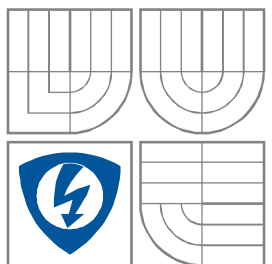


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MIKROKONTROLÉREM ŘÍZENÝ GRAFICKÝ EKVALIZÉR

THE MICROBASED GRAPHIC EQUALIZER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jiří Šmotek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Martin Dušek

BRNO, 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Jiří Šmótek

ID: 134631

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Mikrokontrolérem řízený grafický ekvalizér

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou korekce audiosignálu pomocí ekvalizéru a navrhnete vhodné rozložení kmitočtů jednotlivých pásem. Navrhnete blokovou strukturu číslicově řízeného ekvalizéru. Zvolte vhodné obvody, navrhnete obvodové schéma ekvalizéru a desky plošných spojů ekvalizéru. Zařízení osadte a oživte. Vytvořte obslužný program pro řízení vytvořeného zařízení, který bude umožňovat ovládat všechny jeho funkce i vzdáleně pomocí PC. Porovnejte dosažené vlastnosti a funkce vytvořeného zařízení s komerčně dostupnými ekvalizéry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KOTISA, Z. NF zesilovače. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2001.

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

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Martin Dušek

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou korekce audiosignálu pomocí ekvalizéru. V první části jsou probrány základní vlastnosti elektrických filtrů. Na ni pak volně navazuje další část práce zabývající se grafickým ekvalizérem a jeho návrhem. Navržené zapojení je odsimulováno v programu PSpice. Dále je nastíněno obvodové schéma a proveden návrh desek plošných spojů ekvalizéru, přičemž je namísto klasických potenciometrů použito digitálních potenciometrů. Předposlední část se zaměřuje na popis programu pro mikrokontrolér a PC. Poslední část je věnována měření zhotoveného přístroje.

KLÍČOVÁ SLOVA

Grafický ekvalizér, mikrokontrolér, digitální potenciometr

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with problems of correction of audio-signal by help of equalizer. The first part discusses the fundamental properties of electronic filters. The second part describes graphic equalizer and its schematics. A simulation of this suggested connection is executed in the PSpice software. Furthermore, the circuit diagram is presented and the proposal of PCB design equalizer is realized using the digital potentiometers instead of the classic potentiometers. Following part is then focused on description of a programme for the microcontroller and PC. The last part finally presents the measurement.

KEYWORDS

Graphic equalizer, microcontroller, digital potentiometer

Bibliografická citace

ŠMOTEK, J. *Mikrokontrolérem řízený grafický ekvalizér*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 54 s., 13 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Dušek.

Prohlášení

Prohlašuji, že svůj bakalářský projekt na téma Mikrokontrolérem řízený grafický ekvalizér 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 tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 31. května 2013

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Duškovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 31. května 2013

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Kmitočtové filtry	2
2.1	Typy filtrů	2
2.2	Dolní propust (DP)	3
2.3	Horní propust (HP)	4
2.4	Pásmová propust (PP)	5
2.5	Pásmová zádrž (PZ)	7
3	Ekvalizér	8
3.1	Grafický ekvalizér	8
3.2	Vícepásmový korektor	9
3.3	Návrh ekvalizéru	10
4	Koncepce zařízení	14
4.1	Deska ekvalizéru	14
4.2	Deska řízení	17
4.3	Deska tlačítek	18
4.4	Napájecí zdroj	18
5	Programové vybavení	19
5.1	Zdrojový kód pro funkci menu	20
5.2	Komunikace s displejem	21
5.3	Komunikace s digitálními potenciometry	22
5.4	Komunikace s PC	25
5.5	Program pro PC	25
6	Dosažené výsledky	27
6.1	Výsledky simulace	27
6.2	Výsledky měření	32
7	Závěr	37
	Bibliografie	38
	Seznam použitých zkratk	39
	Seznam obrázků	40
	Seznam tabulek	41

1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou korekce audio signálu pomocí grafického ekvalizéru a její následnou realizací. V první části jsou ve stručnosti rozebrány základní elektrické filtry hojně používané v nízkofrekvenční technice. Jedná se o filtry DP, HP, PP, PZ. Zvláště důležité je zapojení PP, kterého je posléze užito i pro koncepci samotného grafického ekvalizéru.

Další kapitola pak ve zkratce vymezuje vlastnosti ekvalizéru a ekvalizéru grafického, jsou v ní uvedena základní obvodová zapojení použitá pro následný návrh ekvalizéru. Jako výchozí parametr EQ byl zvolen počet 10 pásem a maximální míra zesílení na daných frekvencích ± 12 dB. Pro odladění zvolených parametrů EQ bylo použito programu PSpice.

Následující část pojednává o celkové koncepci grafického ekvalizéru řízeného mikrokontrolérem a stručně popisuje návrh jednotlivých desek plošných spojů a volby elektronických obvodů. Pro obvody ekvalizéru je použito digitálních potenciometrů.

Další kapitola komentuje programové vybavení MCU, popisuje funkci menu, komunikaci s displejem a obvody digitálních potenciometrů. Stručně je vysvětlena i funkce jednoduchého programu pro řízení ekvalizéru prostřednictvím PC.

V poslední části práce jsou uvedeny výsledky simulace z programu PSpice, krátce okomentovány a je provedeno srovnání hodnot pro dva obdobné obvody, přičemž pro realizaci výsledného zařízení je užito zapojení, jež dosahuje lepších hodnot. Tato kapitola se podrobněji věnuje také měření zhotoveného přístroje.

2 KMITOČTOVÉ FILTRY

Kmitočtové filtry tvoří základní blok nejrozličnějších elektronických zařízení. Jejich vlastnosti jsou užívány např. v elektroakustice, vř. technice, nejrozličnějších měřících zařízeních, datových systémech atd.

Kmitočtové filtry jsou elektrické obvody, které určitým způsobem upravují spektrum jimi procházejícího signálu. V zásadě lze rozdělit jejich působnost na tři pásma, pásmo propustnosti – zde procházející signál není nijak utlumen (případně velmi málo), pásmo nepropustnosti – zde dochází k požadovanému útlumu, a pásmu přechodnému, které leží mezi těmito dvěma zmíněnými pásmy. Tato uvedená struktura platí pro reálné filtry, v případě filtrů ideálních je přechodné pásmo zanedbáno. [1]

2.1 Typy filtrů

Základními vlastnostmi kmitočtových filtrů je typ filtru a mezní frekvence. Pro návrh je nutné znát také modul přenosu a fázový posun. Modul přenosu můžeme vyjádřit následovně: [2]

$$K_u = \frac{U_2}{U_1}, \quad (2.1)$$

K_u modul přenosu

U_1 amplituda vstupního signálu

U_2 amplituda výstupního signálu.

Obvykle se však přenos udává v logaritmické míře, poté můžeme vztah přepsat do této podoby:

$$K_u[\text{dB}] = 20 \cdot \log \frac{U_2}{U_1}. \quad (2.2)$$

Pro fázový posun platí:

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1, \quad (2.3)$$

φ výsledný fázový posuv

φ_1 fáze vstupního signálu

φ_2 fáze výstupního signálu.

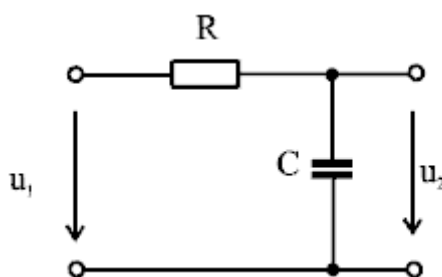
Základním parametrem jakéhokoliv elektrického filtru je mezní kmitočet - f_m . Jedná se o frekvenci, na níž dochází útlumu hodnoty přenosu o 3 dB vzhledem k hodnotě maximálního přenosu, neboli jedná se o hodnotu, kdy přenos dosahuje hodnoty $K_u = \frac{K_{u\max}}{\sqrt{2}} \doteq 0,707 K_{u\max}$.

Důležitý parametr elektrických filtrů je také hodnota strmosti. Ta udává, jakým způsobem se mění hodnota útlumu v nepropustném pásmu od f_m . Její hodnota je uváděna v dB/dek. případně dB/okt. Při vyjádření strmosti v dB/dek tento poměr vyjadřuje rozdíl přenosu v dB na kmitočet a desetinásobku tohoto kmitočtu. Pro základní filtry prvního řádu je hodnota strmosti 20 dB/dek, pro druhý řád 40 dB/dek atd.

V případě vyjádření hodnoty strmosti v dB/okt je rozdíl stanoven hodnotou na frekvenci a dvojnásobku této frekvence, tedy oktávě. Tato jednotka je obvykle užívána v elektroakustice a základní hodnota strmosti je 6 db/okt pro filtry prvního řádu, pro filtry druhého řádu 12 db/okt.

2.2 Dolní propust (DP)

Základním zapojením filtru dolní propusti je RC článek, jenž se v literatuře označuje také pod názvem integrační článek, neboť plní funkci matematické integrace. Napětí na výstupu článku je integrací napětí na vstupu podle času. Tento filtr propouští nejnižší kmitočty, tedy i stejnosměrnou složku, až po mezní kmitočet filtru, též nazývaný jako horní mezní kmitočet f_m . V ideálním případě je útlum v propustném pásmu nulový a frekvence vyšší než f_m dosahují požadovaného útlumu. Zapojení obsahuje jen jeden akumulací prvek – kondenzátor, stejné obvodové funkce by šlo dosáhnout záměnou rezistoru za cívku a kondenzátoru za rezistor, takové zapojení se ale obvykle kvůli parazitním vlastnostem cívky užívá méně často.



