znaky na LCD segmentech 4x20.

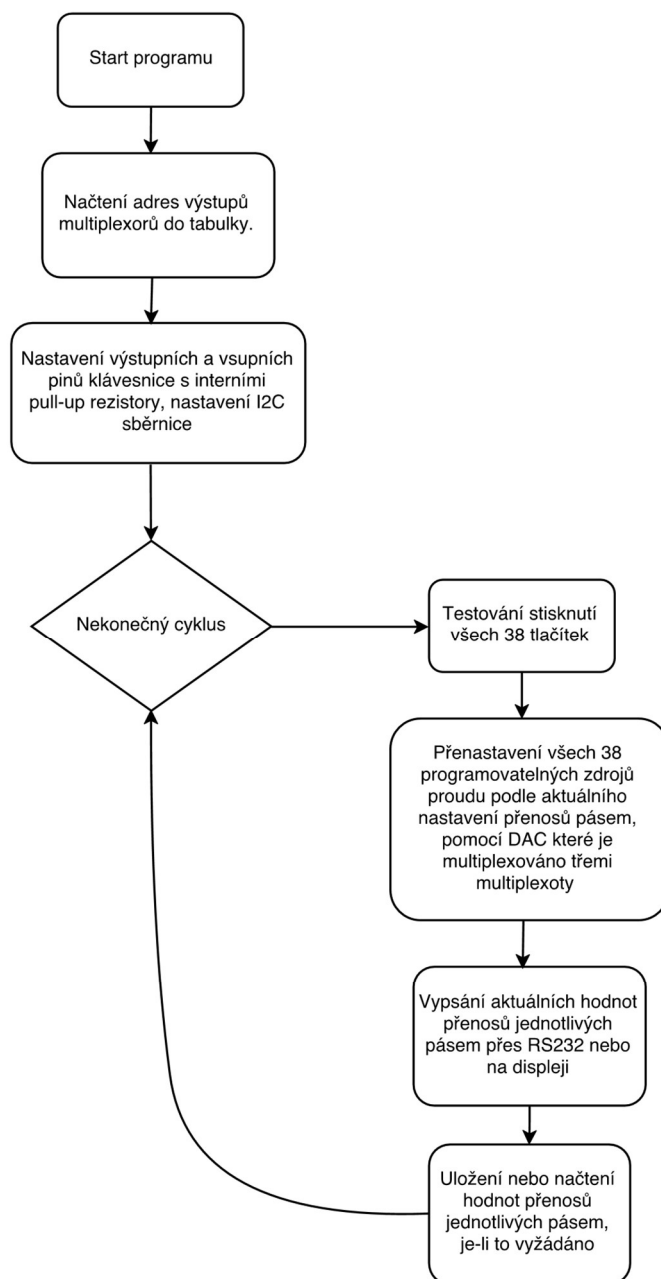
### 3.4.10 Obslužný program

Obslužný program digitálního ovládání ekvalizéru jsem psal ve vývojovém prostředí Code Composer Studio (CCS) [14] v jazyce C s využitím knihoven energia. Ukázka vývojového prostředí je na obr. 12.



Obr. 12 vývojové prostředí Code Composer Studio

Blokové schéma obslužného programu je na obr. 13



Obr. 13 blokové schéma ovládacího programu

## 4 Ozvučení prostoru

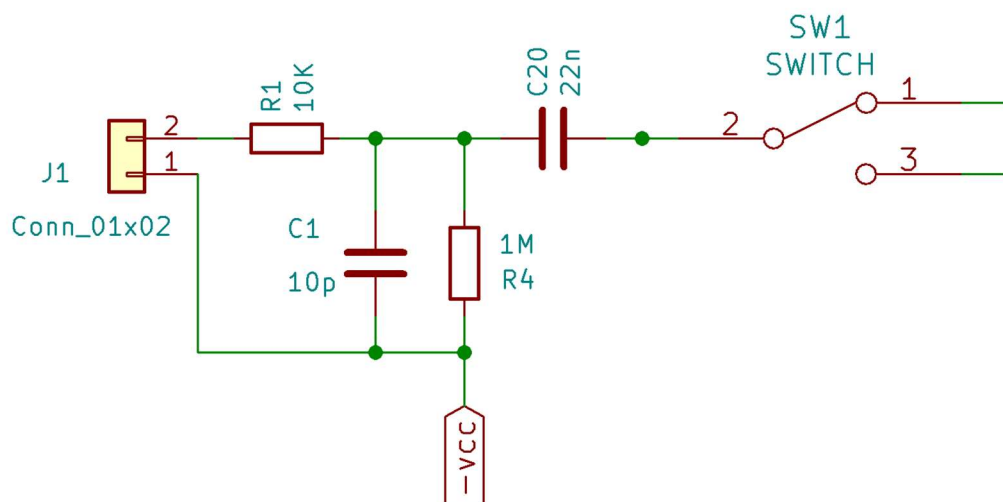
V této kapitole je popsán vývoj elektroniky přenosného bateriově napájeného zařízení pro prostorové nazvučení hudebního nástroje, např. elektrické kytary. Toto zařízení může najít uplatnění například u pouličních muzikantů. Cílem je dodržet požadavek na dobrou účinnost, kompaktní rozměry a nízkou hmotnost při zachování kvality zvukového přednesu. Zařízení se skládá z dvoukanálového předzesilovače, koncového zesilovače a akumulátorové nabíječky.

### 4.1 Předzesilovač

Vstupní zesilovač má za úkol impedančně oddělit výstup z hudebního nástroje nebo mikrofonu a nastavit správnou hodnotu zesílení pro následující obvody.

#### 4.1.1 Parametry vstupu

Výstupní impedance např. kytarového snímače nebo mikrofonu je vysoká, proto musí být vstupní impedance předzesilovače dostatečně vysoká, tak aby výstup nezatěžovala. Vstupní obvod je na obr. 14, obvod obsahuje dolní propust, která odfiltruje vyšší kmitočty nad akustickým pásmem.



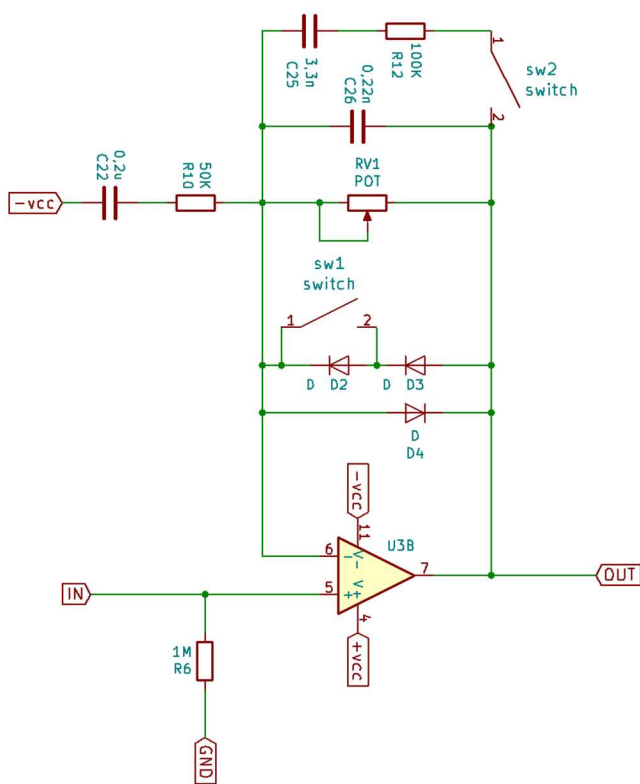
Obr. 14 vstupní obvod

## 4.1.2 Zkreslující kanál

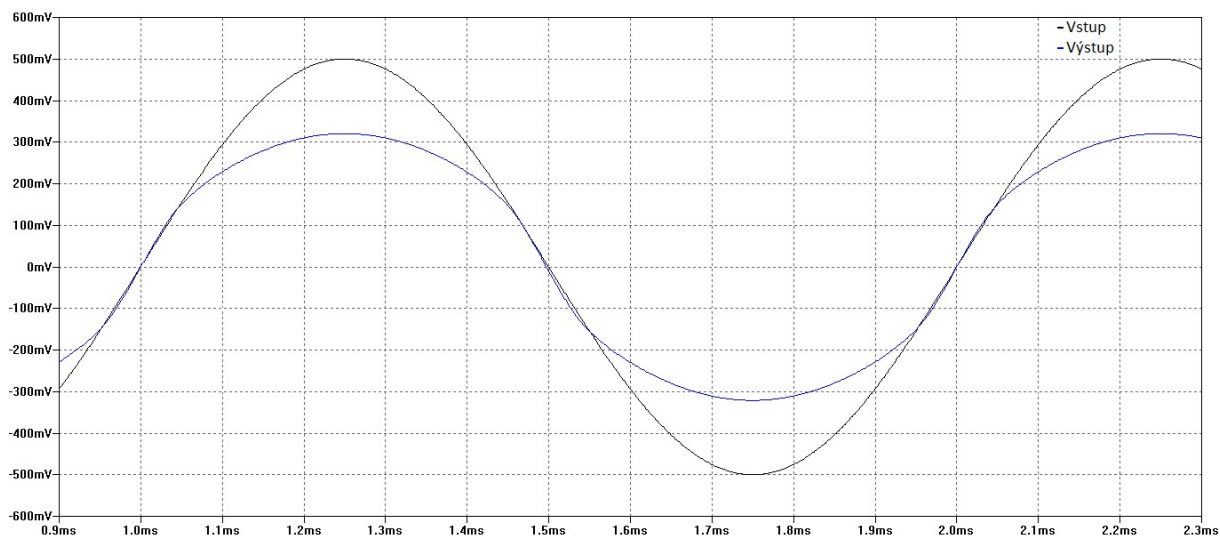
Obvody zkreslení se používají pro úpravu zvuku elektrické kytary, zvuku přidávají více vyšších harmonických a uberou dynamice hry. Tyto efekty udělají z původního čistého zvuku elektrické kytary typický zkreslený zvuk, známý například z většinové rockové produkce.

## 4.1.3 Obvod zkreslení Overdrive

Obvod Overdrive na obr. 15 je nelineární obvod s diodami ve zpětné vazbě operačního zesilovače. Nelineární VA charakteristika diody v tomto zapojení způsobí tzv. měkkou limitaci, to znamená, pokud se napětí na diodě ve zpětné vazbě dostane nad její prahové napětí, dioda začne postupně propouštět proud. Dioda je zapojena v proudovém děliči s odporem RV1, proud začíná téci místo odporem R2 diodou, která má nad svým prahovým napětím malý diferenciální odpor. Tak je docíleno měkké limitace signálu. Jak měkká limitace signálu vypadá, je názorně ukázáno na obr. 16. Zde sínusovka je od určitého bodu měkce utlumena a dosahuje menší amplitudy, než vstup při jednotkovém zisku zapojení.

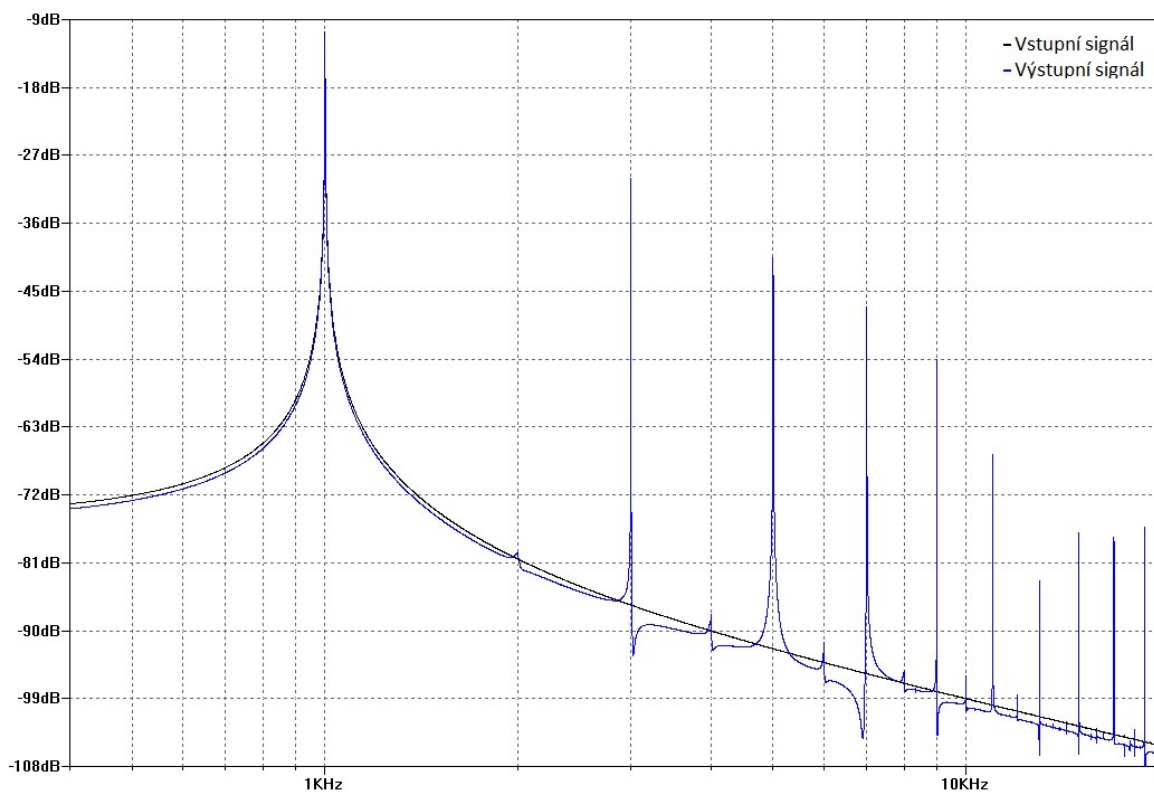


Obr. 15 Obvod Overdrive

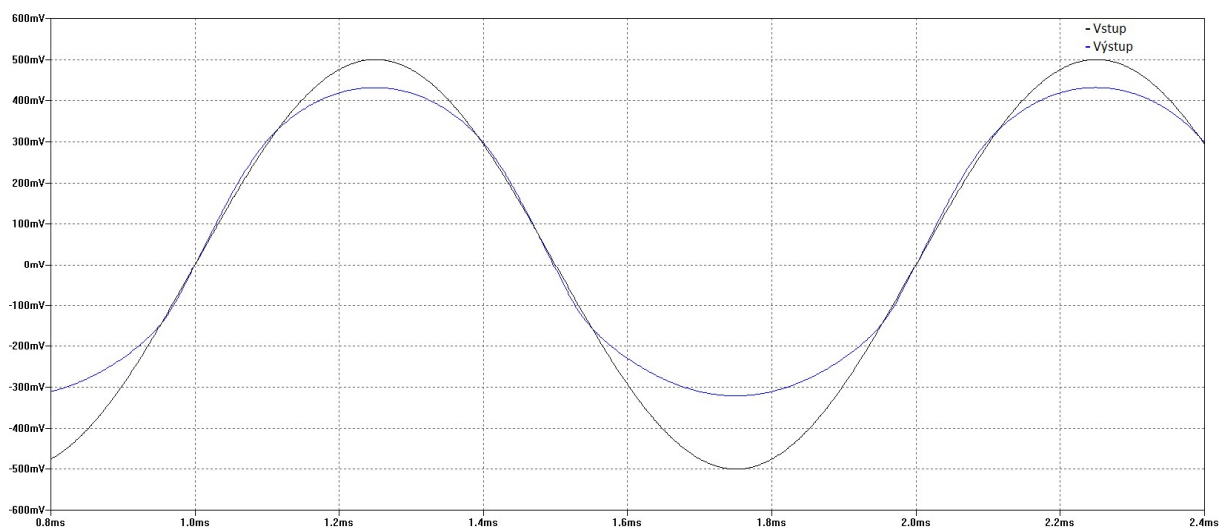


Obr. 16 Měkká limitace

Na obr. 16 je tzv. symetrická limitace, tedy kladná i záporná půlvlna signálu je limitována symetricky kolem střední hodnoty. Symetrická limitace vytváří ve spektru liché harmonické, jak je vidět na obr. 17, obvod je buzen harmonickým signálem 1 KHz, základní harmonická složka je 1 KHz, další harmonické složky jsou 3 KHz, dále 6 KHz, 9 KHz a tak dále.