Obr. 2.1 Schéma zapojení dolní propusti DP

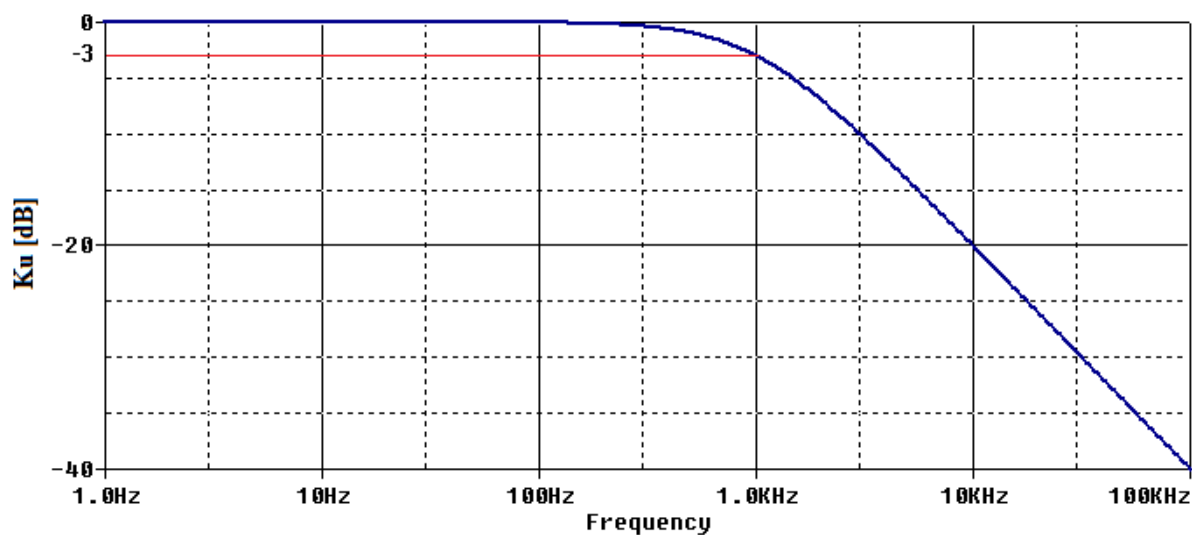
Mezní kmitočet je vyjádřen následovně:

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (2.4)$$

τ časová konstanta článku, $\tau = R \cdot C$.

Pro přenos platí: [3]

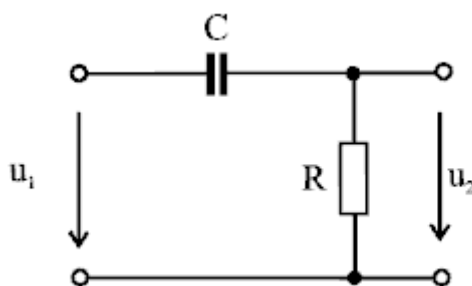
$$K_u(j\omega) = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + R} = \frac{1}{1 + j\omega CR} = \frac{1}{1 + j\omega\tau} \quad (2.5)$$



Obr. 2.2 Modulová charakteristika dolní propusti DP

2.3 Horní propust (HP)

Jedná se o filtr nazývaný také CR článek, případně článek derivační, neboť analogicky s předchozím typem filtru, je napětí na výstupu článku derivací napětí vstupního podle času. Jeho funkce je přesně opačná jako v případě dolní propusti, tedy kmitočty nižší než mezní frekvence f_m propouští s útlumem a vyšší kmitočty prochází článkem bez útlumu. Používá se velmi často k oddělení stejnosměrné složky, či jako vazební článek zajišťující oddělení pracovních bodů dvou bloků. Obvod stejně jako v předchozím případě obsahuje pouze jeden akumulací prvek – kondenzátor, stejné obvodové funkce by šlo opět dosáhnout i pomocí zapojení cívky.

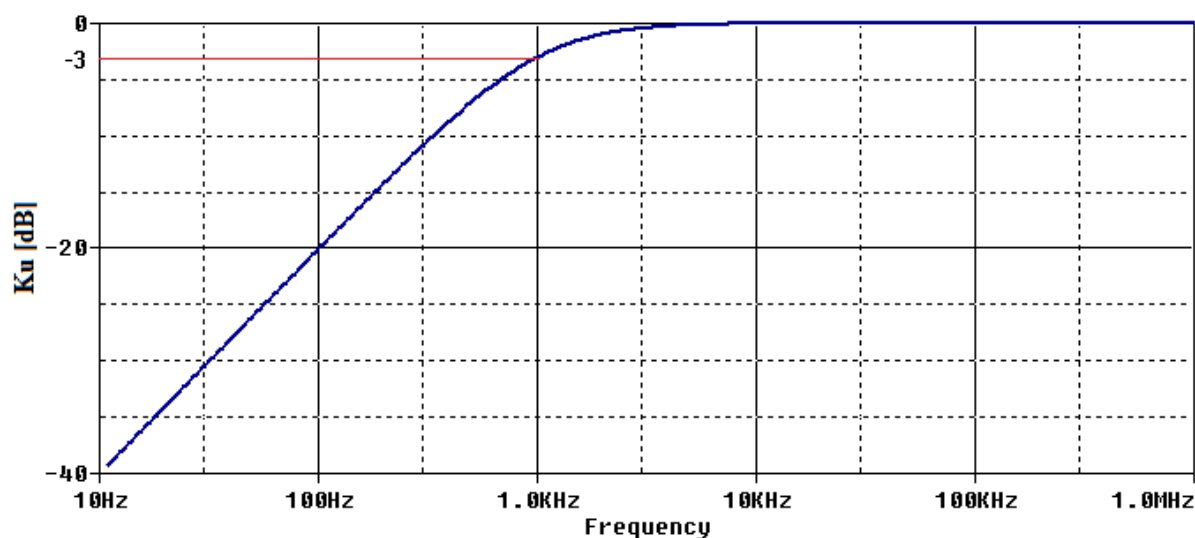


Obr. 2.3 Schéma zapojení horní propusti HP

Mezní kmitočet je stejný s předchozím zapojením.

Přenos je roven: [3]

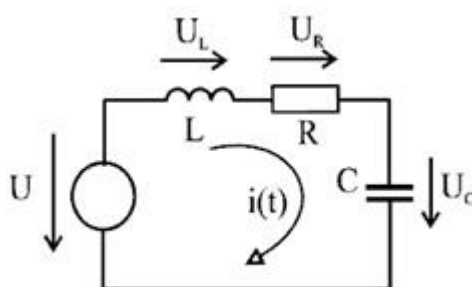
$$K_u(j\omega) = \frac{R}{\frac{1}{j\omega C} + R} = \frac{j\omega CR}{1 + j\omega CR} = \frac{j\omega\tau}{1 + j\omega\tau}. \quad (2.6)$$



Obr. 2.4 Modulová charakteristika horní propusti HP

2.4 Pásmová propust (PP)

Tento filtr, propouští frekvence signálu pouze v určitém okolí požadované střední frekvence. Toto zapojení je možné realizovat kombinací horní a dolní propusti, ale v praxi se častěji užívá zapojení tzv. rezonančních obvodů (sériového) obsahující 2 akumulční prvky – kapacitor a induktor. Důvodem je požadavek na větší selektivnost filtru, jež zapojení s RC články nelze dosáhnout. Selektivnost filtru vyjadřuje parametr zvaný činitel jakosti Q .



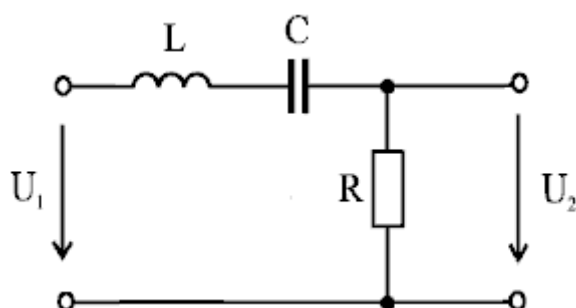
Obr. 2.5 Zapojení sériového rezonančního obvodu

Pro rezonanční kmitočet platí: [3]

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.7)$$

Činitel jakosti je roven:

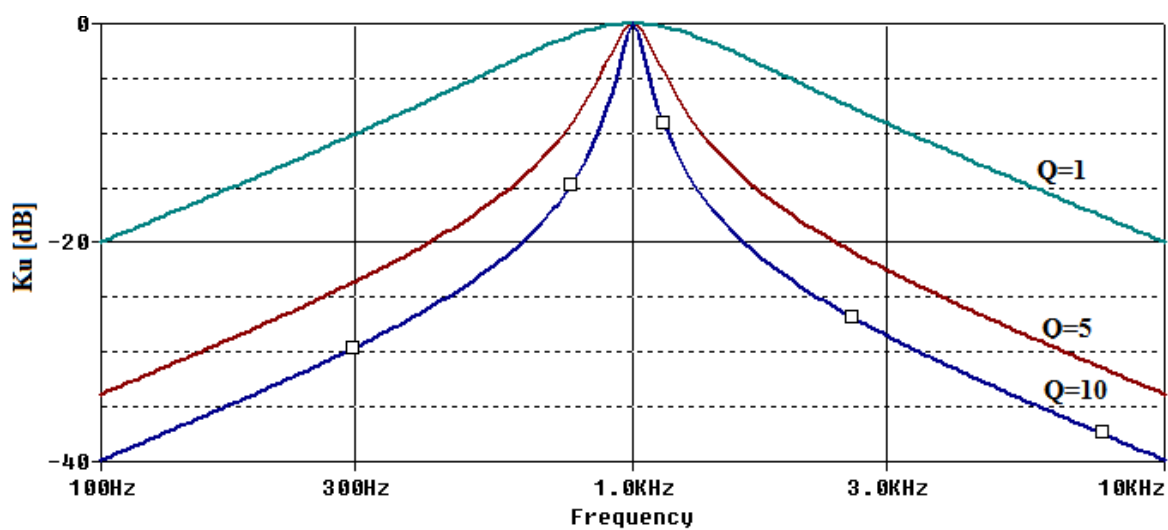
$$Q = \frac{2\pi f_r L}{R} = \frac{1}{2\pi f_r C R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.8)$$



Obr. 2.6 Schéma zapojení pásmové propusti PP

Přenos daného obvodu:

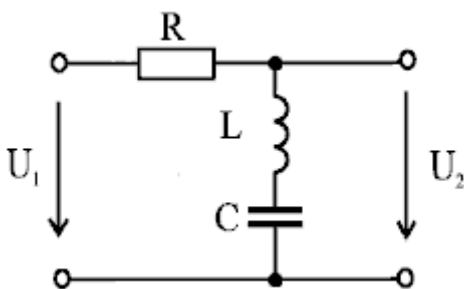
$$K_u(j\omega) = \frac{R}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + R} = \frac{j\omega RC}{1 - j\omega RC - \omega^2 LC} \quad (2.9)$$



Obr. 2.7 Modulová charakteristika pásmové propusti PP pro různé činitele jakosti

2.5 Pásmová zadrž (PZ)

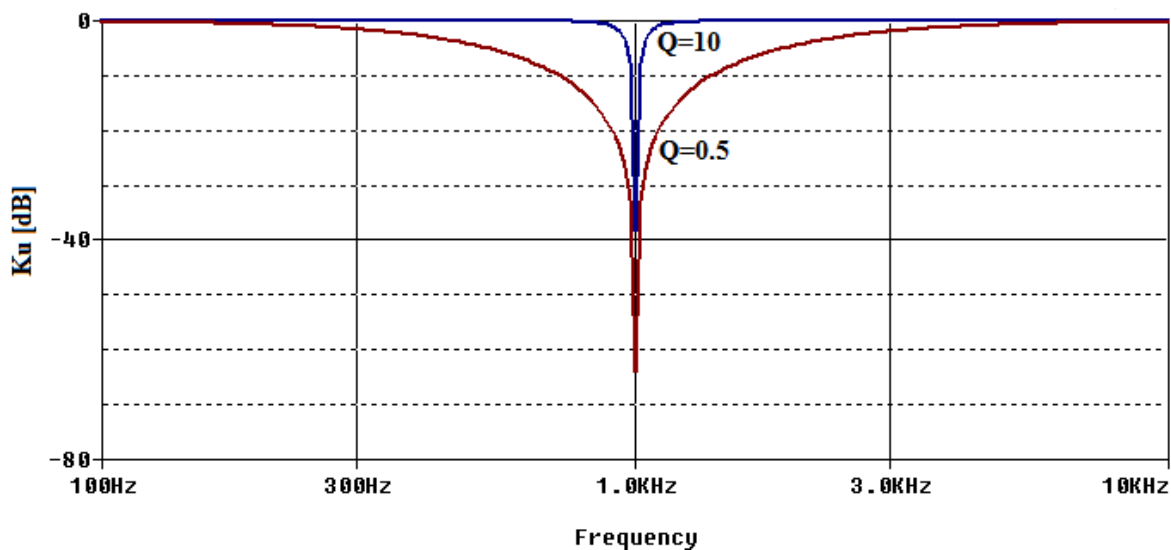
Tento filtr analogicky k pásmové propusti naopak propouští všechny frekvence kromě rezonanční frekvence bez útlumu. Využívá se často například pro potlačení síťového kmitočtu 50 Hz superponovaný na užitečný signál. Pro rezonanční kmitočet a činitel jakosti platí stejné vztahy jako pro PP.



Obr. 2.8 Schéma zapojení pásmové zadrž PZ

Přenos daného obvodu je roven:

$$K_u(j\omega) = \frac{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + R} = \frac{j\omega L}{1 - j\omega RC - \omega^2 LC} \quad (2.10)$$



Obr. 2.9 Modulová charakteristika pásmové zadrž PZ pro různé činitele jakosti

3 EKVALIZÉR

V předchozí kapitole byly uvedeny základní typy filtrů. V nízkofrekvenční technice se různé druhy korektorů používají velmi často. Již při samotném snímání zvuku a následné hudební produkci je za účelem dosažení, co nejlepšího výsledku těmto nahrávkám dopomáháno pomocí nejrůznějších frekvenčních korektorů.

Ekvalizér je zařízení, které upravuje modulovou charakteristiku procházejícího nízkofrekvenčního signálu a nejčastěji se užívá pro korekci nedokonalostí audio řetězce, kdy je požadavkem upravit spektrum signálu tak, aby při reprodukci pomocí reprosoustav alespoň částečně eliminovala neduhy poslechového prostoru, případně nevyrovnanou kmitočtovou charakteristiku samotných reprosoustav. Je možné pomocí tohoto zařízení různým nastavením dosáhnout třeba lepší srozumitelnosti řeči, ale i vyniknutí jednotlivých nástrojů při produkci atd.

Základním ekvalizérem je korektor basů a výšek, který se poměrně často vyskytuje v nejrůznějších integrovaných zesilovačích. Je-li nastavitelných pásem víc než dvě, obvykle 5 a víc, jsou ekvalizéry konstruovány jako grafické.

3.1 Grafický ekvalizér

Grafický EQ je koncipován tak, že člověku slyšitelné kmitočtové pásmo (20Hz-20KHz) je rozděleno na několik pásem a u každého tohoto pásma je možné nastavit v určitém rozsahu hodnotu zesílení. Vzhledem k tomu, že pro zmíněné nastavování se obvykle užívají tahové potenciometry, každému z nich je přiřazeno jedno frekvenční pásmo, umístěné vedle sebe na předním panelu přístroje, je pak při pohledu přímo patrný tvar nastavené korekční křivky.

Základní grafické ekvalizéry mají možnost nastavit pouze zesílení na výrobcem stanoveném kmitočtu, propracovanější pak mají možnost nastavit nejen zesílení, ale i centrální kmitočet upravovaného pásma, a také činitel jakosti pásmové propusti, čímž je regulována šířka pásma ovlivněné frekvenční oblasti. Tyto ekvalizéry pak nazýváme parametrické. Užívají se obvykle tam, kde klasickým ekvalizérem nelze dosáhnout požadovaného průběhu. Pro laika je obsluha poněkud obtížnější, neboť správné nastavení vyžaduje hlubší teoretické znalosti než pro obsluhu klasického grafického ekvalizéru s pevně nastavenou frekvencí a činitelem jakosti. [4]

Základními parametry ekvalizéru je volba potlačení, či zesílení, nejčastěji se používají hodnoty ± 6 dB, ± 12 dB a ± 15 dB. Dalším důležitým parametrem je počet pásem. S ohledem na tento parametr je k dispozici ekvalizér oktávový (10 pásem), 2/3 oktávový (15 pásem) a 1/3 oktávový (31 pásem). Střední frekvence pro jednotlivé typy je standardizována a uvádí ji následující tabulka. V případě jiného počtu pásem než uvedeného oktávového rozdělení se střední frekvence volí výběrem hodnot frekvencí z 1/3 oktávového rozdělení. [2]

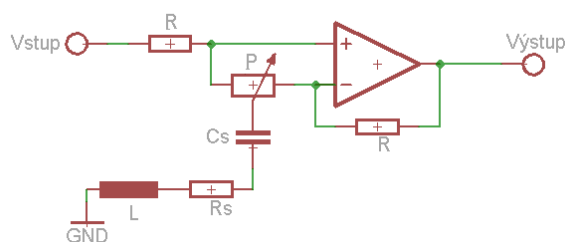
Tab. 3.1 Korekční kmitočty grafických ekvalizérů

1 okt	2/3 okt	1/3 okt	1 okt	2/3 okt	1/3 okt	1 okt	2/3 okt	1/3 okt	1 okt	2/3 okt	1/3 okt
		20	125		125			800			5 K
	25	25		160	160	1 K	1K	1 K		6,3 K	6,3 K
31,5		31,5			200			1,25 K	8 K		8 K
	40	40	250	250	250		1,6K	1,6 K		10 K	10 K
		50			315	2 K		2 K			12,5 K
63	63	63		400	400		2,5K	2,5 K	16 K	16 K	16 K
		80	500		500			3,15 K			20 K
	100	100		630	630	4 K	4K	4 K			

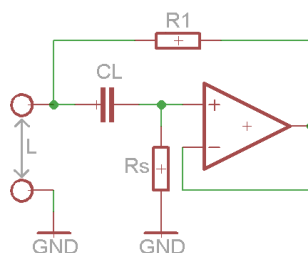
3.2 Vícepásmový korektor

Jako základ bylo zvoleno zapojení na Obr. 3.1 je v paralelním zapojení potenciometru, na jejichž jezdec je připojen LRC článek, mající sériový odpor R_s a rezonanční kmitočet f_r . Pod tímto kmitočtem má článek induktivní charakter impedance a nad ním naopak charakter kapacitní impedance. Strmost změny impedance je dána činitelem jakosti Q . [5]

V zapojení je namísto cívky použito zapojení syntetické indukčnosti Obr. 3.2. Klasické indukčnosti není užito, neboť v takovýchto obvodech vychází hodnota indukce pro nejnižší frekvence ekvalizéru v řádech jednotek až desítek H, což je značně nevýhodné z hlediska konstrukce i ceny. Syntetická indukčnost je realizována pomocí gyrátoru, což je impedanční převodník převádějící kapacitu na indukčnost.

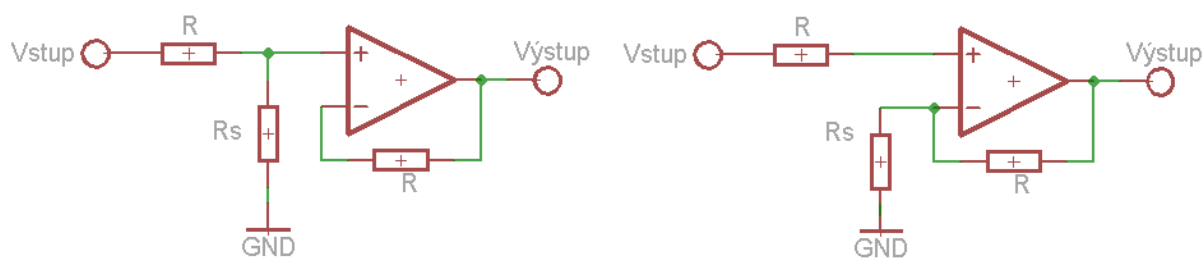


Obr. 3.1 Zapojení pásmového filtru [4]



Obr. 3.2 Schéma syntetické indukčnosti [4]

Pokud je splněno $R_1 \gg R_s$, pro indukčnost platí:



Obr. 3.3 Zapojení pro minimální přenos vlevo a maximální přenos vpravo [1]

$$L = C_L R_S R_1 , \quad (3.1)$$

R_S sériový odpor indukčnosti.

Pokud je potenciometr P nastaven na střed dráhy, chová se zapojení jako napěťový sledovač s jednotkovým zesílením. V případě potenciometru v horní poloze RLC vytvoří na neinvertujícím vstupu napěťový dělič a na rezonančním kmitočtu tak dochází k zeslabení. Pokud je potenciometr nastaven do dolní polohy, je zapojen jako dělič v záporné zpětné vazbě a na rezonančním kmitočtu dochází k zesílení amplitudy signálu. [6]

Maximální a minimální hodnota přenosu se rovná:

$$K_{Umin} = \frac{R_S}{R + R_S}, \quad (3.2)$$

$$K_{Umax} = \frac{R + R_S}{R_S}. \quad (3.3)$$

3.3 Návrh ekvalizéru

Pro samotnou realizaci bylo použito principiální zapojení zmíněné v předešlé kapitole. Tedy základem pro mnou vytvořené zapojení byl diferenční zesilovač s paralelně zapojenými potenciometry, na jejichž jezdec jsou připojeny LRC články, přičemž indukčnost je zhotovena zapojením gyrátoru. Namísto klasických potenciometrů je aplikováno elektronického potenciometru a vzhledem k ceně digitálních potenciometrů, která by v případě volby 15 pásem znamenala výrazné navýšení celkových nákladů, byl zvolen kompromis, 10 pásem.