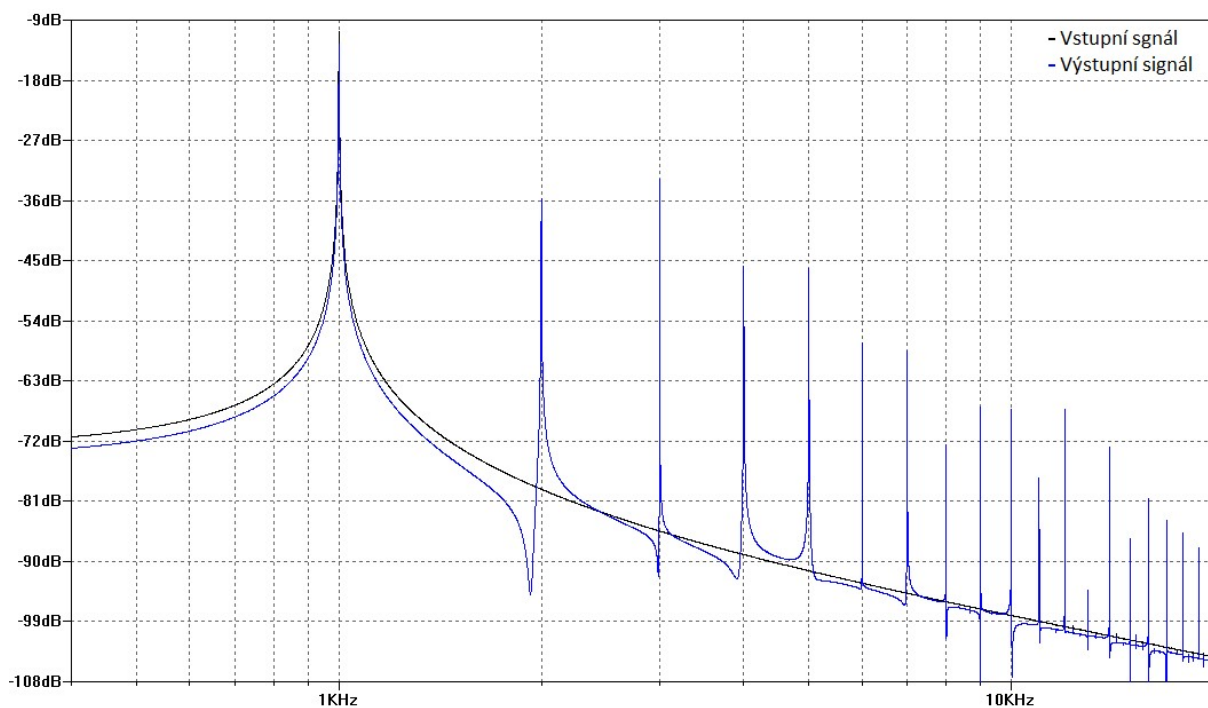


Obr. 17 Spektrum symetrické limitace



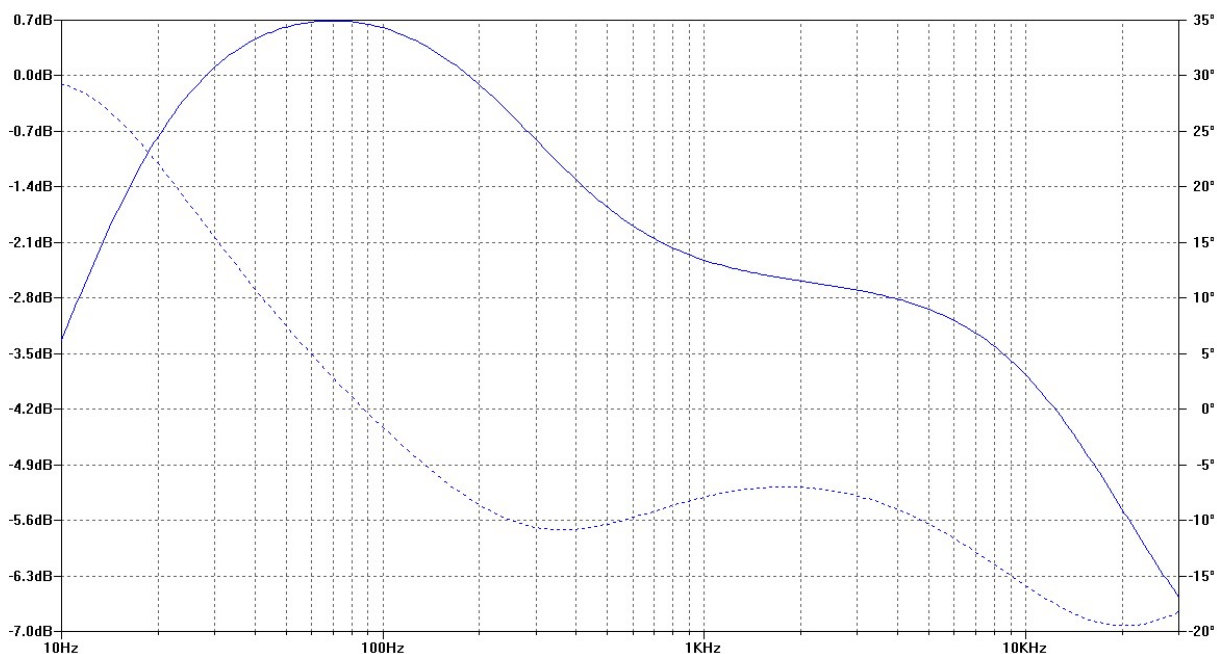
Obr. 18 Nesymetrická limitace

Podle některých zdrojů je přítomnost sudých harmonických ve spektru subjektivně uchu příjemnější. Sudé harmonické frekvence vytváří například přirozené zkreslení elektronkových audio zesilovačů. Obvod Overdrive je vybaven přepínačem, který připne do série k jedné diodě ve zpětné vazbě další diodu, tím vytvoří nesymetrickou limitaci, kdy jedna půlvlna signálu začíná být limitována od nižšího napětí než opačná. To je znázorněno na obr. 18. Spektrum signálu po asymetrické limitaci je na obr. 19, zde je vidět, že signál už obsahuje i sudé harmonické složky.



Obr. 19 Spektrum nesymetrické limitace

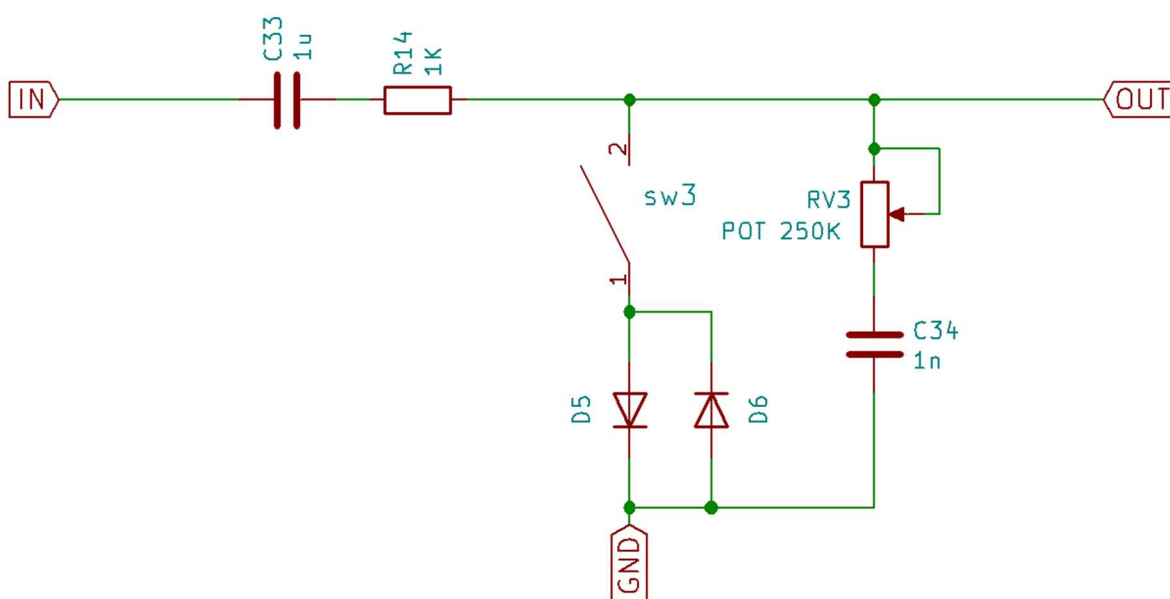
Obvod obsahuje ještě přepínač, který ke zpětné vazbě připojuje filtr. Filtr má mírně utlumit přibližně o 4 dB vyšší kmitočty. Zvuk z Overdrivu je poté o něco „kulatější“ a vhodný např. pro funky. Přenosová a fázová charakteristika celého obvodu Overdrive je na obr. 20.



Obr. 20 přenosová charakteristika filtru Overdrive

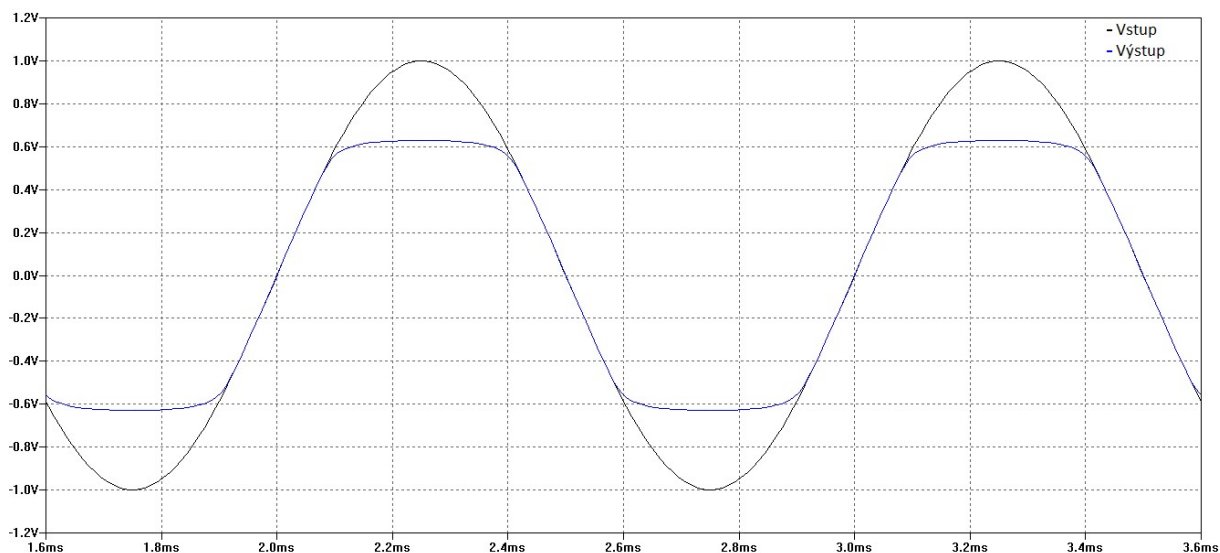
#### 4.1.4 Obvod zkreslení Distortion

Distortion provádí tvrdou limitaci, to znamená, že signál zařízne od prahového napětí. Obvod Distortion je na obr. 21. Na vstupu je operační zesilovač v zapojení sledovače, za OZ je rezistor, který tak vytvoří měkký zdroj napětí. Za rezistorem jsou dvě antiparalelně zapojené diody proti zemi. Je-li napětí větší, než 0,6 V, diody napětí zaříznu na jejich prahové napětí. Na obr. 22 je signál v časové oblasti, zde si můžeme povšimnout, že oproti Overdrive je limitace ostřejší. Kytarový efekt Distortion bývá požit v tvrdší hudbě, třeba metalu. Na obr. 23 je spektrum obvodu Distortion.

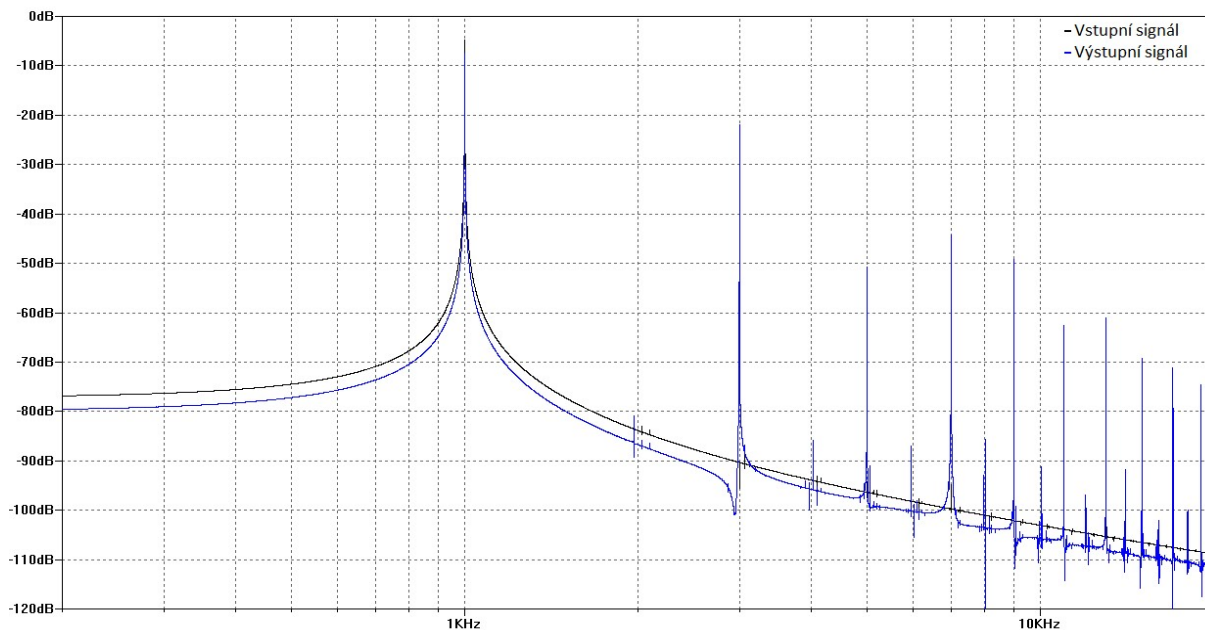


Obr. 21 obvod distortion





Obr. 22 Tvrdá limitace



Obr. 23. spektrum obvodu Distortion

## 4.1.5 Čistý kanál

Předzesilovač obsahuje čistý kanál, který nezkrusluje signál. Použití čistého kanálu nebo zkrusleného kanálu je možno navolit přepínačem. Čistý kanál je vhodný pro akustické nástroje a připojení mikrofону.