Nejprve je nutné určit parametry výsledného ekvalizéru. Byla zvolena maximální míra potlačení či zesílení ± 12 dB, což je v praxi běžná hodnota a plně vyhovuje. Dále je třeba určit počet pásem ekvalizéru, pro 10 pásem vychází dle tabulky hodnoty frekvence následovně: 31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 KHz, 2 KHz, 4 KHz, 8 KHz, 16 KHz.

Prvním krokem v návrhu velikost odporu R , v praxi se obvykle užívají hodnoty jednotek až desítek $k\Omega$. Bylo zvoleno $R = 4,7 k\Omega$. Dalším krokem je volba činitele jakosti Q , pro nějž platí následující vzorec: [7]

$$Q = \frac{\sqrt{2^N}}{2^N - 1}, \quad (3.4)$$

Nčíslo udávající rozdělení podle pásem (1 pro oktávový, 2/3 pro dvoutřetinooktávový atd.).

Pro oktávové rozdělení vychází $Q=1,4142$. Daný vztah však platí pro pokles o 3 dB, pro danou aplikaci maximální míry potlačení ± 12 dB je nutné, aby tento pokles byl 6 dB, což můžeme dosáhnout zdvojnásobením hodnoty Q , tedy $Q \approx 2,8$. Samotná volba činitele jakosti Q je značný kompromis, neboť zvolíme-li hodnotu příliš malou, dochází ke značnému ovlivňování přenosu vedlejších pásem, což je jev nepříznivý. Naopak při volbě velké hodnoty činitele jakosti sice nedochází tak značnému ovlivňování, avšak při nastavení na míru největšího či nejmenšího zesílení, je frekvenční charakteristika velmi zvlněná, např. pro frekvenci ležící uprostřed dvou středních kmitočtů může být rozdíl oproti hodnotě maximální více než 6 dB.

Nyní můžeme přistoupit k výpočtu R_s , jenž je v tomto případě dán sériovou rezistencí syntetické indukčnosti. Ze vzorce (3.2) vyjádříme R_s , a po úpravách dostáváme následující rovnici:

$$R_s = \frac{K_{Umin} \cdot R}{1 - K_{Umin}}. \quad (3.5)$$

Za K_{Umin} však nedosazujeme hodnotu v dB, proto je třeba tuto hodnotu přepočítat na bezrozměrnou jednotku:

$$K_{Umin}[dB] = 20 \cdot \log(K_{Umin}). \quad (3.6)$$

Vyjádříme K_{Umin} :

$$K_{Umin} = 10^{\frac{K_{Umin}[dB]}{20}}, \quad (3.7)$$

a dosadíme do rovnice:

$$R_s = \frac{10^{\frac{K_{Umin}[dB]}{20}} \cdot R}{1 - 10^{\frac{K_{Umin}[dB]}{20}}} = \frac{10^{\frac{-12}{20}} \cdot 4700}{1 - 10^{\frac{-12}{20}}} = 1577 \Omega. \quad (3.8)$$

Vzhledem k tomu, že bude namísto klasických potenciometrů užito potenciometrů digitálních, jejich běžec má nezanedbatelný odpor v řádech desítek Ω , byla zvolena hodnota odporu $R_s=1,6 k\Omega$.

Nyní můžeme provést výpočet hodnot rezonančního obvodu. Nejprve určíme velikost kondenzátoru C_s . Pro výpočet použijeme vztah (2.8), vyjádříme z dané rovnice C a provedeme výpočet, všechny vzorové výpočty budou prováděny pro $f_r=65$ Hz.

$$C = \frac{1}{\omega_r Q R_s} = \frac{1}{2\pi f_r Q R_s} = \frac{1}{2\pi \cdot 65,2 \cdot 8,1600} = 546 \text{ nF}. \quad (3.9)$$

Nyní ze známého Thomsonova vztahu 2.7 vyjádříme velikost indukčnosti L:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \rightarrow L = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 C} = \frac{1}{4\pi^2 65^2 546 \cdot 10^{-6}} = 10,98 \text{ H}. \quad (3.10)$$

V této chvíli můžeme přistoupit k návrhu syntetické indukčnosti. Pro velikost indukčnosti platí vztah (3.1). Velikost R_1 je volena na základě podmínky $R_1 \gg R_s$, proto je zvolena hodnota $R = 470 \text{ k}\Omega$. Dále z rovnice vyjádříme hodnotu C_L a provedeme výpočet.

$$C_L = \frac{L}{R_1 R_s} = \frac{11,3}{470000 \cdot 1600} = 15 \text{ nF}. \quad (3.11)$$

Vzhledem k tomu, že součástková základna kondenzátorů je poměrně omezená a všechny teoreticky vypočítané hodnoty musely být zvoleny nejbližší hodnoty z řady E6 pro kondenzátory a E24 pro rezistory, došlo ke změně parametrů f_r a činitele jakosti Q. Proto bylo nutné provést korekci pomocí změny velikosti rezistoru R_1 . Všechny teoreticky vypočítané a zvolené hodnoty spolu s odpovídajícími parametry udává Tab. 3.2.

	f_r [Hz]	31,5	63	125	250	500	1 K	2 K	4 K	8 K	16 K
Vypočteno	C [F]	1,1 μ	564 n	284 n	142 n	71 n	36 n	18 n	9 n	4,4 n	2,2 n
	L [H]	22,6	11,3	5,7	2,9	1,4	0,7	0,36	0,18	90 m	45 m
Hodnoty zvolené	C [F]	1 μ	470 n	330 n	133 n	68 n	33 n	15 n	10 n	4,7 n	2,2 n
	C_L [F]	33 n	22 n	10 n	3,3 n	2,2 n	1 n	470 p	220 p	100 p	57 p
	R_1 [Ω]	470 K	390 K	330 K	560 K	430 K	470 K	560 K	470 K	510 K	470 K
	L [H]	24,8	13,7	5,3	3,0	1,5	0,75	0,42	0,17	82 m	43 m
	Q [-]	3,11	3,38	2,5	2,95	2,95	2,98	3,31	2,54	2,60	2,76
	f_r [Hz]	31,9	62,7	121	254	496	1,01 K	2,00 K	3,91 K	8,13 K	16,4 K

Tab. 3.2 Porovnání vypočtených a zvolených hodnot součástek pásmových propustí

Nevýhodou užitého zapojení spočívá v tom, že hodnota Q pásmových propustí není konstantní a vypočítaná hodnota platí jen pro maximální míru zesílení, při menší míře zesílení dochází k zmenšení Q a tím pádem k zvětšení šířky pásma, což se negativně projeví v míře ovlivnění vedlejších rezonančních obvodů. Tuto vlastnost se mírně zlepši úpravou zapojení, a to sice rozdělení RLC článků do dvou sumačních obvodů, přičemž každé dva sousední leží v rozdílném obvodu. [2]

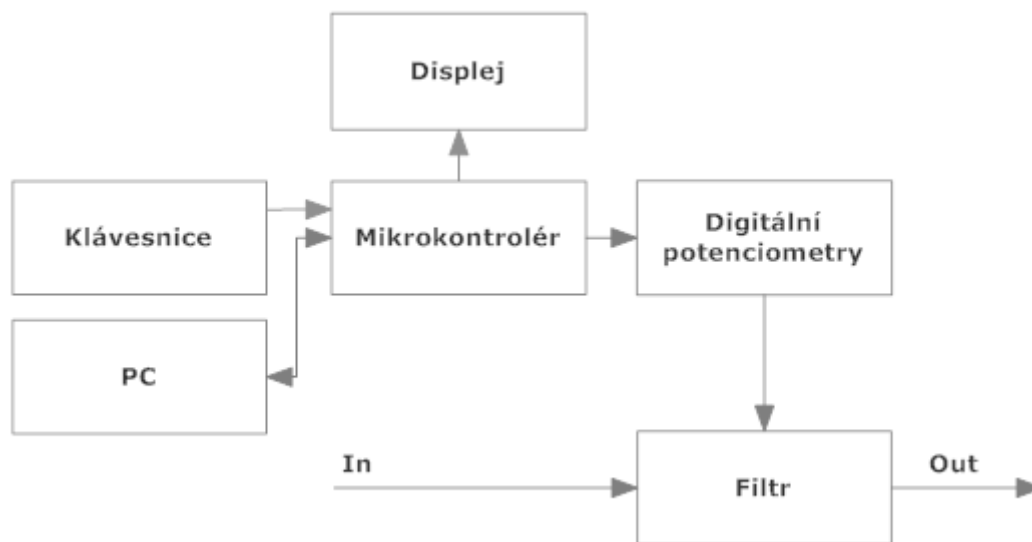
Na vstupu bloku ekvalizéru je zapojena pásmová propust pomocí kombinace dolní a horní propustí. Zdola je frekvenční rozsah ekvalizéru omezen horní propustí na frekvenci $f_m = 1,5 \text{ Hz}$, jež slouží i k potlačení stejnosměrné složky, horní mezní kmitočet je určen dolní propustí a je nastaven na hodnotu přibližně $f_m = 105 \text{ kHz}$, což je hodnota pro audio více než

dostačující, tímto filtrem se omezí především značný frekvenční nárůst 8dB na frekvenci 300 kHz při nastavení všech potenciometrů na největší zesílení, i tak je ale v tomto případě horní mezní kmitočet přibližně 350 kHz. Avšak nastavení všech potenciometrů na hodnotu maximálního zesílení nemá v praxi v podstatě smysl a tedy se nepředpokládá, že by k tomu někdy došlo.

Za pásmovou propustí je kvůli oddělení od zdroje signálu zapojen napěťový sledovač s jednotkovým zesílením. Za ním figuruje již samotné navržené zapojení ekvalizéru.

4 KONCEPCE ZAŘÍZENÍ

Hlavním obvodem celého zapojení je mikrokontrolér ATmega16L [8], jenž celý přístroj řídí. K němu jsou připojeny periferie v podobě displeje a klávesnice, které budou uživateli sloužit k ovládání daných funkcí ekvalizéru. Pomocí spojení přes sériovou linku RS232 je možné toto nastavení měnit i pomocí programu pro PC. Mikrokontrolér je propojen s digitálními potenciometry pomocí rozhraní I2C.



Obr. 4.1 Blokové schéma zařízení

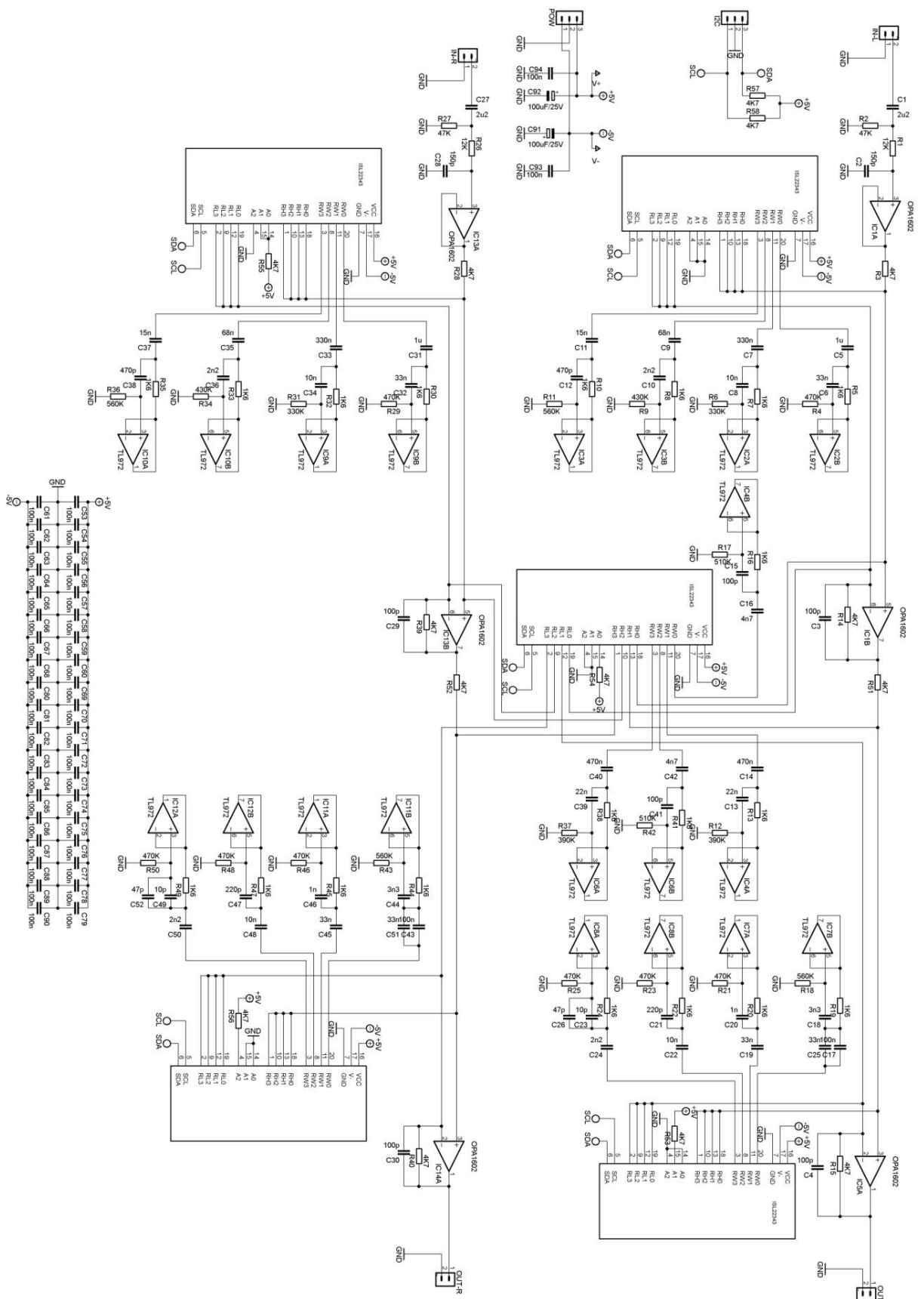
Pro komunikaci s digitálními potenciometry byl zvolen protokol I2C. Rozhraní SPI pro tuto aplikaci nevyhovuje, neboť pro 20 potenciometrů by bylo potřeba 23 výstupů MCU, (20 výstupů MCU pro povolení jednotlivých IO + 3 výstupy společné pro všechny IO). To je vzhledem k užití dalších periférií v podobě LCD displeje a klávesnice poměrně značné množství. Proto bylo pro komunikaci s potenciometry zvoleno rozhraní I2C, které užívá pouze 2 výstupy MCU.

4.1 Deska ekvalizéru

Vzhledem k tomu, že při komunikaci prostřednictvím I2C lze použít maximálně 8 stejných elektronických potenciometrů (volitelná 3bitová adresa), bylo pro obvod ekvalizéru použito čtyřnásobných potenciometrů. Nabídka s digitálními potenciometry je bohužel poněkud omezená. Zvolen byl obvod firmy Intersil - ISL22343 [9] jehož jmenovitý odpor „dráhy“ je 100 kΩ. Z hlediska indukovaného brumu by bylo lépe použít potenciometr s menším jmenovitým odporem „dráhy“. Obvod obsahuje 4 nezávislé potenciometry, přičemž každý může být nastaven ve 256 krocích. Jako jeden z mála podobných obvodů má symetrické napájecí napětí ± 5 V a tak lze pro napájení potenciometrů a OZ použít stejný zdroj a využít tak celosymetrickou strukturu.

Na pozici napěťového sledovače a diferenčního zesilovače byl užit obvod firmy Texas Instruments – OPA1602. Jedná se o dvojité OZ, který je navržen výhradně pro užití v audio obvodech. OZ je nízkošumový a jeho harmonické zkreslení dosahuje velmi malých hodnot a vyhovuje proto i pro profesionální audio zařízení. Na pozici OZ v zapojení syntetické

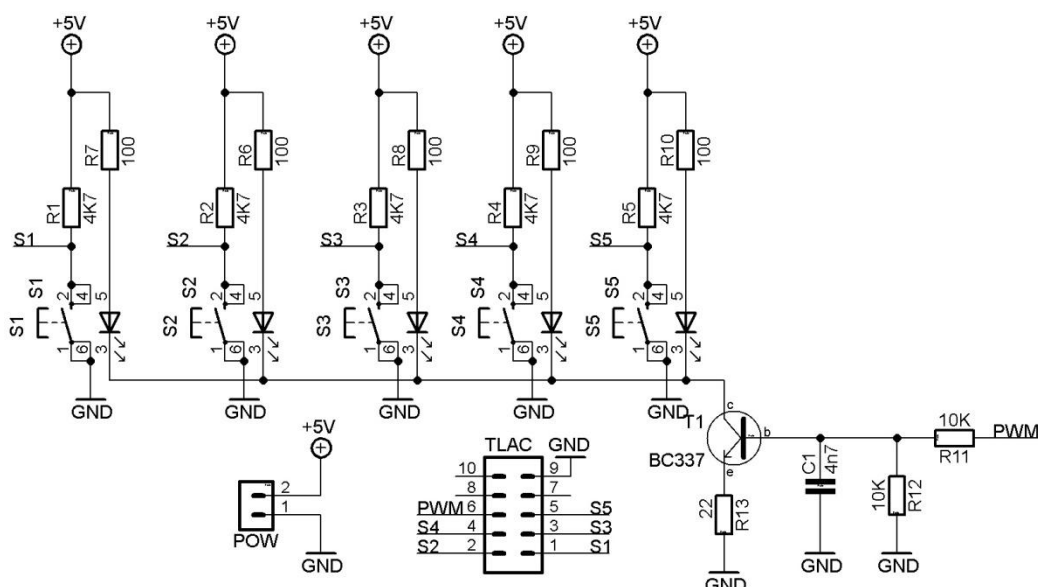
indukčnosti byly použity OZ stejného výrobce – TL972. Obvod sice nedosahuje tak excelentních parametrů, nicméně pro dané užití plně vyhovují. Všechny integrované obvody byly vybrány s ohledem na požadavek napájení symetrickým napětím ± 5 V. Aby bylo dosaženo co možná nejvyššího možného rozkmitu signálu (který musí být pro vstupní úroveň 0 dBu tj. 775 mV a zesílení 12 dB minimálně 4,4 V) jsou oba dva typy zvolených obvodů OZ typu RAIL-TO-RAIL, kde výstupní napětí může dosahovat téměř hodnot napájecího napětí. DPS je navržena jako oboustranná a vzhledem k tomu, že obvody digitálních potenciometrů nejsou dostupné v jiném než SMD provedení, byla i celá deska navržena pro součástky SMD.



Obr. 4.2 Obvodové schéma ekvalizéru

4.3 Deska tlačítek

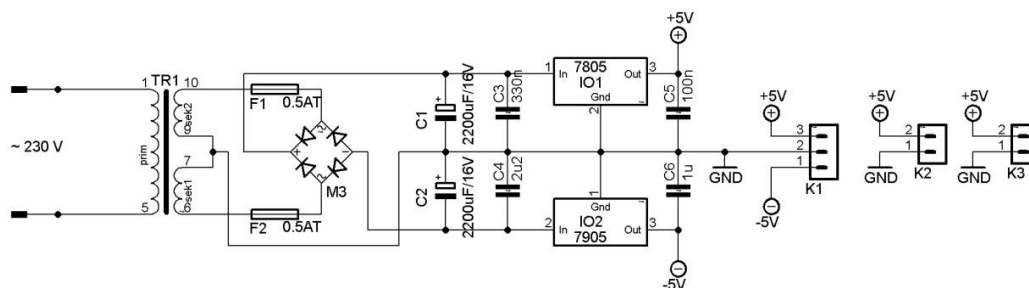
Pro ovládání přístroje bude sloužit 5 tlačítek. Deska obsahuje konektor pro přívod napájecího napětí a konektor pro propojení s deskou řízení. Mikrospínače mají LED podsvětlení, proto je na desce stejně jako na desce řízení implementován jednoduchý proudový zdroj řízený pomocí PWM. Řízení je stejné jako pro LCD displej, pouze maximální proud je jiný. Deska bude upevněna přímo na přední panel přístroje, proto jsou veškeré součástky kromě drátových propojek a mikrospínačů osazeny ze spodní strany DPS.