## 4.2 Zesilovač ve třídě D

Zesilovač by měl dosáhnout co nejvyšší účinnosti, aby se v případě napájení z baterie maximalizovala výdrž. Z tohoto důvodu jsem použil zesilovač ve třídě D, který na rozdíl od třídy AB dosahuje vysoké účinnosti, protože pracuje na spínaném principu. Jako obvod zesilovače jsem vybral TPA3122D2 [16]. Napájecí napětí tohoto zesilovače se může pohybovat v mezích 10 až 30 V, může pracovat do impedance 8  $\Omega$  nebo 4 $\Omega$  ve stereo režimu nebo v zapojení do můstku. Zvláštností tohoto obvodu je, že oba tranzistory ve výstupním můstku jsou tranzistory NMOS. Použití tranzistoru NMOS je výhodnější z důvodu vyšší pohyblivosti elektronů v křemíku typu N, tudíž nižšího odporu v sepnutém stavu při stejné velikosti tranzistoru oproti PMOS. Horní tranzistor zapojený mezi kladným napájením a výstupem proto potřebuje pro své spínání do elektrody GATE vyšší napětí než je napájecí. Toto napětí vytváří kondenzátor C13, který funguje, jako nábojová pumpa. Celkový výkon zesilovače se odvíjí od napájecího napětí, impedance reproduktoru typu zapojení, tedy jestli se jedná o poloviční můstek nebo plný můstek. V případě plného můstku je maximální napětí dvojnásobné, než maximální napětí na polovičním můstku. Tedy výkon kanálu je 4 násobný oproti polovičnímu můstku, protože výkon na zátěži je úměrný druhé mocnině napětí. Pro své zapojení používám právě plného H můstku a reproduktoru o impedanci 4  $\Omega$  z důvodu vyššího výkonu.

Vzhledem k použité topologii spínaného zesilovače je nutnost zajistit adekvátní filtraci napájecího napětí. Musí být filtrovány vysokofrekvenční proudové špičky, které jsou generovány při spínání tranzistoru v můstku tak, aby rušení nepronikalo do ostatních částí obvodu. Filtrování napájení zajišťuje sada zvolená podle katalogového listu dimenzovaných kondenzátorů. Sada kondenzátorů obsahuje keramické kondenzátory 100 nF, které mají nízký sériový odpor. Proto dokáží tlumit vyšší kmitočtové složky rušení v napájecích cestách. Sada obsahuje též elektrolytické kondenzátory, které mají vyšší sériový odpor, než keramické. Elektrolytické kondenzátory ale zase mají vysokou kapacitu, proto tlumí nízkofrekvenční rušení v napájení.

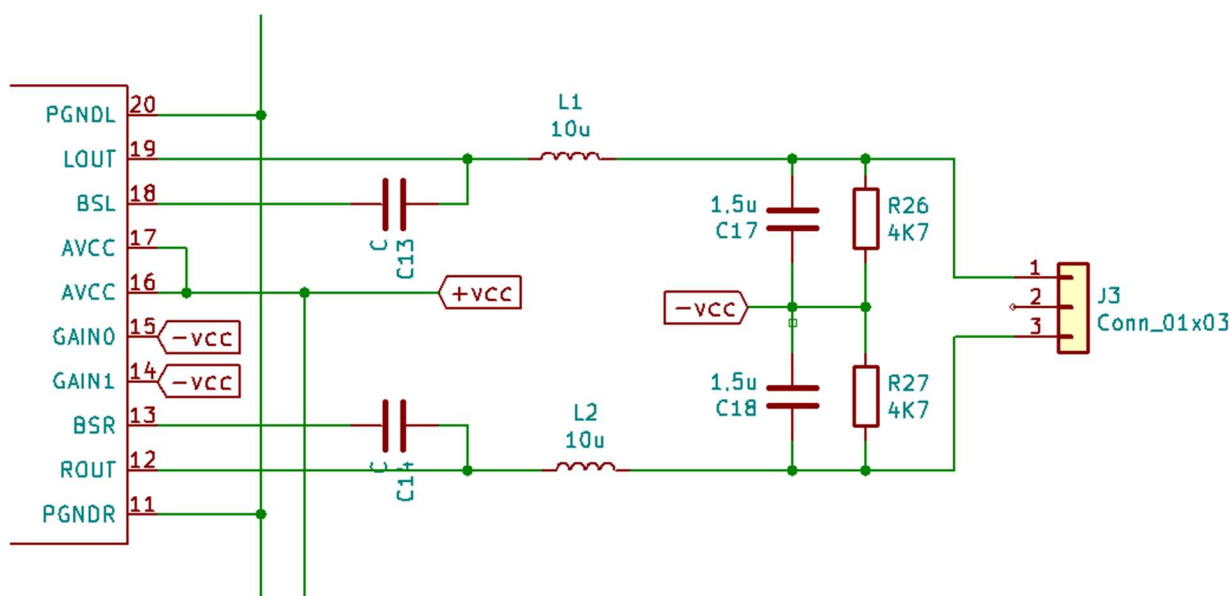
### 4.2.1 Výstupní filtr

Výstupní napětí z můstků je obdélníkové, které je modulováno PWM. Toto napětí je třeba filtrovat filtrem dolní propusti, která dostatečně potlačí vysokofrekvenční spektrální složky nosného spínacího kmitočtu PWM a propustí frekvence slyšitelného audio pásma, kterými je modulována

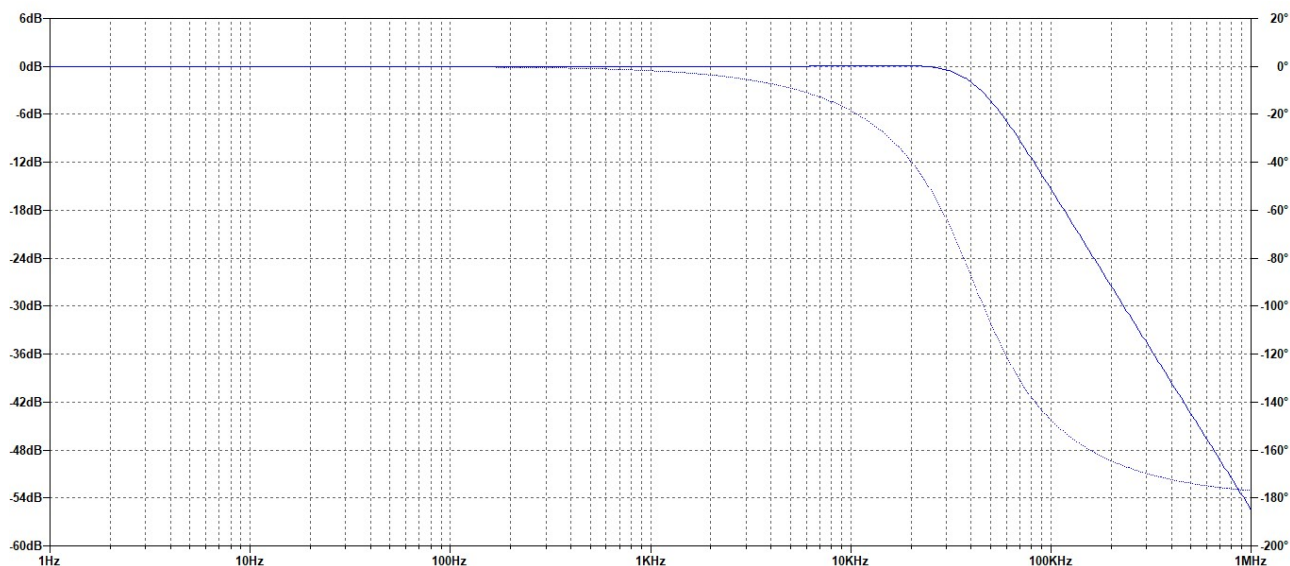
střída PWM. Filtr je L C R, kde R tvoří impedance reproduktoru, reproduktor je součástí filtru, jeho reálná část impedance tlumí rezonanční kmitočet L C obvodu tak, že přenosová charakteristika neobsahuje vyvýšení na rezonančním kmitočtu. Pro kondenzátory filtru jsem použil jakostní kondenzátory s polyesterovým dielektrikem. Indukčnosti jsem vyrobil namotáním drátu o průměru 1 mm na toroidní jádra.

Jelikož jsem použil zapojení do můstku, je pro výstupní kanál zapotřebí použít dva výstupní filtry pro každou polovinu spínacího můstku jeden. Výsledný modulovaný signál je na obou polovinách můstku stejný, ale fázově otočený o 180 °, reproduktor tedy nemusí být připojen proti zemi přes kondenzátor s dostatečně vysokou kapacitou, která by musela pojmout veškeré kmitočtové složky (hlavně basové) výstupního signálu. Odpadá tedy nutnost použití tohoto výstupního kondenzátoru, což je výhoda. Schéma výstupního filtru je na obr. 24.

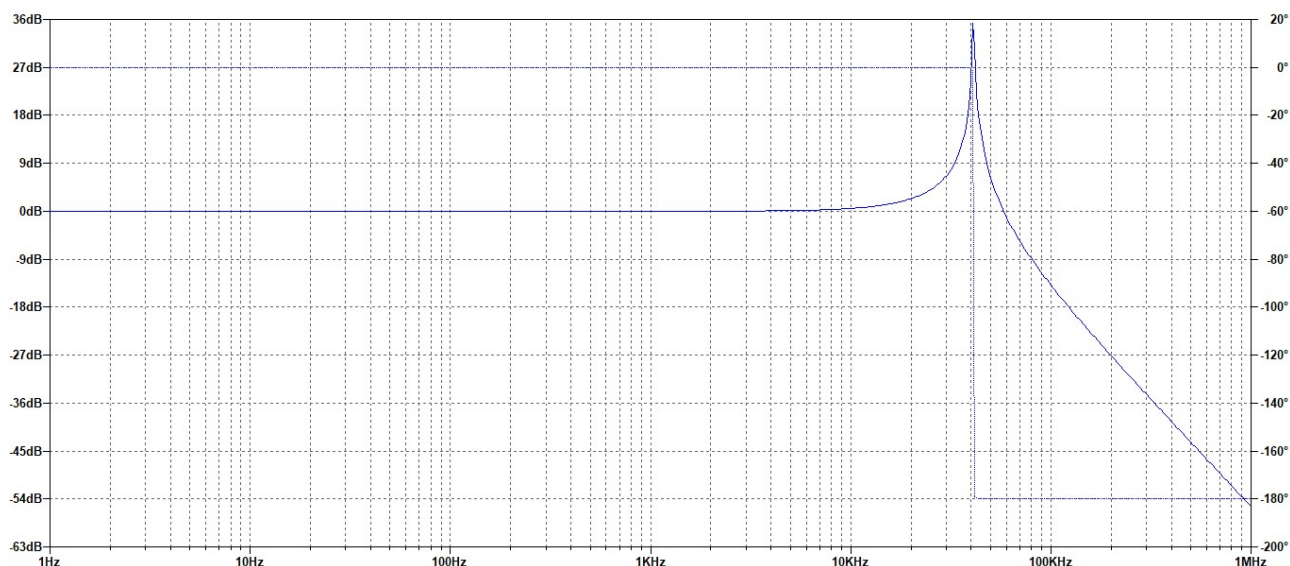
Simulace frekvenční charakteristiky filtru jedné poloviny můstku je uvedena na obr. 25. Pro zjednodušení je impedance reproduktoru nahrazena reálnou impedancí 4 Ω a protože se jedná o simulaci filtru jedné poloviny kanálu a obě poloviny jsou naprosto totožné, v simulaci je použita poloviční impedance zátěže, tedy 2 Ω. Pro objasnění funkce tlumení rezonančního obvodu LC filtru zde publikuji i simulaci na obr. 26 s odpojenou zátěží, kde je zřetelně viditelný nezatlumený přenos v rezonanci.



Obr. 24 Výstupní filtr



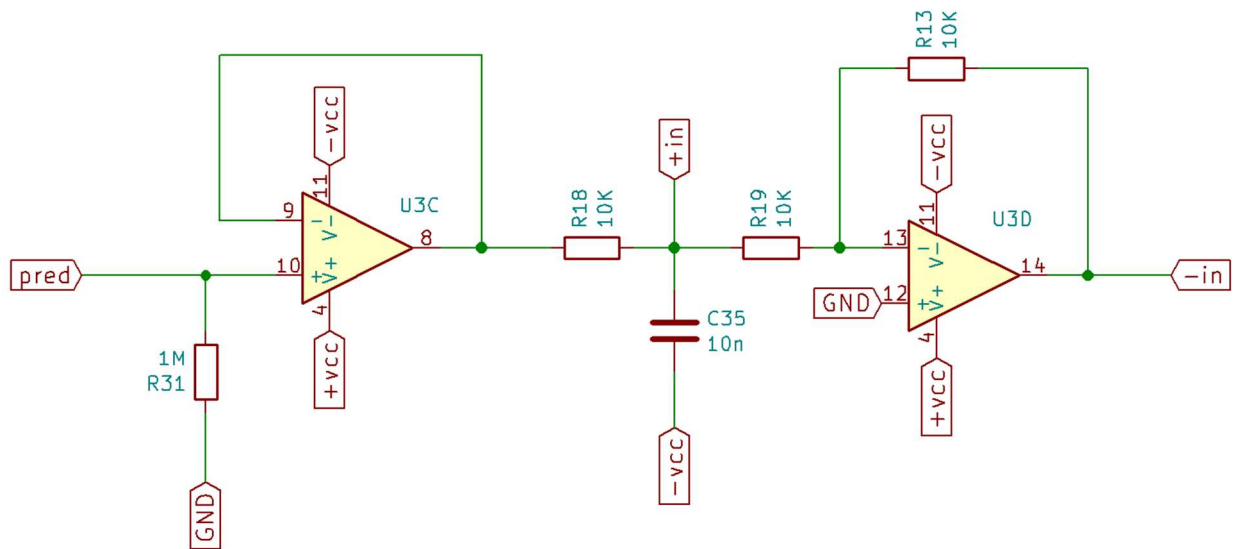
Obr. 15. Přenosová charakteristika výstupního filtru se zátěží



Obr. 26 Přenosová charakteristika výstupního filtru bez zátěže

## 4.2.2 Fázový invertor

Z důvodu použití můstkového zapojení, kde je v polovinách můstku oproti sobě signál otočený o  $180^\circ$  je potřeba signál z předzesilovače do jednoho z kanálů fázově otočit. Proto jsem zapojil operační zesilovač do invertujícího zapojení s jednotkovým ziskem a vytvořil tak fázový invertor, který je na obr. 27.