Obr. 4.4 Obvodové schéma desky tlačítek

4.4 Napájecí zdroj

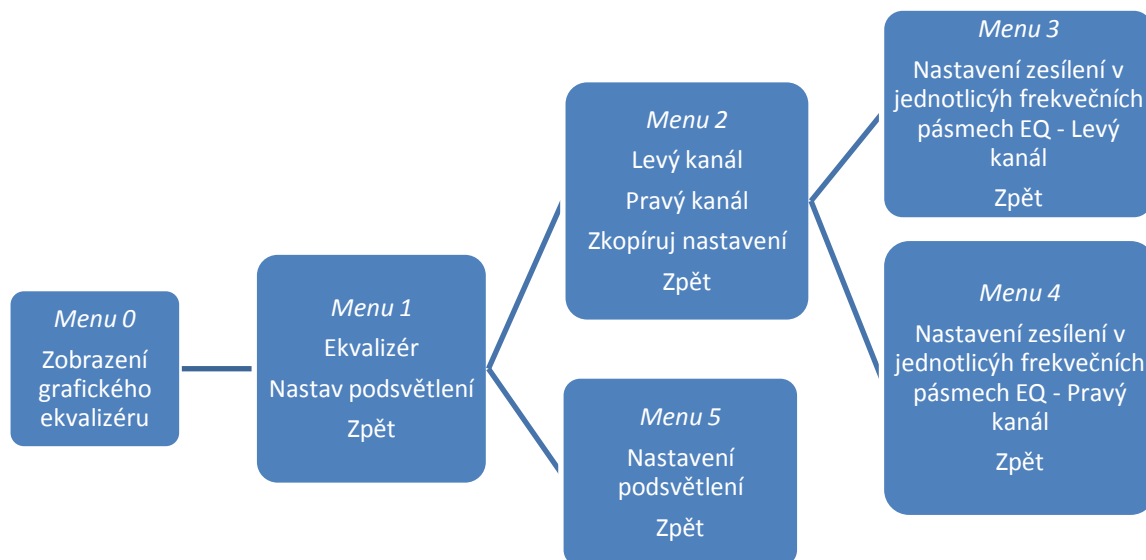
Zdroj je navržen jako symetrický pro výstupní napětí ± 5 V. Napájení MCU a displeje je nesymetrické a je odebírané z kladné větve zdroje. Pro zdroj byl vybrán transformátor s výstupním napětím 2×6 V, 4,5 VA. Hodnota sekundárního napětí transformátoru byla zvolena tak, aby byla zajištěna správná funkce integrovaných lineárních stabilizátorů 7805 a 7905, které musí mít na vstupu napětí vyšší alespoň o 1-2V než je výstupní stabilizované napětí. Sekundární napětí je dvojcestně usměrněno pomocí usměrňovacího můstku M3 a vyhlazeno filtračními kondenzátory C1 a C2. Pro správnou funkci stabilizátorů je třeba na jejich vstup a výstup připojit keramické blokovací kondenzátory, jejichž hodnoty jsou zvoleny dle datasheetu [12] [13].



Obr. 4.5 Obvodové schéma zdroje

5 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

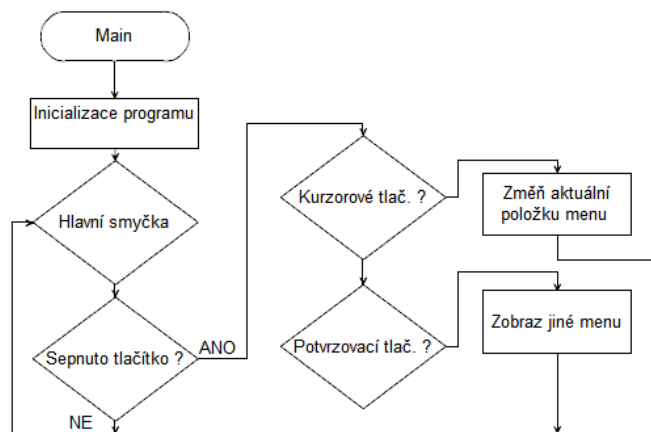
Program pro mikrokontrolér obstarává komunikaci uživatele s obvodem ekvalizéru a PC. Veškerá data jsou zobrazována na LCD displeji, ovládání přístroje je zajištěno 5 kurzorovými tlačítky. Pro základní pohyb v menu slouží tlačítka „vpravo“ a „vlevo“, tlačítkem „OK“ je potvrzena volba. Tlačítka „nahoru“ a „dolů“ slouží výhradně k změně nastavitelných parametrů EQ.



Obr. 5.1 Blokové schéma menu přístroje

Po zapnutí přístroje se z paměti obvodů elektronických potenciometrů načtou hodnoty zesílení a na displeji se zobrazí jeho grafická podoba. Tu je možné na omezený časový úsek (cca 1s) zobrazit i při nastavování jednotlivých kanálů ekvalizéru. Přístroj umožňuje měnit zesílení na jednotlivých f_r , a to odděleně jak pro pravý i levý kanál. Obvykle jsou korekce pro pravý a levý kanál totožné, proto je přidána funkce umožňující nastavení požadovaného frekvenčního průběhu v jednom kanálu zkopírovat a odeslat nastavení do kanálu druhého. V menu přístroje je také možné měnit intenzitu podsvětlení LCD displeje a ovládacích tlačítek. Jednoduché blokové schéma menu je zobrazeno na Obr. 5.1, ukázky menu jsou uvedeny v příloze.

5.1 Zdrojový kód pro funkci menu



Obr. 5.2 Vývojový diagram menu

Pro rozlišení příslušného menu slouží stejnojmenná proměnná, přičemž její hodnota pro dané menu odpovídá blokovému diagramu na Obr. 5.1. Každé menu obsahuje několik položek, proto je přidána proměnná „pom_menu“ udávající, aktuální hodnotu zobrazené položky z proměnných menu.

V hlavní smyčce probíhá testování, zda bylo některé z tlačítek sepnuto a v případě, že ano je spuštěna příslušná obslužná funkce. Následující část uvádí zdrojový kód hlavní smyčky programu.

```
int main(void)                                     //hlavní funkce
{
    while(1)                                       //nekonečná smyčka
    {
        if (bit_is_clear(PIND,PIND4))           //testuj, zda bylo tlačítko
                                                //sepnuto
        {
            OK();                                //skoč na funkci „OK“
            if (bit_is_clear(PIND,PIND2))         //testuj, zda bylo tlačítko
                                                //sepnuto
            {
                UP();                             //skoč na funkci „UP“
            }
            ...
        }
    }
}
```

Zavolaná funkce pak určitou dobu čeká, (aby se předešlo několikanásobnému zpracování tlačítka, tzv. softwarová eliminace zámkitů tlačítek) a poté testuje, zda je tlačítko Rozepnuto. Tím je možné rozlišit jednotlivá stisknutí tlačítka.

```
OK(void)
{
    _delay_ms(1000);                             //počkej zadaný čas
    if (bit_is_set(PIND,PIND4))                   //testuj, zda je tlačítko
                                                //rozepnuto
    {
        switch(menu)                             //testování hodnoty menu
        {
            ...
        }
    }
}
```

```

        case 0:
            OK_0();
            break;

        case 1:
            OK_1();
            break;
        ...
    }
}

```

Funkce „OK_1“ provádí operace na základě hodnoty „pom_menu“.

```

OK_1(void)
{
    switch(pom_menu)
    {
        case 0:
            menu=2;
            pom_menu=0;
            zobraz_menu();
            break;
        ...
    }
}

```

5.2 Komunikace s displejem

Pro komunikaci s LCD displejem [14] byla použita knihovna, jejíž autor je Peter Fleury [15]. Displej má viditelnou část 2x20 znaků a je použita 4bitová komunikace, pro obsluhu displeje slouží 7 vodičů (4 datové a 3 řídící) a stačí tak jeden port MCU. Pro správnou funkci je však potřeba v knihovně „lcd.h“ nastavit příslušné datové výstupy MCU. Pro zobrazení dat na displeji slouží podobná struktura jako v případě ovládání tlačítka. Nejprve se spustí funkce „zobraz_menu“, která na základě hodnoty „menu“ zavolá funkci „zobraz_menu_1“. Číslo za podtržítkem udává hodnotu „menu“, čímž je usnadněna orientace ve zdrojovém kódu.

```

Zobraz_menu_1(void)
{
    switch(pom_menu)
    {
        case 0:
            lcd_clrscr();
            sprintf(buffer, "    Ekválizer");
            lcd_puts(buffer);
            lcd_gotoxy(0,1);
            sprintf(buffer, "->");
            lcd_puts(buffer);
    }
}

```

```

        break;                                // konec switch
        ...
    }
}

```

Displej umožňuje nadefinovat až 8 uživatelských znaků. Toho bylo využito pro grafické zobrazení zesílení v jednotlivých pásmech, stejně jako tomu je u přístrojů s tahovými potenciometry. Následující zdrojový kód slouží k uložení znaků do paměti CGRAM, přičemž na pozici „0“ je znak s viditelným posledním řádkem, na pozici „1“ je pak znak s posledními dvěma viditelnými řádky atd. Ukázka grafického výstupu je uvedena v příloze C.

```

generator_znaku(void)
{
    unsigned char a;                // definice lokální proměnné
    unsigned char b;                // definice lokální proměnné
    unsigned char c;                // definice lokální proměnné

    for (a=0;a<8;a++)              //for cyklus
    {
        lcd_command( 0x40 | (a<<3)); //adresa pro uložení znaku
        for (b=0;b<(8-a-1);b++)     //for cyklus
        {lcd_data(0x00);             //vlož prázdný řádek
        }
        for (c=0;c<(a+1);c++)        //for cyklus
        {
            lcd_data(0x1f);           //vlož viditelný řádek
        }
        lcd_clrscr();                //smazání displeje
    }
}

```

5.3 Komunikace s digitálními potenciometry

Komunikaci s digitálními potenciometry obstarává knihovna Petera Fleuryho [16]. Je nutné pouze nastavit požadovanou frekvenci hodinového signálu I2C a frekvenci, na které běží MCU. Při inicializaci I2C pak dojde k výpočtu příslušné hodnoty registru TWBR, která je nezbytná pro funkci tohoto rozhraní.

Přístup k jednotlivým potenciometrům je rozlišen na základě 7 bitové fyzické adresy a adresy registru, přičemž první tři bity fyzické adresy jsou implementovány od výrobce a mají hodnotu 1010, zbývající bity jsou nastaveny zapojením úrovně log 1 či log 0 na příslušný pin A0-A2. Následující tabulka udává hodnoty fyzické adresy a registru levého a pravého kanálu.

Frekvence	Fyzická adresa		Adresa registru	
	Levý kanál	Pravý kanál	Levý kanál	Pravý kanál
32 Hz	0b1010011	0b1010000	0x00	0x00
63 Hz	0b1010001	0b1010001	0x03	0x01
125 Hz	0b1010011	0b1010000	0x01	0x01
250 Hz	0b1010100	0b1010001	0x00	0x00
500 Hz	0b1010011	0b1010000	0x02	0x02
1 KHz	0b1010100	0b1010001	0x01	0x01
2 KHz	0b1010011	0b1010000	0x03	0x03
4 KHz	0b1010100	0b1010001	0x02	0x02
8 KHz	0b1010001	0b1010001	0x02	0x00
16 KHz	0b1010100	0b1010001	0x03	0x02

Tab. 5.1 Hodnoty fyzické adresy a adresy registru pro jednotlivé frekvence

Hodnoty možného zesílení na jednotlivých frekvencích dosahují -10 až 10 dB, proto bylo nutné nejprve stanovit 8bitovou hodnotu posílanou do digitálního potenciometru, což udává tabulka Tab. 5.2.

Zesílení [dB]	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Hodnota	255	254	253	251	249	247	243	237	225	205	128
Zesílení [dB]	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	
Hodnota	0	1	2	4	6	8	12	18	30	50	

Tab. 5.2 Tabulka zesílení přepočítaná na 8 bit hodnotu

Vzhledem k tomu, že paměť digitálního potenciometru je typu EPROM a má omezený počet zápisů, není vhodné hodnoty odesílat vždy při změně zesílení. Proto je program koncipován tak, že před jakoukoliv změnou zesílení proměnné „L“ či „P“, uloží její hodnotu do proměnné „porovnej“, a při požadavku na změnu aktuální položky porovná hodnotu ze zmíněné proměnné s hodnotu nastavenou uživatelem. Pokud se vzájemně liší, odešle ji do digitálního potenciometru.

Pro odeslání hodnot do potenciometru je použita funkce „posli_L(unsigned char index,unsigned char LP)“ pro levý kanál, obdobně „posli_P(unsigned char index,unsigned char LP)“ pro pravý kanál. Nejprve je na základě Tab. 5.1 do proměnných uložena odpovídající adresa a hodnota zařízení. Poté pomocí funkce „prepoceti_hodnotu“ dojde dle Tab. 5.2 k přepočtu hodnoty zesílení v dB na 8 bitovou hodnotu. Je vyslána startovací podmínka s adresou a nastaveným bitem pro zápis do zařízení. Dále je odeslán adresa registru potenciometru a následně 8 bitová hodnota. Poté je komunikace se zařízením ukončena.

```

void Posli_L(unsigned char index,unsigned char LP)
{
    unsigned char adresa=0;           //definice lokální proměnné
    unsigned char zarizeni=0;         //definice lokální proměnné
    unsigned char hodnota;            //definice lokální proměnné
    switch(index)                     //testuj hodnotu indexu
    {
        case 0:                       //vykonej následující kód, je-li
                                      //index=0

            adresa=ad3;
            zarizeni=0;
            break;                     //konec switch

        ...
    }
    i2c_start_wait(adresa+I2C_WRITE); //vyšle startovací podmínku a
                                      //adresu pro zápis
    i2c_write(zarizeni);              //vyšle adresu registru
                                      //potenciometru
    hodnota=prepocti_hodnotu(index,LP); //spustí funkci pro přepočet dB
                                      //na 8bit hodnotu
    i2c_write(hodnota);               //zapsání 8bitové hodnoty do
                                      //do zařízení
    i2c_stop();                       //ukončení komunikace
}

```

Následující zdrojový kód obstarává načtení hodnot z EPROM paměti do proměnných MCU po zapnutí přístroje.

```

Nacti_hodnotu_I2C(void)
{
    unsigned char hodnota;           //definice lokální proměnné

    i2c_start_wait(ad0+I2C_WRITE);   //vyšle startovací podmínku
    i2c_write(0);                     //a adresu pro zápis
    i2c_rep_start(ad0+I2C_READ);      //vyšle adresu registru
    i2c_rep_start(ad0+I2C_READ);      //potenciometru
    hodnota = i2c_readAck();           //vyšle startovací podmínku
    P[0]=Prepoceti_hodnotu_invert(hodnota); //do proměnné uloží hodnotu
    P[0]=Prepoceti_hodnotu_invert(hodnota); //z registru 0
    P[0]=Prepoceti_hodnotu_invert(hodnota); //přepočti 8bit hodnotu
    P[0]=Prepoceti_hodnotu_invert(hodnota); //na hodnotu v dB

    hodnota= i2c_readAck();           //do proměnné uloží hodnotu
    P[2]=Prepoceti_hodnotu_invert(hodnota); //z registru 1
    P[2]=Prepoceti_hodnotu_invert(hodnota); //přepočti 8bit hodnotu
    P[2]=Prepoceti_hodnotu_invert(hodnota); //na hodnotu v dB

    hodnota= i2c_readAck();           //do proměnné uloží hodnotu
    P[4] =Prepoceti_hodnotu_invert(hodnota); //z registru 2
    P[4] =Prepoceti_hodnotu_invert(hodnota); //přepočti 8bit hodnotu
    P[4] =Prepoceti_hodnotu_invert(hodnota); //na hodnotu v dB

    hodnota= i2c_readAck();           //do proměnné uloží hodnotu
    P[6] =Prepoceti_hodnotu_invert(hodnota); //z registru 3
    P[6] =Prepoceti_hodnotu_invert(hodnota); //přepočti 8bit hodnotu
    P[6] =Prepoceti_hodnotu_invert(hodnota); //na hodnotu v dB

    i2c_stop();                       //ukončení komunikace
}

```

```

...
}

```

5.4 Komunikace s PC

Pro příjem dat z PC byla zvolena následující struktura. Symbolová rychlost 9600 Bd, 8bit slovo, 2 stopbity, sudá parita. Příjem dat probíhá při přerušení při příjmu UART. Při spuštění přerušení se nejprve testuje, zda byl přijat znak pro otevření portu. Je-li podmínka splněna, program očekává příjem 20 slov, které ukládá do pomocné proměnné, komunikace je poté ukončena přijmutím znaku pro uzavření linky.

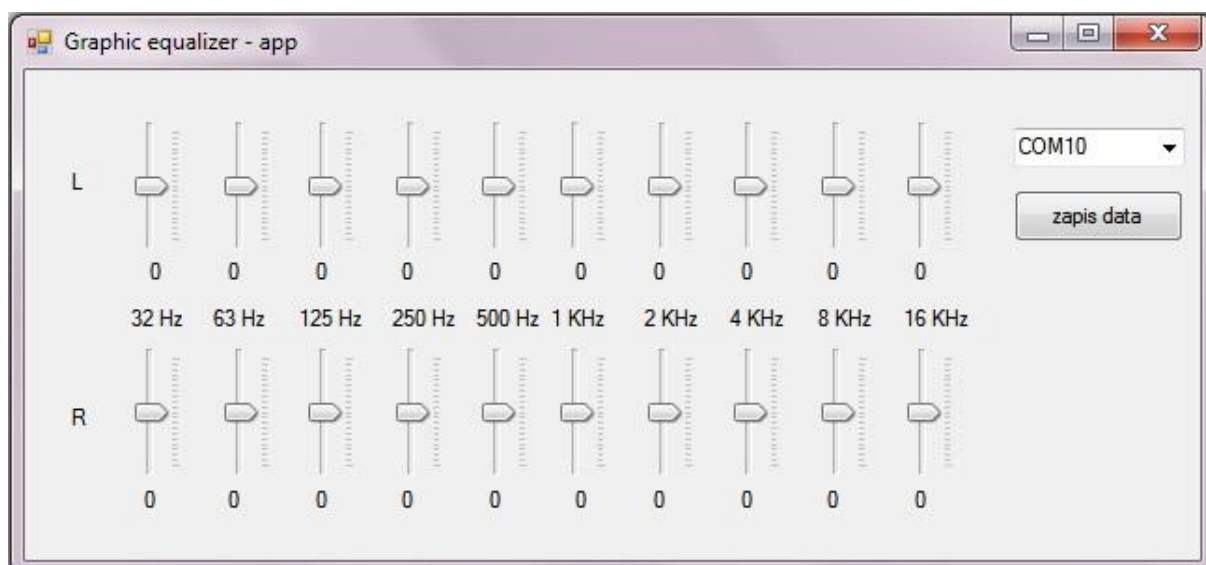
```

ISR (USART_RXC_vect)                                //vektor přerušení při příjmu
                                                    //přes UART
{
    char i;                                           //definice lokální proměnné
    i=UDR;                                           //do proměnné ulož přijatou
                                                    //hodnotu
    if (i==111)                                     //jestliže byl přijat znak 'o',
    {                                                // vykoněj následující
        for (i=0;i<20;i++)                         //for cyklus
        {
            loop_until_bit_is_set(UCSRA,RXC); //opakuj, dokud nejsou
                                                    //přijata data
            PC[i]=UDR;                             //do proměnné ulož přijaté data
        }
        i=UDR;                                     // poslední znak ukončení
        posli_data_PC();                          //přijaté data pošli do
                                                    //potenciometrů
    }
}

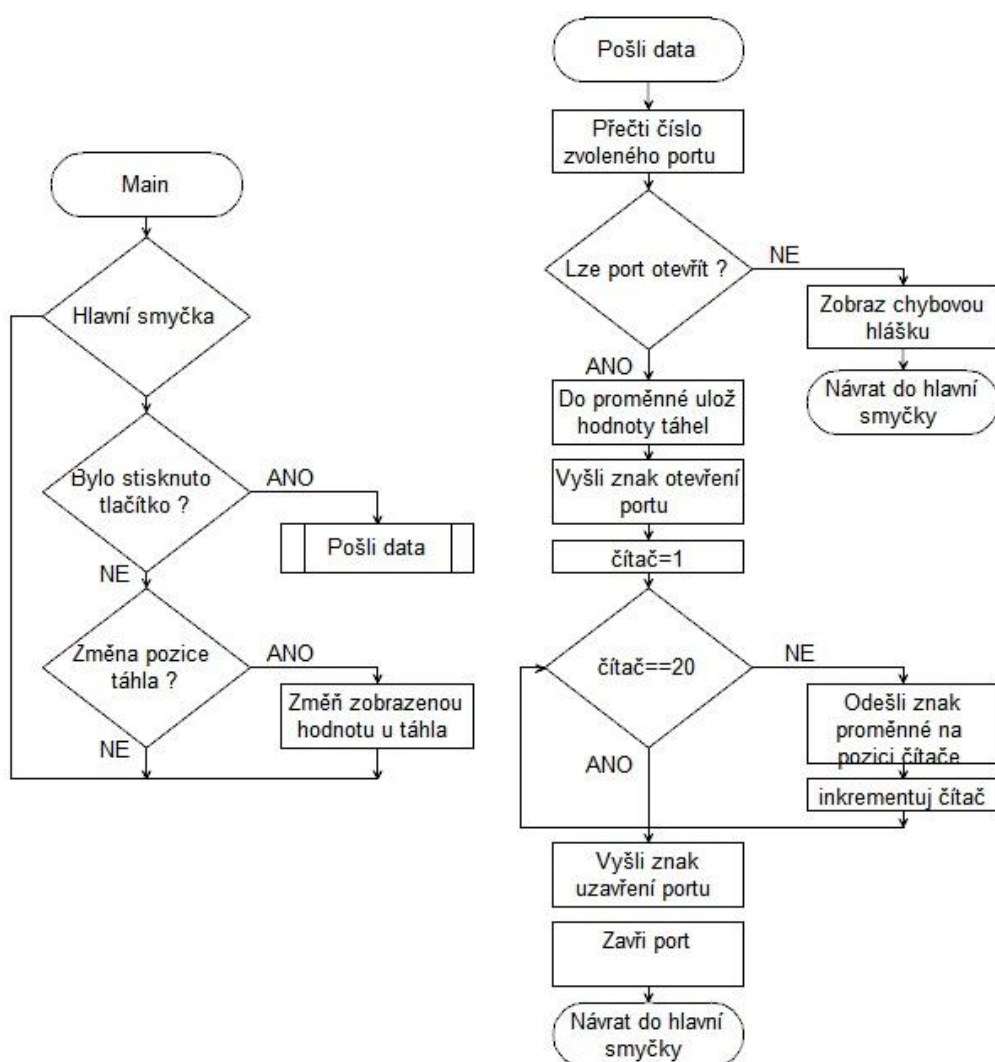
```