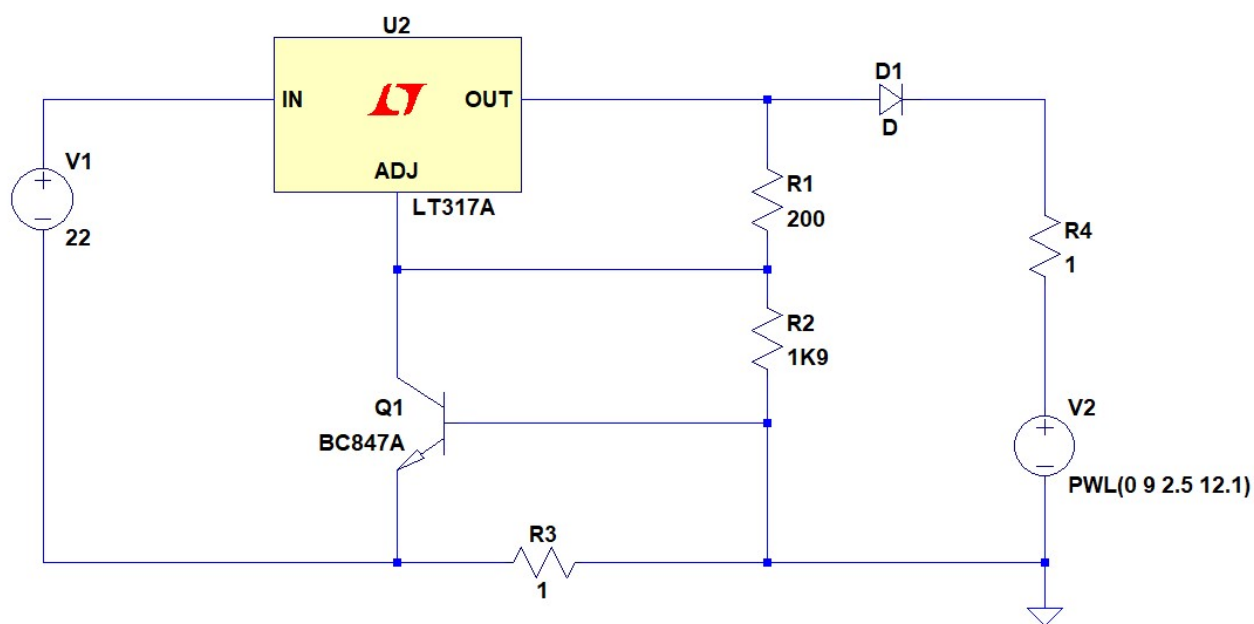
Obr. 27 Fázový invertor

### 4.3 Nabíječka

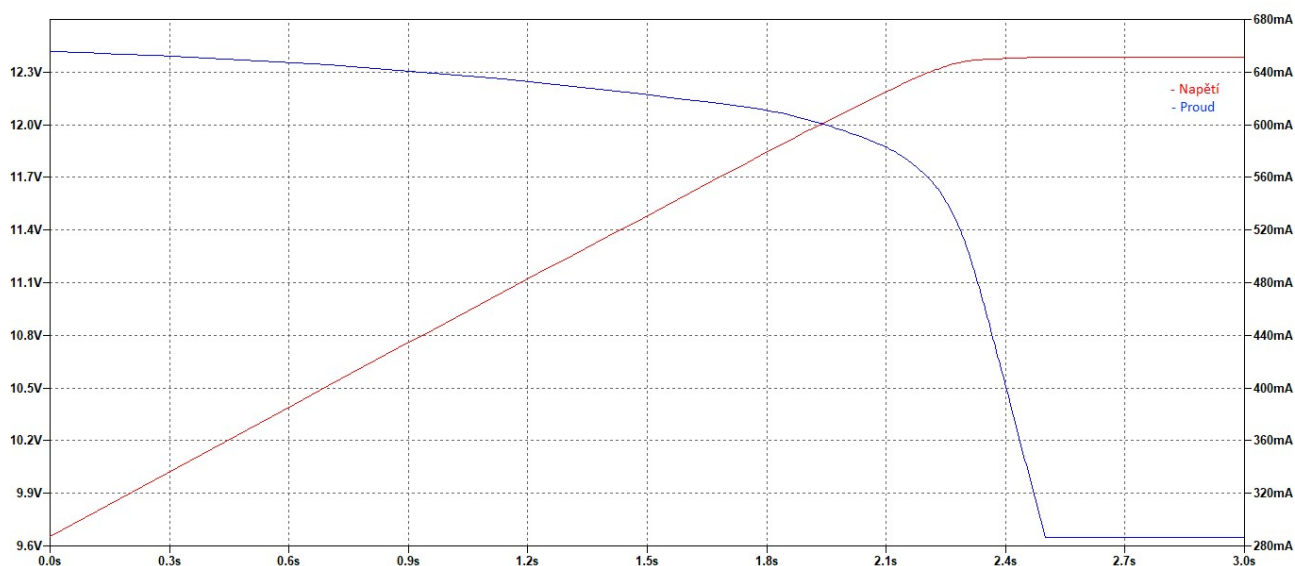
Koncový zesilovač může být napájen bateriově. Z tohoto důvodu jsem na desce plošného spoje zesilovače a předzesilovače vytvořil jednoduchou nabíječku, jejíž schéma je na obr. 28. Nabíječka používá režim nabíjení v konstantním proudu a konstantním napětí. V zařízení bude používána trojice v sérii zapojených Li-Ion baterií typu 18650. Režim konstantního proudu a napětí pracuje na principu, že nejprve se vybitý akumulátor nabíjí konstantním proudem přibližně do 80 % své kapacity, kdy jeho napětí dosahuje maximální hodnoty definované výrobcem [11]. U Li-Ion akumulátorů to je 4,1 V – 4,2 V. Potom se přepne do režimu konstantního napětí, kdy se nabije zbylých 20 % kapacity.

Nabíječku jsem navrhnul pomocí lineárního stabilizátoru napětí LM317 [19]. Výstupní napětí stabilizátoru je přesně nastaveno více otáčkovým trimrem na hodnotu 12,2 V, což je hodnota napětí režimu nabíjení konstantním napětím. Pro režim nabíjení konstantním proudem je do obvodu přidán bočník, který snímá nabíjecí proud. Pokud napětí na bočníku překročí napětí báze – emitor bipolárního tranzistoru, které je přibližně 0,6 V, potom se tranzistor otevírá a teče jím část proudu z rezistoru R2. Tedy je vytvořen proudový dělič mezi tranzistorem a R. Proud tranzistorem je regulován napětím na bočníku, čímž je vytvořena záporná zpětná vazba, která udržuje konstantní výstupní proud stabilizátoru.

Požadavek na přesnost stabilizace napětí je vysoká z důvodu náchylnosti lithiových baterií na přebíjení. Je-li překročeno maximální povolené napětí lithiové baterie, začne elektrolyt v akumulátoru plynout a akumulátor se zničí. Regulace proudu v režimu konstantního proudu nemusí být přesná, vysoká nejistota nabíjecího proudu akumulátoru nevadí. Baterie akumulátorů je doplněna pojistkou 2 A, pojistka není na plošném spoji, ale je připájena přímo k baterii. Simulace nabíjení je na obr. 29.



Obr. 28 Nabíječka [19]



Obr. 29 Simulace nabíjení

## 5 Vývoj plošných spojů

Pro výše popsanou elektroniku vyvíjenou v diplomové práci jsem vyvinul dva plošné spoje. První plošný spoj obsahuje ekvalizér a jeho digitální ovládání, na plošném spoji je 464 součástek. Tento PCB jsem si nechal vyrobit ve firmě Pragoboard.

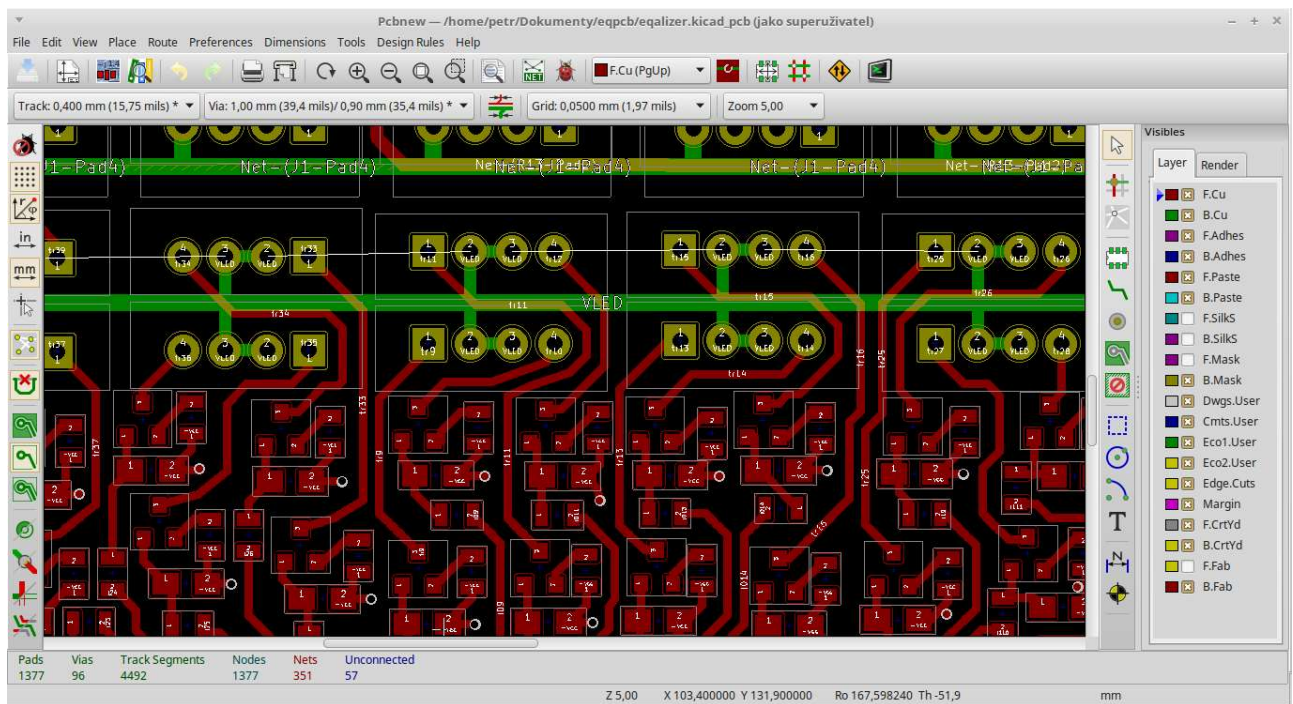
Druhý plošný spoj obsahuje zesilovač ve třídě D, dvoukanálový předzesilovač a nabíječku, na plošném spoji je 108 součástek. Toto PCB jsem si vyráběl sám fotocestou.

Plošné spoje jsou dvoustranné, při jejich návrhu jsem se snažil dodržet návrhová pravidla [3] tak aby bylo zařízení elektromagneticky kompatibilní.

A to především:

- Každý integrovaný obvod má svůj blokovací kondenzátor, je-li nutno, tak skupinu kondenzátorů
- Používám rozlité země tak, kde je to možné
- Odděluji napájecí cesty digitálních a analogových obvodů

Plošné spoje jsem vyvíjel v programu KiCad [17], který je zdarma k dispozici s otevřeným zdrojovým kódem. Ukázka prostředí programu KiCad je na obr. 30.



Obr. 30 KiCad

## 6 Osazování a oživení

Plošné spoje jsem osazoval za pomoci pájecí stanice Ersi i-CON 2, která obsahuje i pájecí pinzetu na SMD součástky a stanice horkého vzduchu. Při pájení jsem používal olovnatý cín.

Zařízení jsem oživoval po částech, při oživování jsem objevil několik chyb v návrhu plošného spoje, které jsem odstranil za použití frézky a drátových propojek. Po odstranění chyb jsem oživil všechny elektronické části zařízení.

## 7 Vybraná měření

V této kapitole jsou zveřejněny výsledky vybraných měření na zařízení inteligentního ozvučení prostoru.

### 7.1 Měření dynamického rozsahu, a zkreslení THD ekvalizéru


Měření dynamického rozsahu a zkreslení THD jsem provedl pomocí externí zvukové karty Steinberg UR 22 USB Audio Interface a měřicího software RightMark Audio Analyzer 6.4.2 [10].

Nejprve jsem přímo propojil vstup a výstup zvukové karty a změřil jsem vlastní parametry této zvukové karty, abych dostal referenci, s jakou maximální přesností budu měřit.

Dynamický rozsah zvukové karty vyšel 92,6 dB a THD 0,0047 %. Poté jsem provedl 2 měření ekvalizéru s nastaveným přenosem všech filtrů na 0 dB pro napájecí napětí 12 V a napájecí napětí 19 V. Výsledky měření ekvalizéru jsou srovnatelné s chybou měření zvukové karty, protože vyšly jen o něco horší, než jsou mezní parametry zvukové karty, proto předpokládám, že zkreslení a dynamický rozsah navrženého ekvalizéru je roven nebo lepší, než jsou parametry zvukové karty, na které proběhlo měření. Dynamický rozsah při napájení 12 V vyšel 89,7 dB a zkreslení THD 0,0059 %.

Na obr. 31 je ukázka měřicího programu RightMark [10]



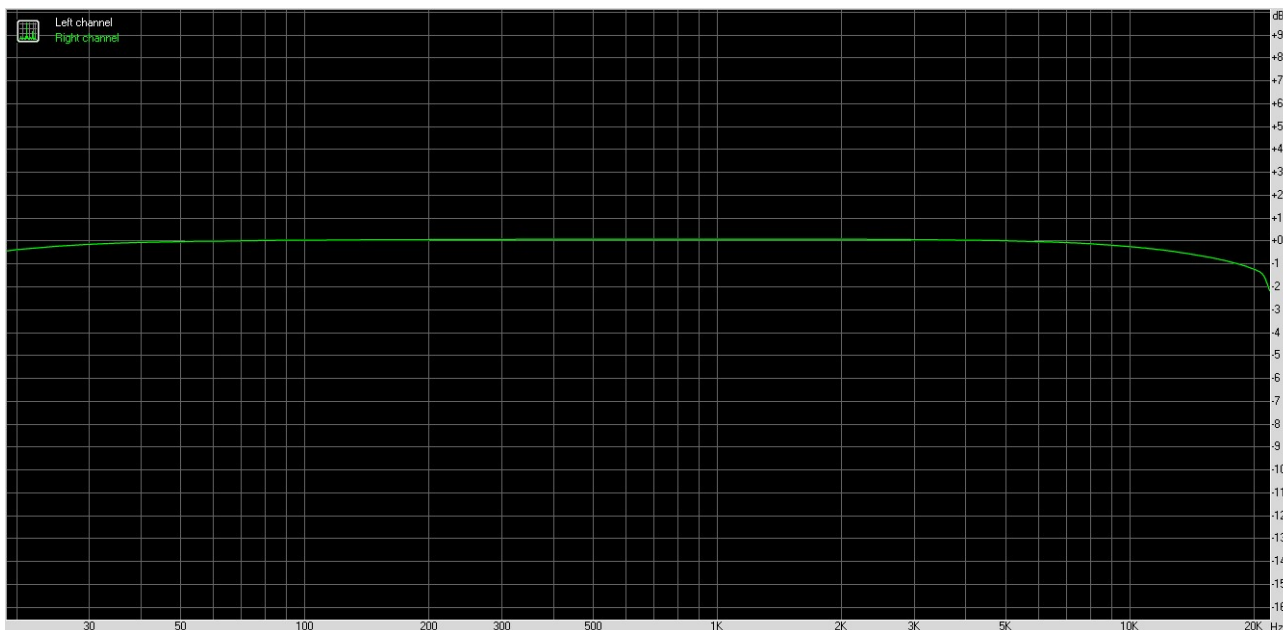
Test results			
Device:	propojeno kabelem	0 dB 12 V stineno	0 dB 19 V
Sampling mode:	24-bit, 44 kHz	24-bit, 44 kHz	24-bit, 44 kHz
Frequency response (multitone), dB	+0.08, -0.66	+0.08, -0.62	+0.08, -0.62
Noise level, dBA	-92.6	-89.7	-89.8
Dynamic range, dBA	92.6	89.7	89.9
Total harmonic distortion (THD), %	0.0047	0.0059	0.0051
Intermodulation distortion + noise, %	0.0096	0.012	0.012
Stereo crosstalk, dB	-45.7	-44.6	-44.7
Intermodulation distortion + noise (swept freqs), %	0.012	0.014	0.014
Frequency response (swept sine), dB	+10.2, -5.8	+9.4, -5.2	+8.9, -5.8
Total harmonic distortion (swept freqs), dB	+11.75, -12.28	+11.86, -9.39	+13.22, -9.43
THD (swept freq.), %			
	<input checked="" type="checkbox"/> Select	<input checked="" type="checkbox"/> Select	<input checked="" type="checkbox"/> Select
			
HINT: Right-click on result boxes to view the detailed re			

Obr. 31 RightMark

## 7.2 Měření přenosových charakteristik ekvalizéru

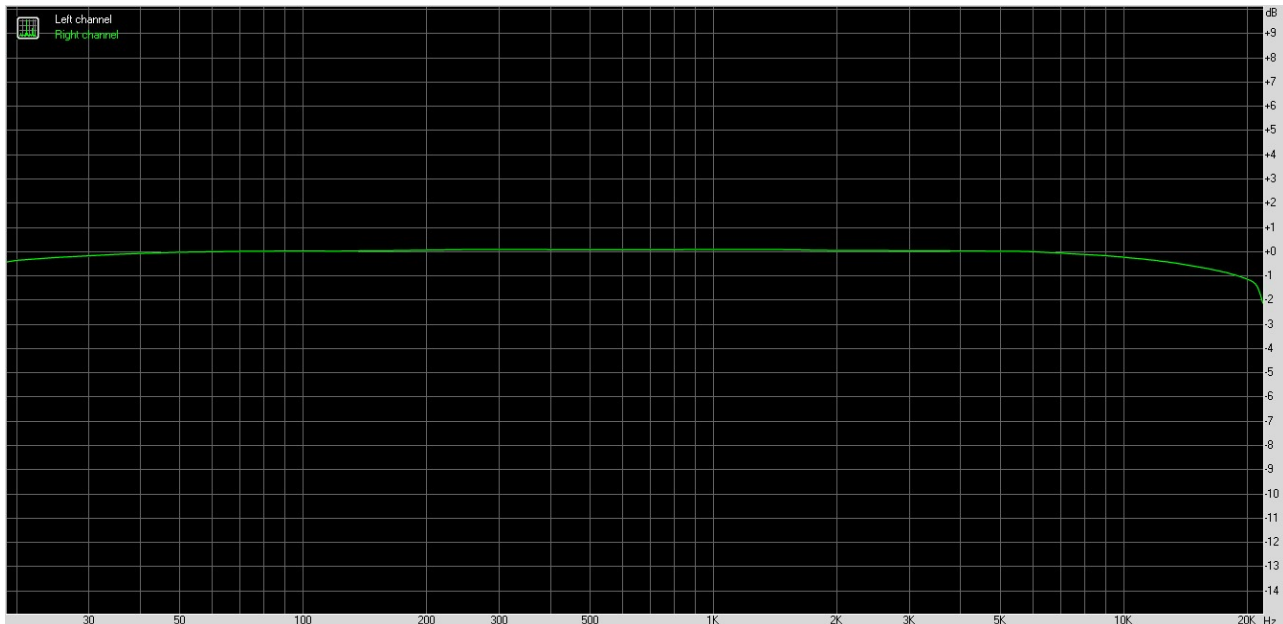
Pomocí výše uvedeného programu jsem provedl měření frekvenčních charakteristik ekvalizéru pro vybraná nastavení filtrů.

Nejprve jsem provedl referenční měření přenosové charakteristiky zvukové karty.



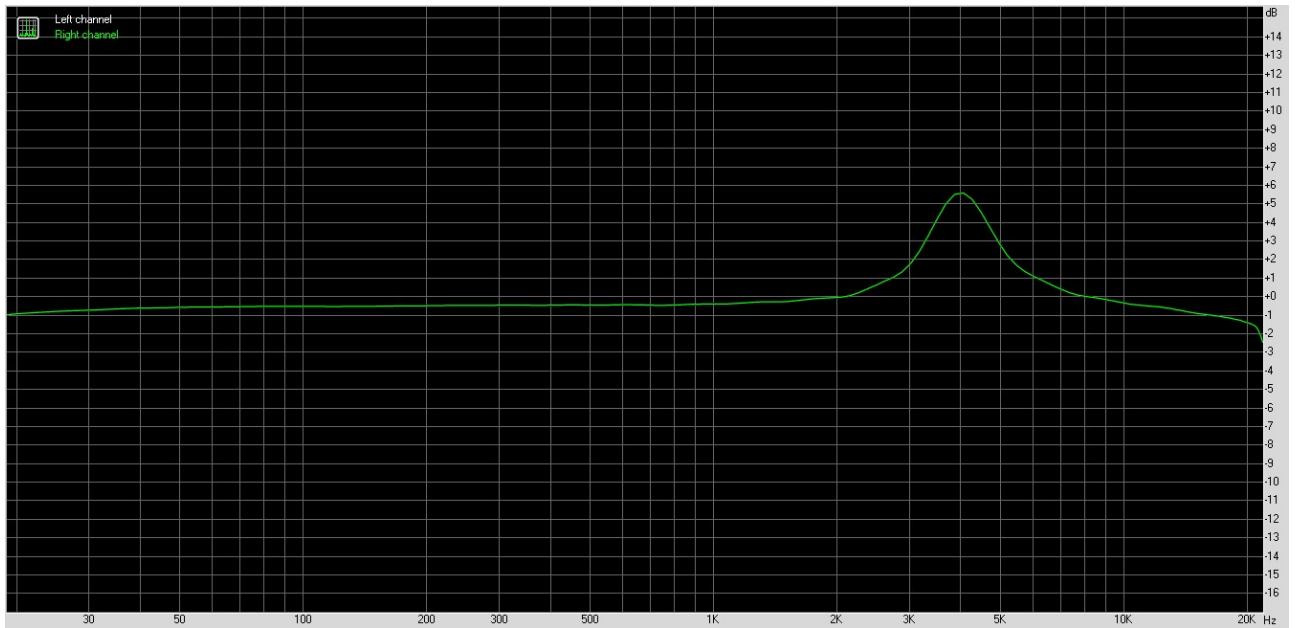
Obr. 22 Referenční měření přenosové charakteristiky měřící zvukové karty

Na obr. 32 je přenosová charakteristika ekvalizéru pro nastavení přenosů všech filtrů na 0 dB. Charakteristika je naprosto totožná s charakteristikou měřící zvukové karty, to znamená, že ekvalizér při nastavení přenosu 0 dB přenosovou charakteristiku audio signálu nijak nemění.

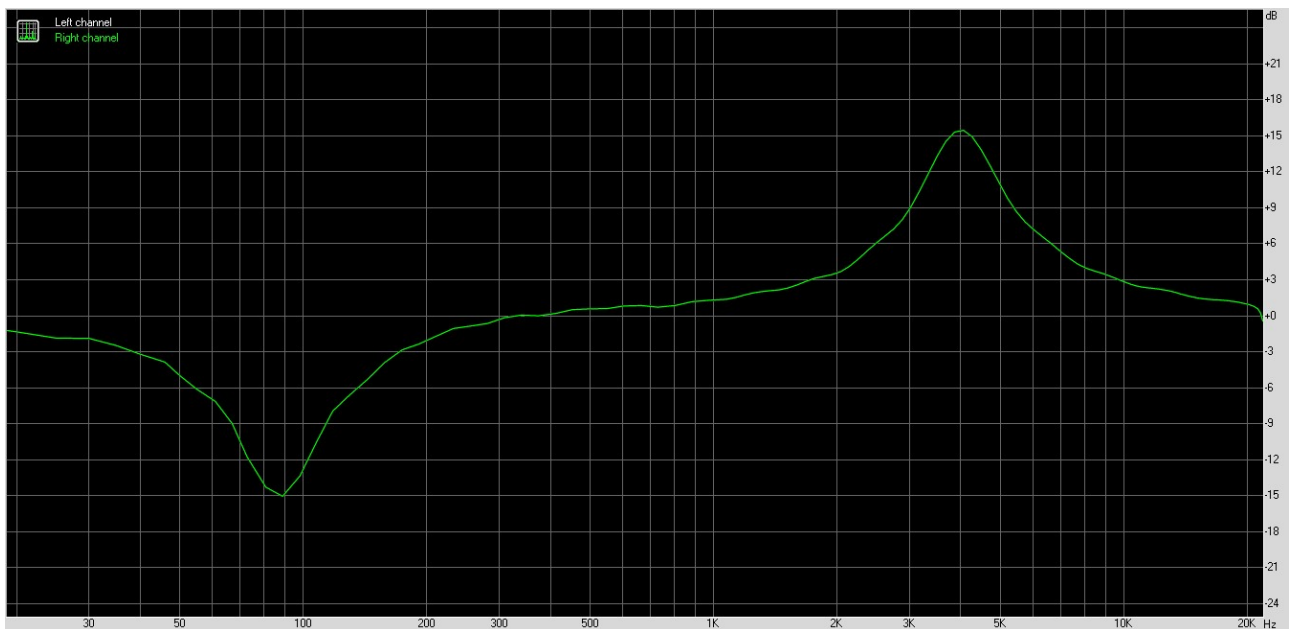


Obr. 33 Přenos 0 dB

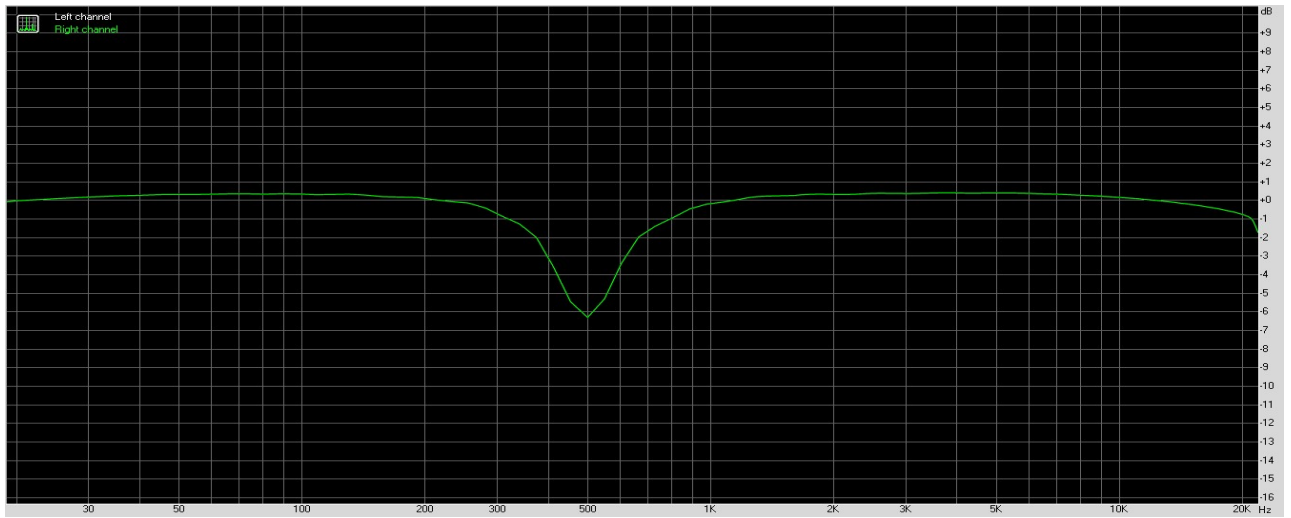
Na následujících obrázcích obr. 34, 35, 36, 37 jsou přenosové charakteristiky ekvalizéru pro různá nastavení filtrů.



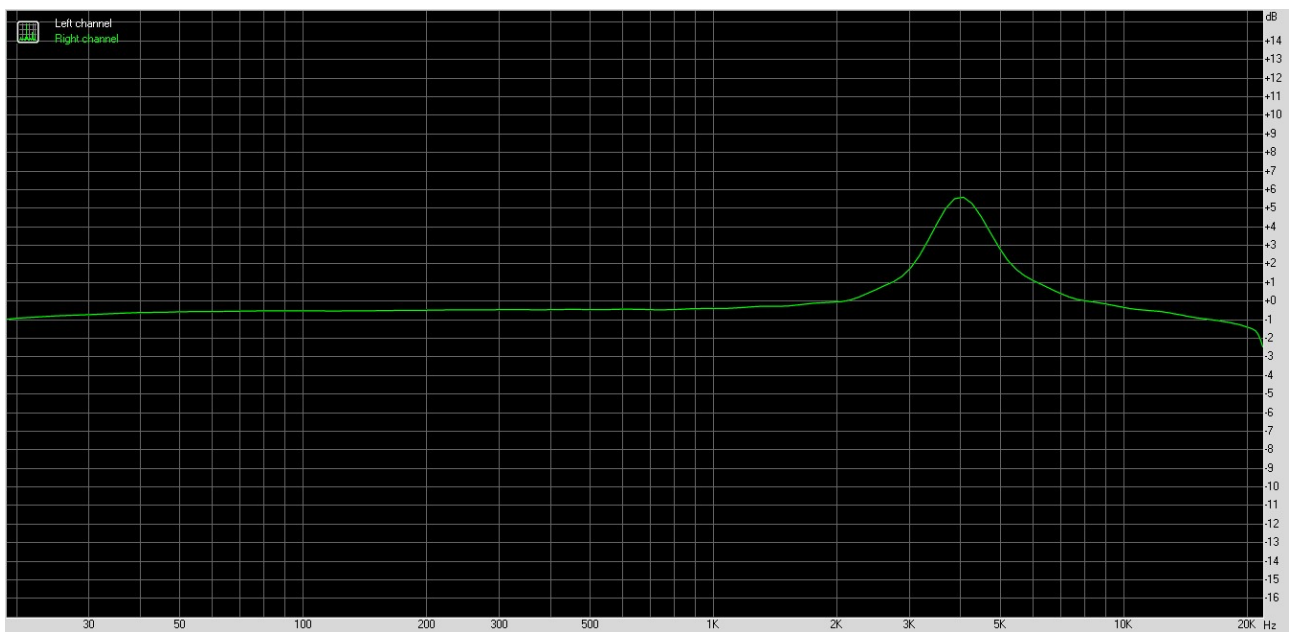
Obr. 34 Pásmo 4 KHz přenos 6 dB



Obr. 35 Pásmo 88 Hz přenos - 15 dB, pásmo 12,4 KHz přenos + 6 dB



Obr. 36 Pásmo 500 Hz přenos - 6 dB



Obr. 37 Pásmo 500 Hz přenos + 6 dB

### 7.3 Měření na komunikaci DAC s mikroprocesorem po sběrnici I2C

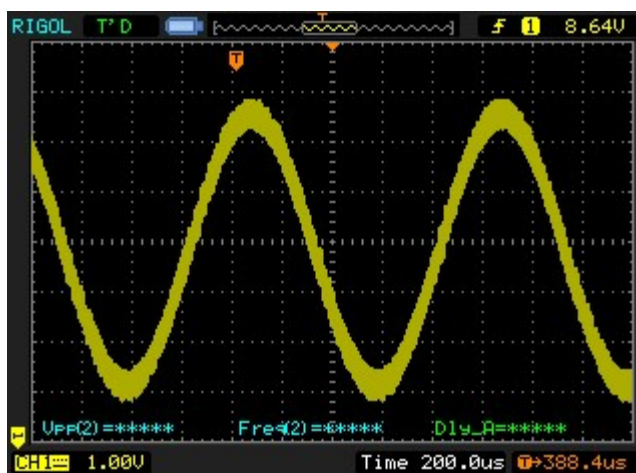
Komunikace probíhá podle katalogového listu [15] definovaném fast mode. Na snímku z osciloskopu obr. 38 je žlutě signál SDA a modře signál SCK.



Obr. 38 komunikace I2C

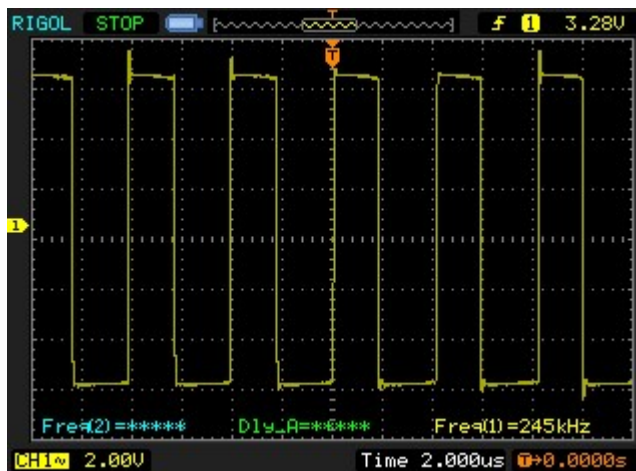
### 7.4 Měření na audio zesilovači

Na obr. 39 je výstupní signál ze zesilovače o frekvenci 1 KHz. Na požadovaný sinusový signál 1 KHz je superponován PWM signál spínacích můstků zesilovače ve třídě D, tento parazitní signál částečně proniknul na výstup přes výstupní filtr, ovšem signál je mimo pracovní pásmo reproduktoru i lidského sluchu, proto ve výsledném audio zvuku není.



Obr. 39 výstupní napětí zesilovače 1 KHz

Na následující obrázku je signál PWM z jednoho spínacího můstku zesilovače, signál má frekvenci 245 KHz.



Obr. 40 Výstupní signál PWM můstku zesilovače

## 8 Závěr

V diplomové práci byl popsán vývoj zařízení Inteligentního ozvučení prostoru, jeho výroba a naměřené výsledky. Naměřené parametry ekvalizéru pozitivně předčily má očekávání. Ekvalizér dosahuje audio parametrů srovnatelných s profesionální zvukovou kartou, proto může být použit například pro nahrávání ve studiu.

V rámci práce jsem navrhl metodu Efektivního výběru součástek, která zpřesnila návrh banky filtrů ekvalizéru. Tato metoda je univerzální, tedy s modifikacemi může být využita i pro jiné obvody, které jsou stavěny z vyráběných řad součástek. Metoda efektivního výběru součástek zpřesňuje funkci obvodu a šetří součástky na plošném spoji.

Zesilovač, předzesilovač a nabíječka splňují svoji funkci a mohou být použity jako přenosné ozvučení.

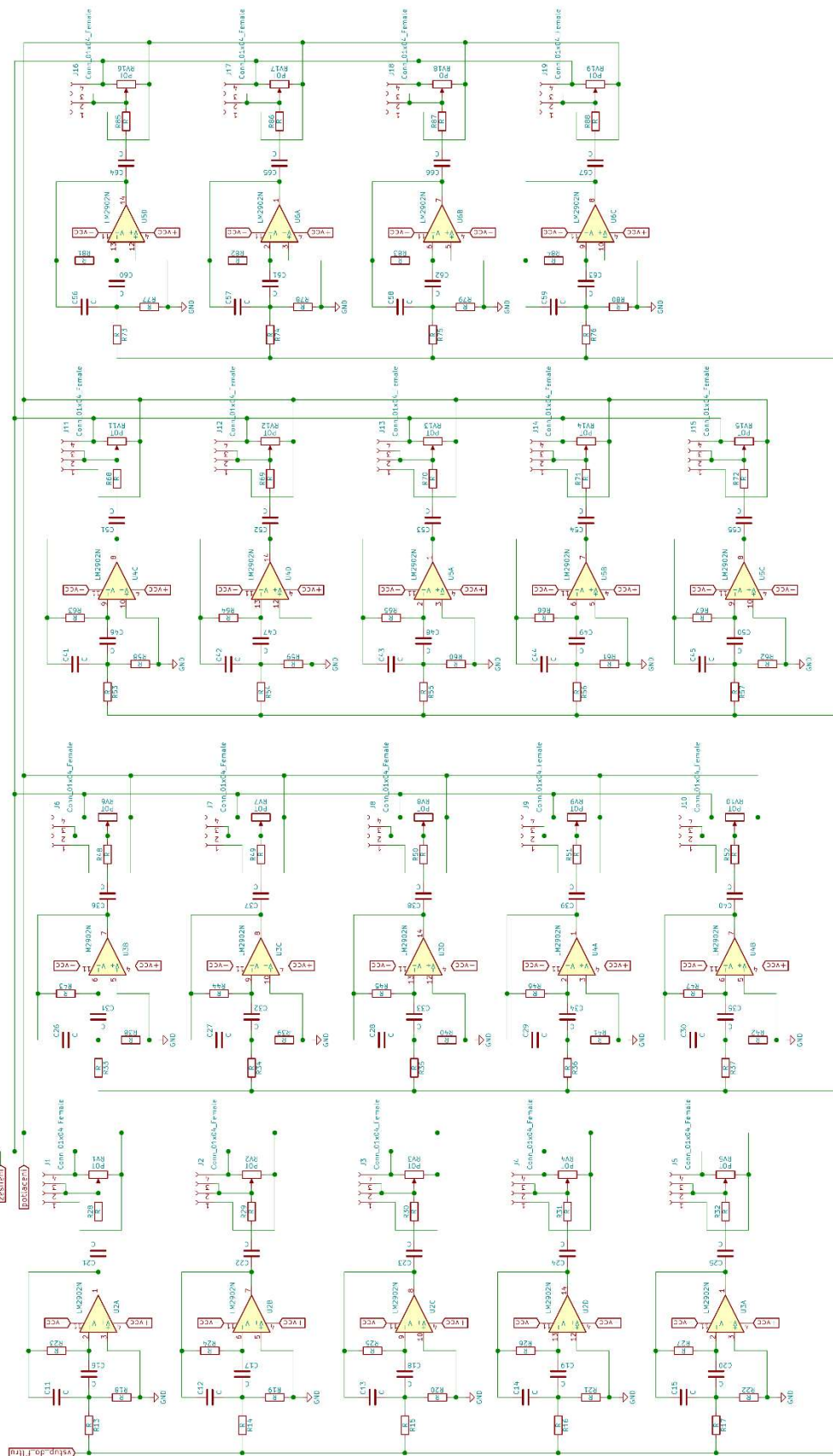
## 9 Použitá literatura

- [1] Self Douglas: Small Signal Audio Design, Focal Press, Burlington 2013, Focal Press ISBN 978-0-240-52613-3
- [2] Vobecký J., Záhlava V.: Elektronika - součástky a obvody, principy a příklady, Třetí rozšířené vydání, Grada Publishing, Praha 2005, 220s, ISBN 978-80-247-1241-3
- [3] Záhlava, V.: Návrh a konstrukce desek plošných spojů, BEN, Praha 2011 128s, ISBN 978-80-7300-266-4
- [4] KiCad EDA, A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite  
Dostupné z: <http://kicad-pcb.org/>
- [5] Rod Elliott Expandable Graphic Equaliser:  
Project 75 Dostupné z: <http://sound.westhost.com/project75.htm>
- [6] A. Bohn, Dennis: Constant-Q Graphic Equalizers. 1986, s. 16. Dostupné z:  
<http://www.rane.com/pdf/constanq.pdf>.
- [7] LTspice: Design Simulation and Device Models, Dostupné z:  
<http://www.linear.com/designtools/software/>
- [8] Analog Devices, Digital Potentiometers, Dostupné z:  
<http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/digital-potentiometers.html>
- [9] Mouser Electronics, Inc. motorized pot, Dostupné z:  
<https://eu.mouser.com/Search/Refine.aspx?Keyword=motorized+pot>
- [10] Right Mark: Audio Analyzer, Dostupné z:  
<http://www.rightmark.org/>
- [11] Reddy, Thomas, B., Linden, David: Linden's handbook of batteries. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2011, 1 v. (various pagings). ISBN 9780071624213.
- [12] Texas Instruments MSP430FR4133 Katalogový list dostupný z:  
<http://www.ti.com/product/MSP430FR4133>
- [13] Texas Instruments CD74HC4067 Katalogový list dostupný z:  
<http://www.ti.com/product/CD74HC4067>
- [14] Texas Instruments CCSTUDIO Code Composer Studio (CCS) Dostupné z:  
<http://www.ti.com/tool/CCSTUDIO>
- [15] Microchip, MCP4725 - Mixed Signal - System D/A Converters, Katalogový list dostupný z:  
<http://www.microchip.com/wwwproducts/en/en532229>

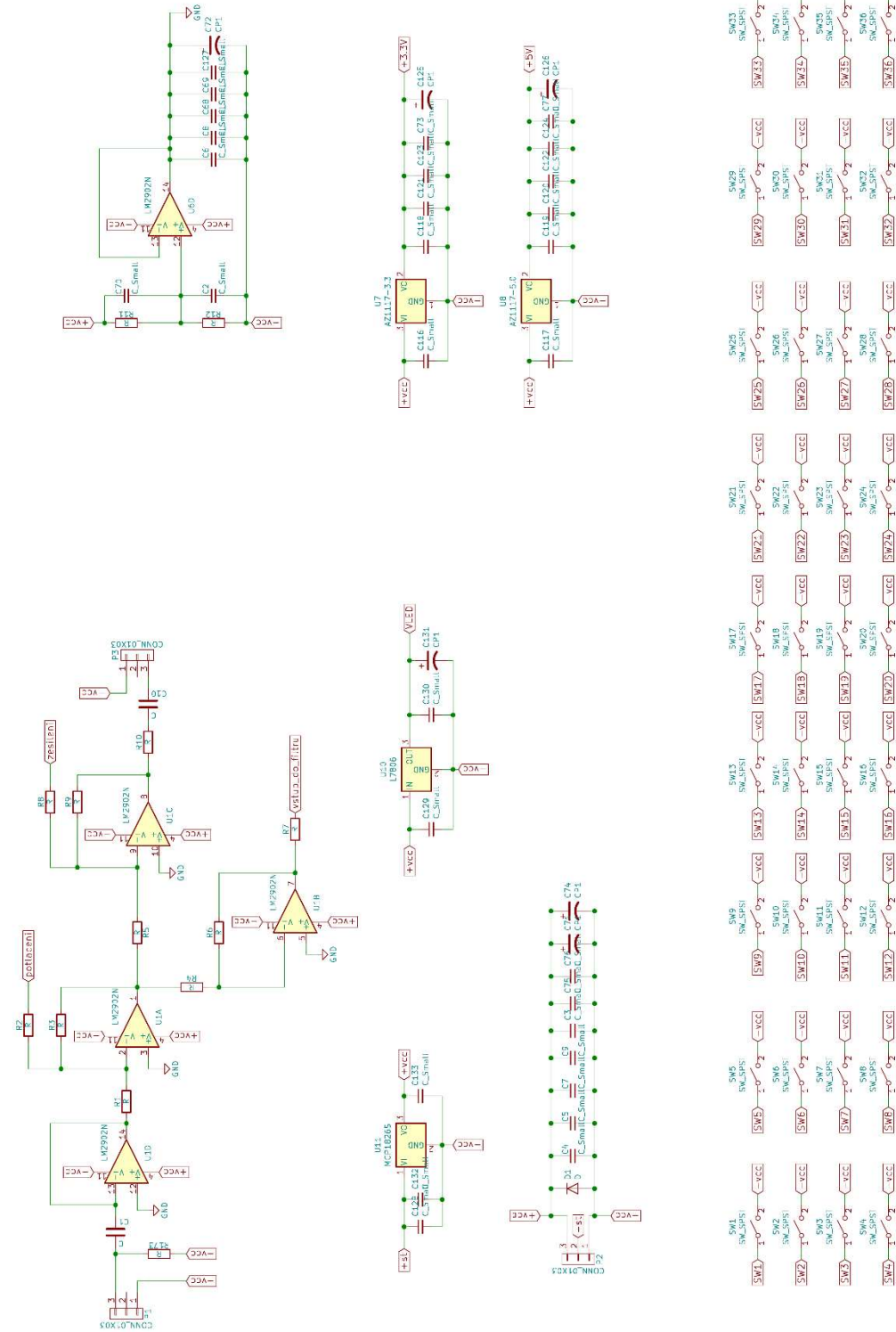
- [16] Texas Instruments TPA3122D2 Katalogový list dostupný z:  
<http://www.ti.com/product/TPA3122D2>
- [17] KiCad EDA, Dostupné z:  
<http://kicad-pcb.org/>
- [18] OPA1664AIDR Katalogový list dostupný z:  
<http://www.ti.com/product/OPA1664>
- [19] LM317 Katalogový list dostupný z:  
<http://www.ti.com/product/LM317>

## **10 Přílohy**

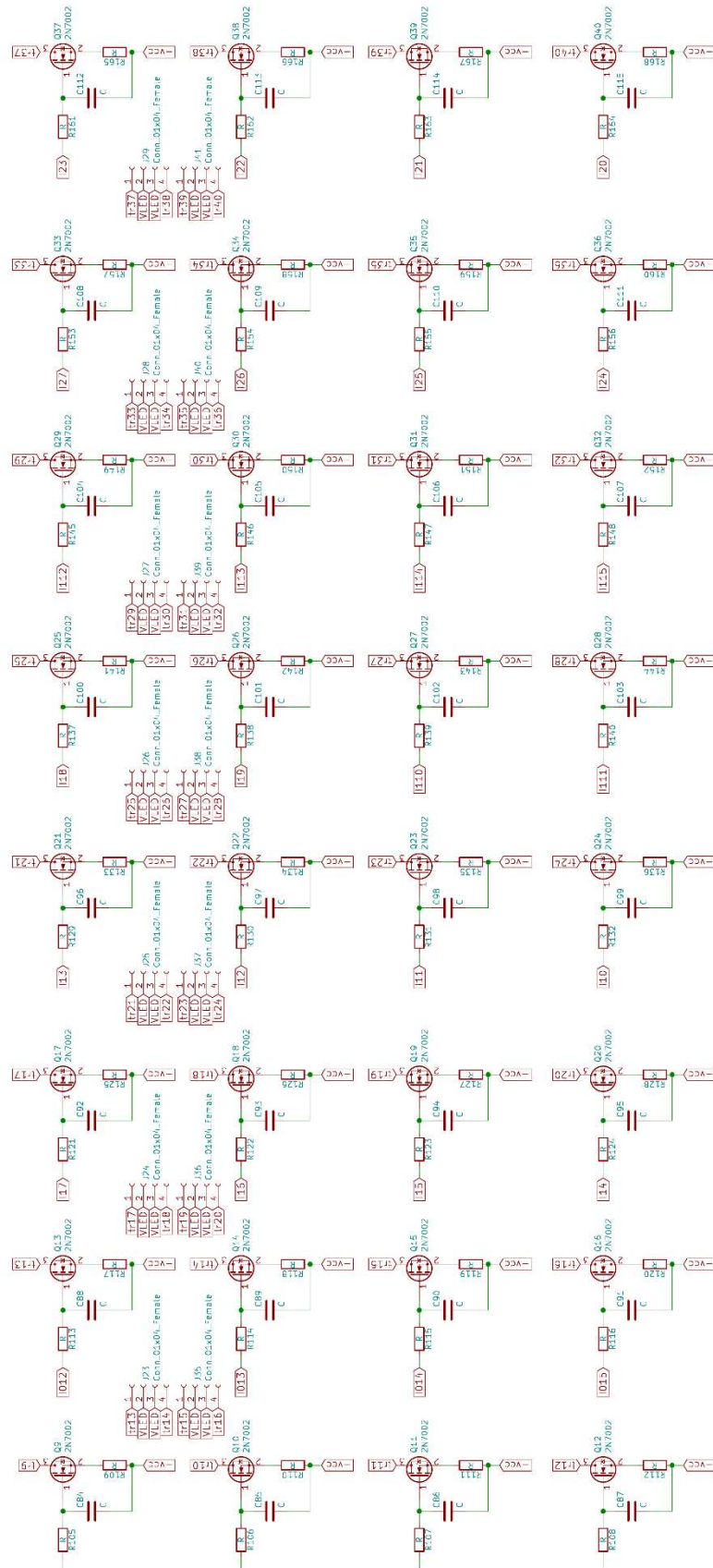




Obr. 41 Schéma filtrů banky ekvalizéru

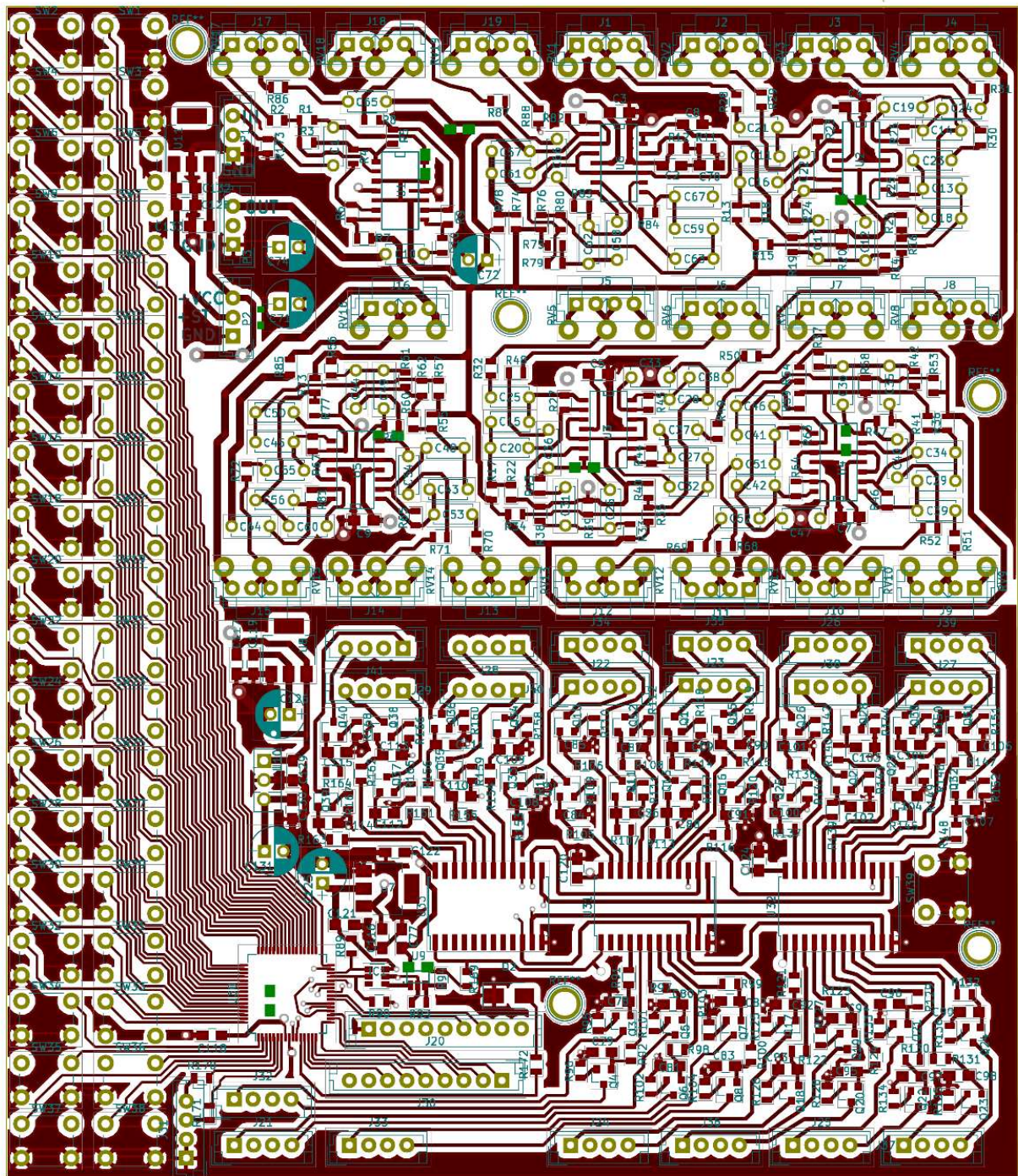


Obr. 42 Schéma sumačního obvodu, napájení a klávesnice

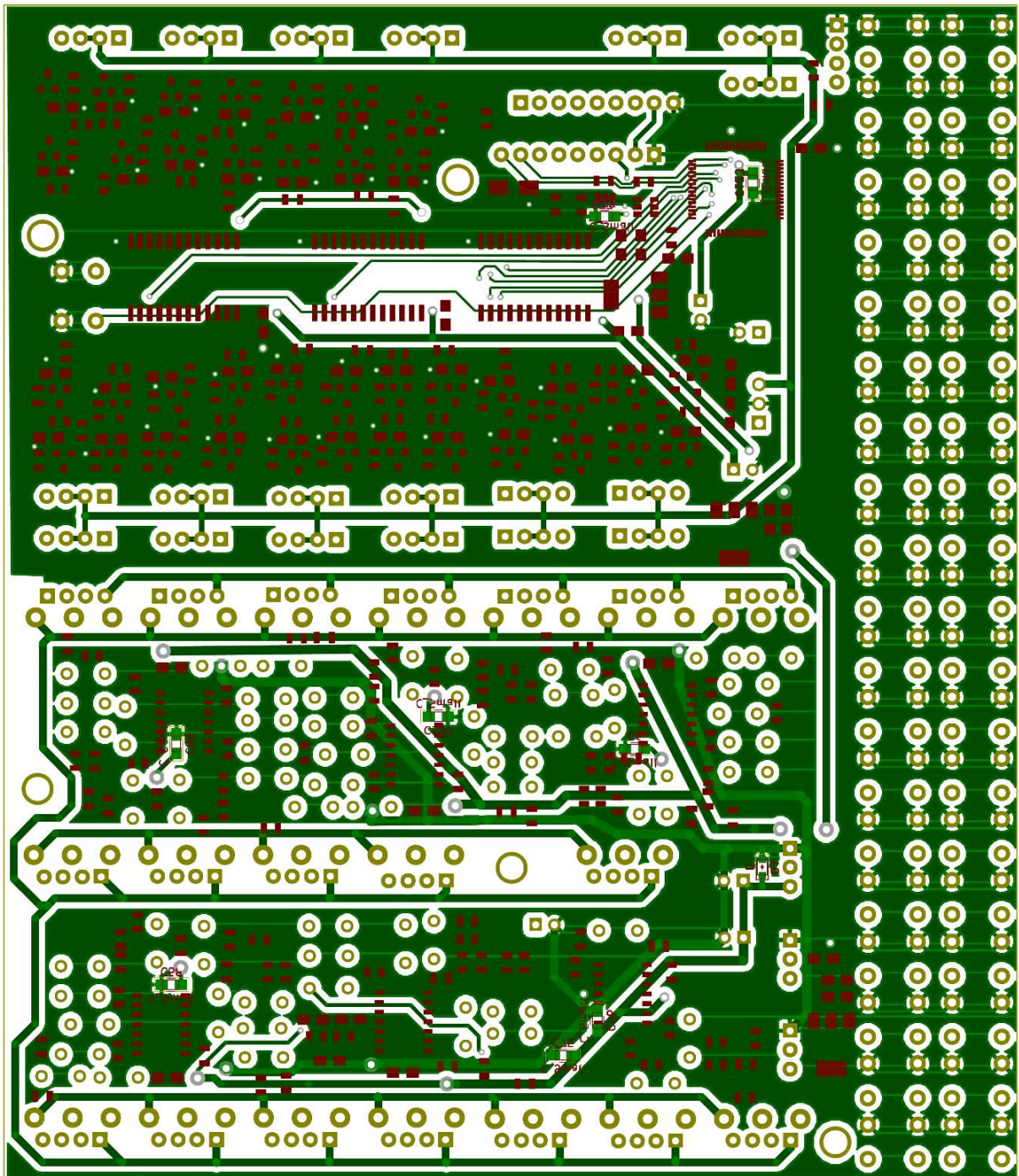


Obr. 43 Schéma zdrojů proudu

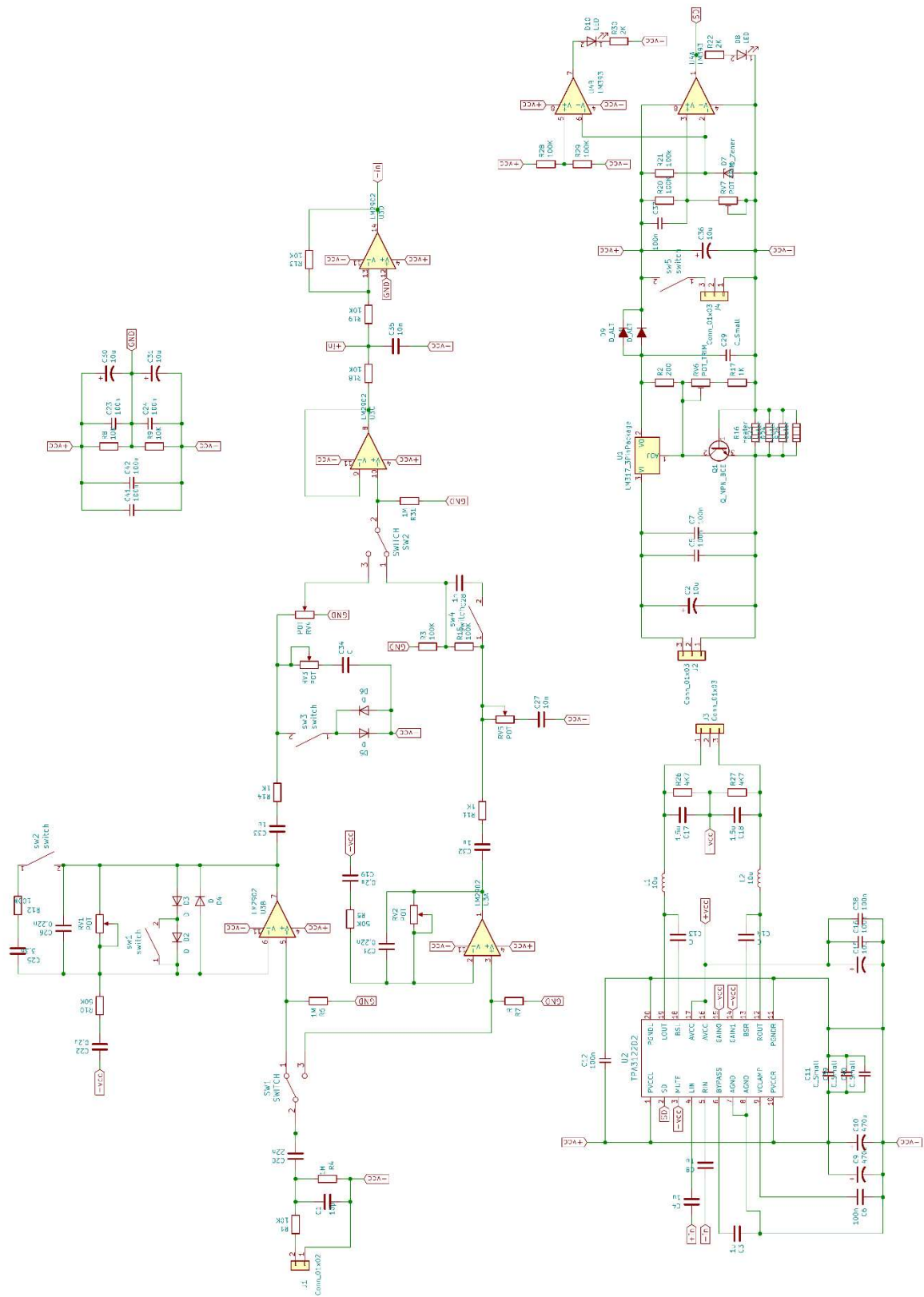




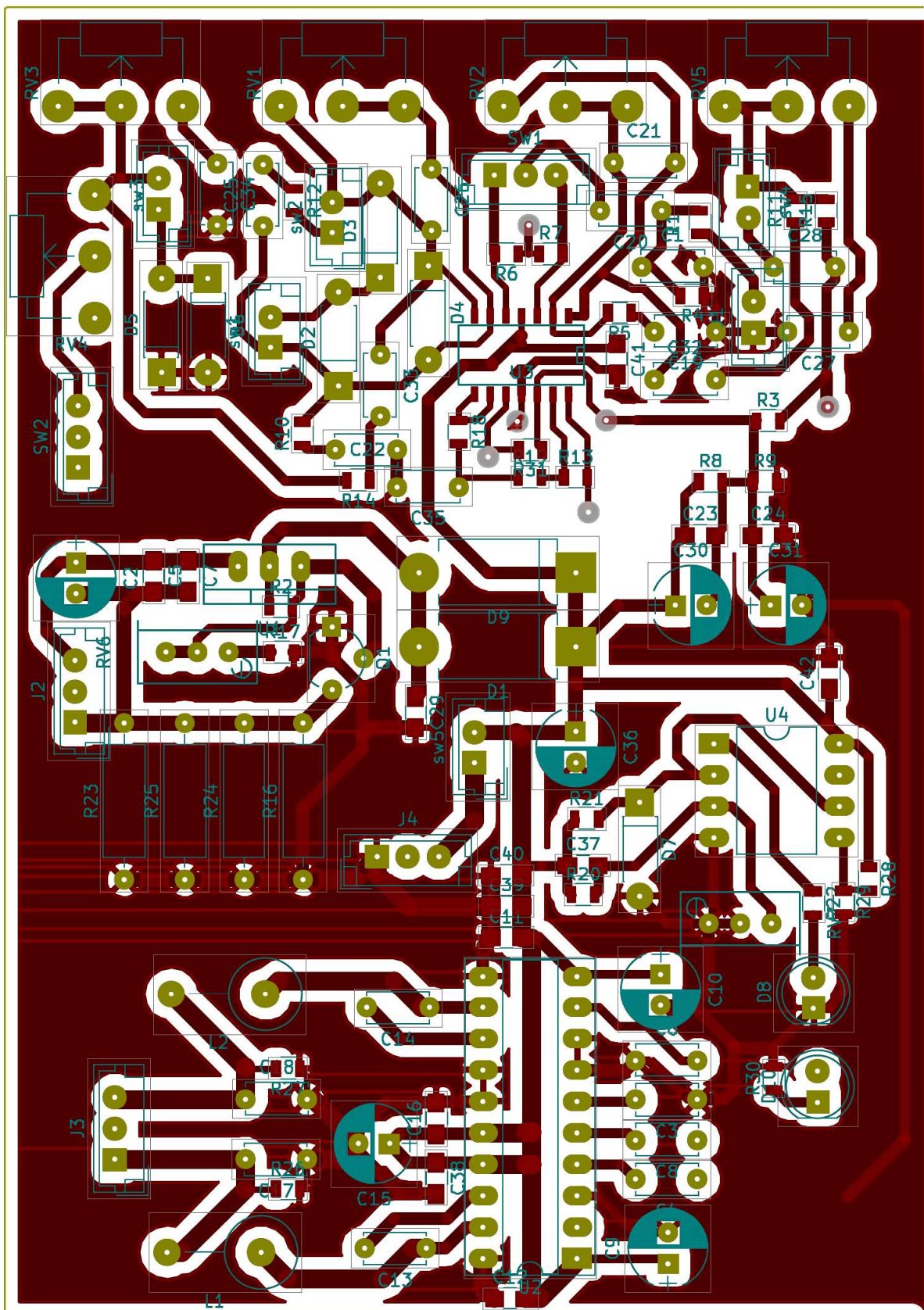
Obr. 45 Přední strana plošného spoje ekvalizéru



Obr. 46 Zadní strana plošného spoje ekvalizéru

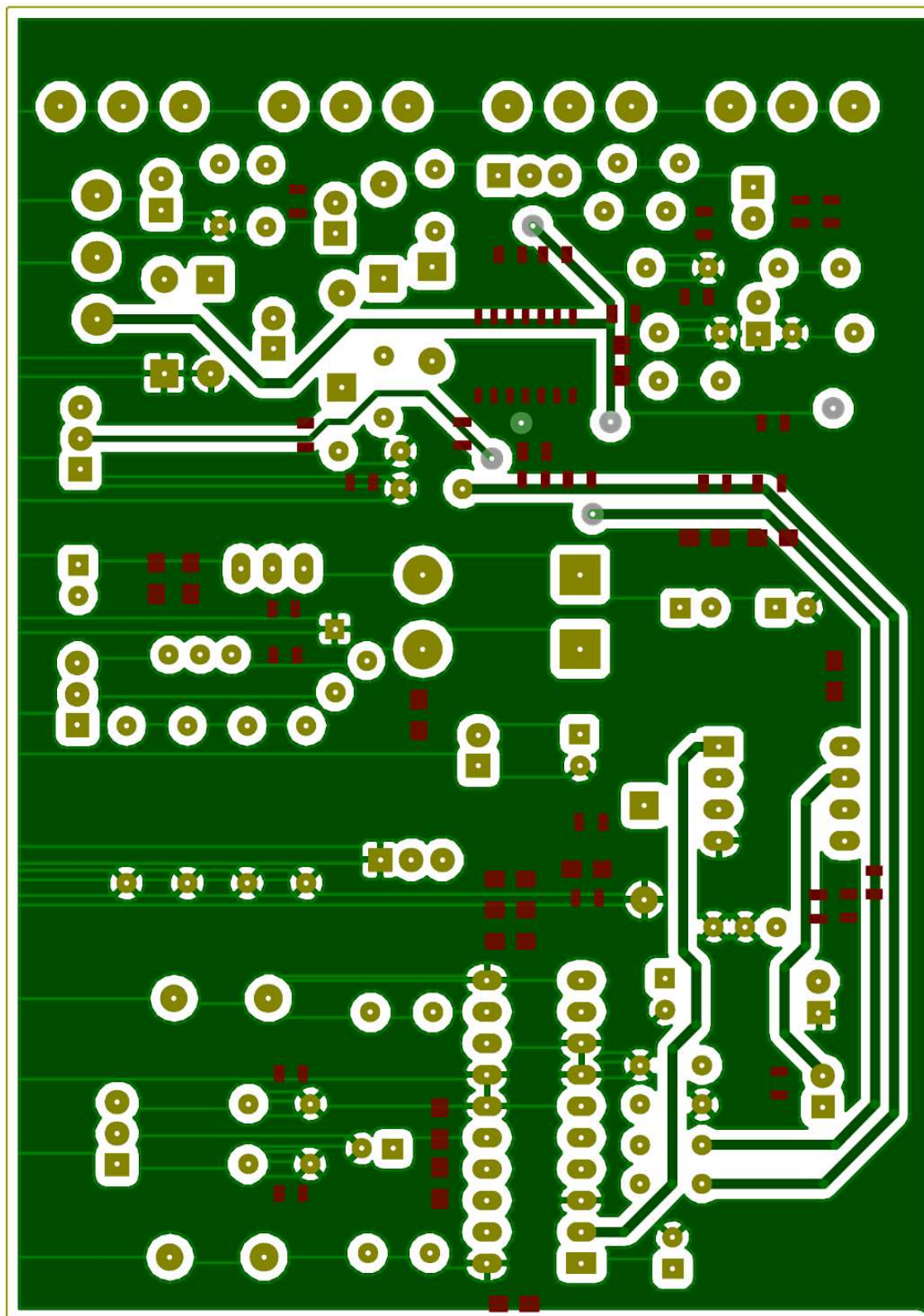


Obr. 47 Schéma zesilovače, předzesilovače, nabíječky, ochrany akumulátoru před přílišným vybitím

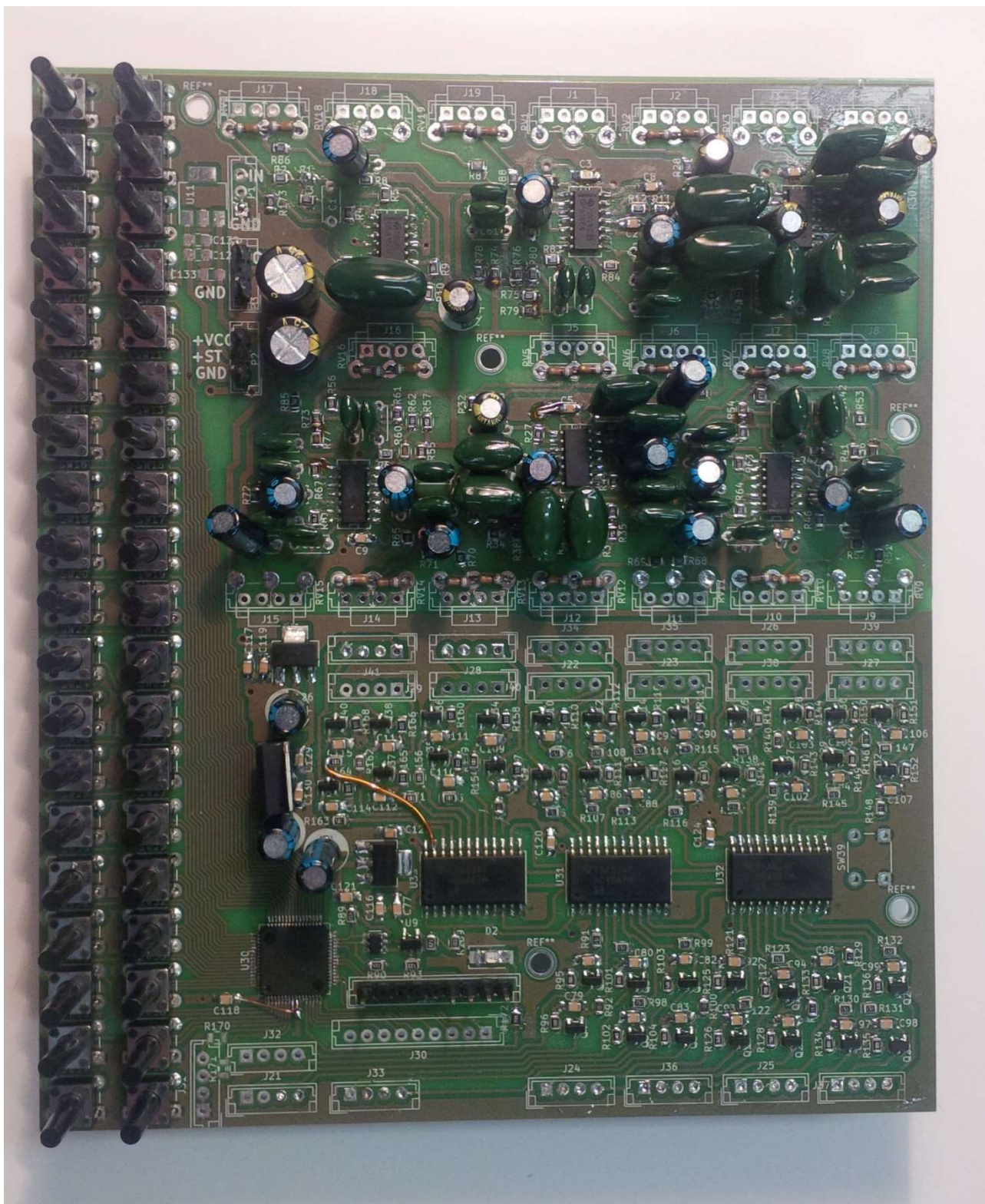


Obr. 48 Přední strana plošného spoje zesilovače, předzesilovače, nabíječky, ochrany akumulátoru před přílišným vybití

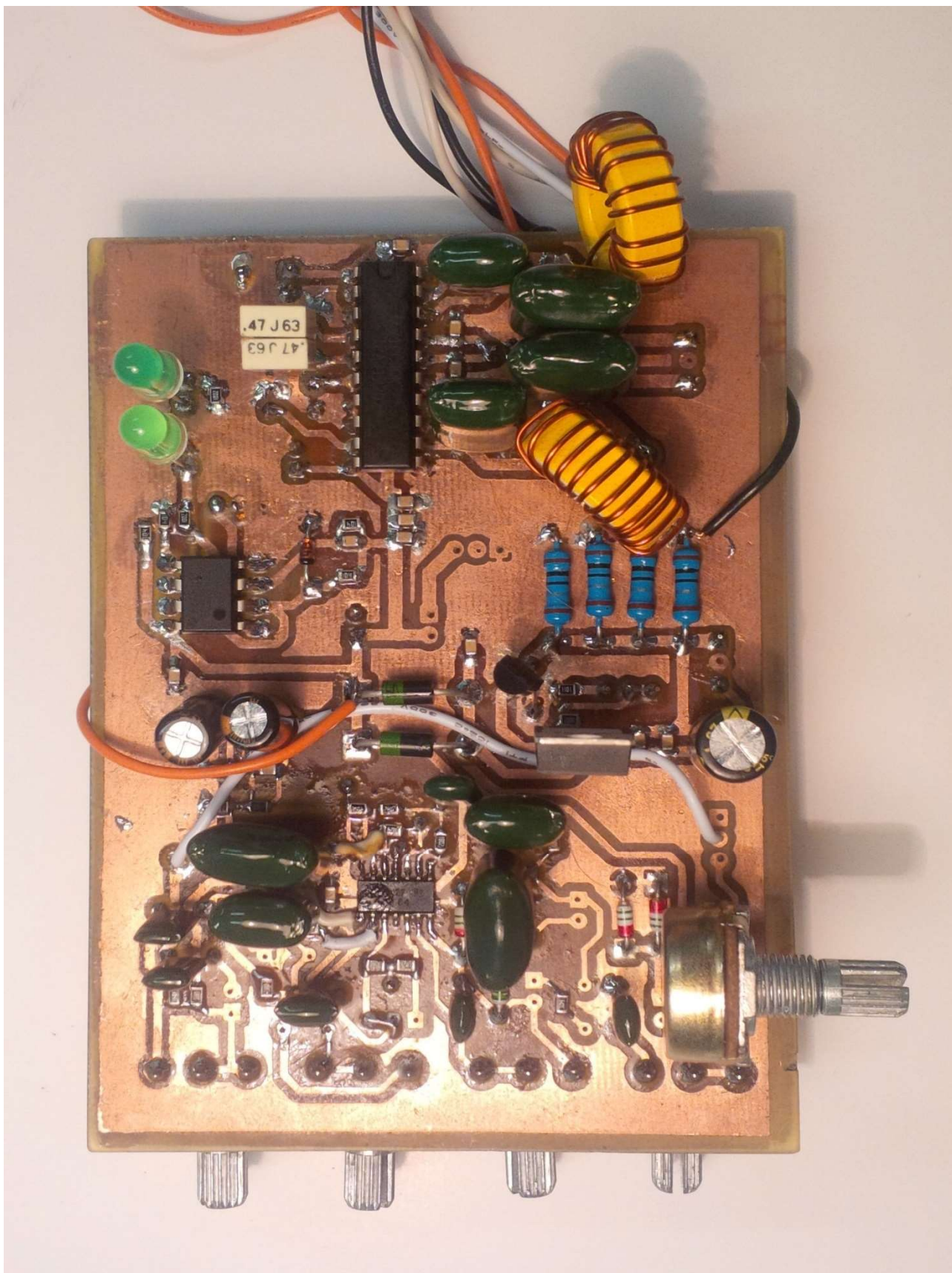




Obr. 49 Zadní strana plošného spoje zesilovače, předzesilovače, nabíječky, ochrany akumulátoru před přílišným vybitím



Obr. 50 Fotografie ekvalizéru



Obr. 51 Fotografie zesilovače, předzesilovače, nabíječky, ochrany akumulátoru před přílišným vybitím

## Seznam symbolů a zkratk

dB.....	Decibel
f.....	Frekvence
Hz.....	Jednotka frekvence
G.....	Zisk
HP .....	Horní propust
IO .....	Integrovaný obvod
OZ .....	Operační zesilovač
W.....	Watt – jednotka výkonu
Q.....	Činitel jakosti
R.....	Značka rezistoru
L.....	Značka cívky
C.....	Značka kondenzátoru
DPS .....	Deska plošného spoje
V.....	Volt – jednotka elektrického napětí
$\Omega$ .....	Ohm – jednotka elektrického odporu
MOSFET.....	Unipolární tranzistor
NMOS.....	Tranzistor s kanálem typu N
PMOS.....	Tranzistor s kanálem typu P
DAC.....	Digitálně – analogový převodník