5.5 Program pro PC

Program pro obsluhu přístroje Obr. 5.3 z PC obstarává pouze základní funkci pro odesílání hodnot do přístroje ekvalizéru. V hlavním okně programu je zobrazeno 2x10 táhel pro nastavení zesílení na daných f_r pro oba kanály. Uživateli je umožněna volba portu, po stisknutí tlačítka „odesli data“ program nejprve přečte číslo požadovaného portu a pokusí se jej otevřít. Pokud lze port otevřít, program uloží nastavené hodnoty táhel do paměti. Kvůli možným problémům při zpracování záporných čísel je nastavená hodnota vždy zvětšena o číslo 10. Poté program vyšle znak otevření portu a postupně odesílá jednotlivá datová slova. Nakonec je odeslán znak pro uzavření portu a port je následně uzavřen. Vývojový diagram je zobrazen na Obr. 5.4.



Obr. 5.3 Ukázka programu Graphic equalizer



Obr. 5.4 Vývojový diagram programu graphic equalizer

6 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

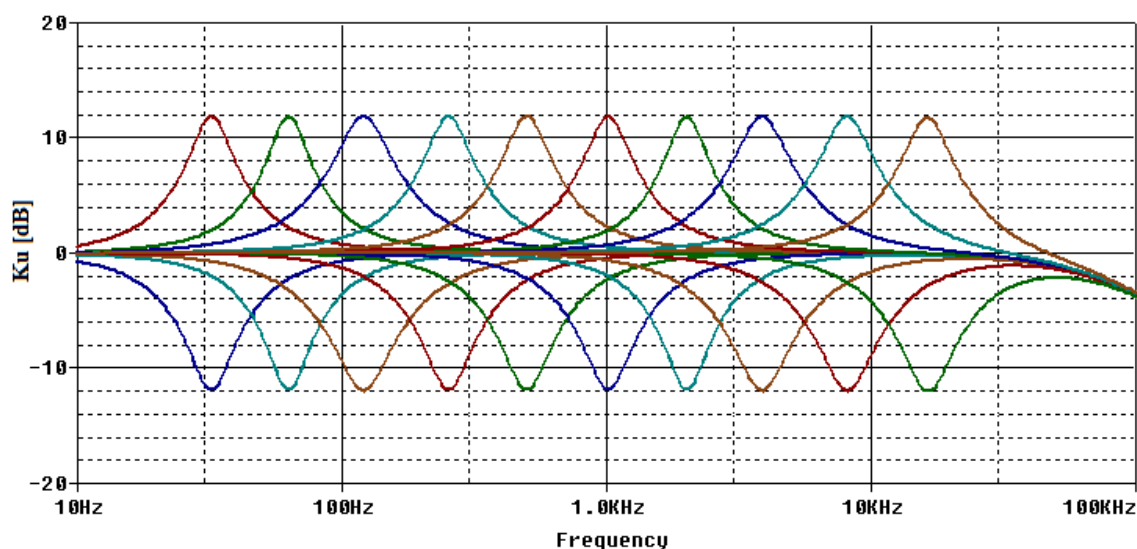
6.1 Výsledky simulace

Simulace byla provedena v programu PSpice, schéma použité pro simulaci je na Obr. 6.6. Na Obr. 6.1 je zobrazena frekvenční charakteristika jednotlivých pásmových propustí 10 pásmového ekvalizéru v rozsahu 10 Hz-100 KHz.

Následující tabulka udává hodnoty požadovaných rezonančních frekvencí jednotlivých pásmových propustí a hodnot odečtených v programu PSpice.

Požadováno	f_r [Hz]	31,5	63	125	250	500	1 K	2 K	4 K	8 K	16 K
PSpice	f_r [Hz]	32,3	63	120	251	501	1 K	2 K	3,9 K	8,1 K	15,8 K

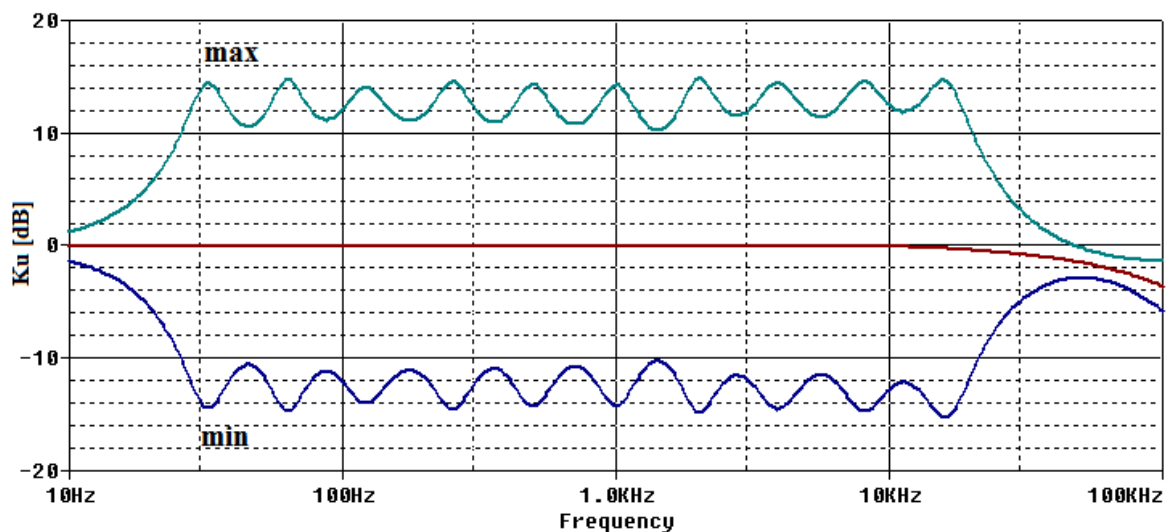
Tab. 6.1 Porovnání požadovaného a změřené f_r



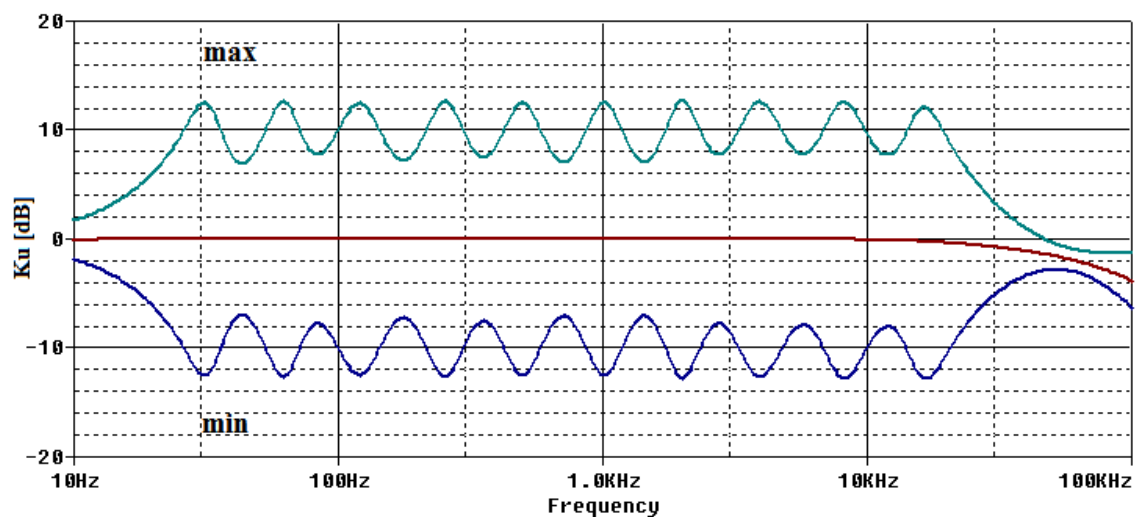
Obr. 6.1 Frekvenční charakteristika jednotlivých pásmových propustí

Na Obr. 6.2 je zobrazena výsledná charakteristika pro tři různé pozice nastavení potenciometru, při použití dvou sumačních obvodů, první obvod tak slučuje všechna lichá frekvenční pásma (31,5 Hz 125 Hz atd.) a druhý obvod provádí totéž pro sudá pořadí frekvenčních pásem. Toto zapojení koresponduje s Obr. 6.6. Na Obr. 6.3 je pro porovnání zobrazena výsledná frekvenční charakteristika pro zapojení, jež obsahuje pouze jeden sumační obvod Obr. 6.7. Rozdíly nejsou nijak dramatické, v případě použití dvou sumačních obvodů je sice krajní hodnota přenosu rovna ± 14 dB, ale je dosaženo menšího zvlnění, cca 3,5 dB. Pokud je požadováno maximální zesílení jen na jedné frekvenci a vedlejší potenciometry jsou nastaveny do poloviny dráhy pak, je maximální míra přenosu na této frekvenci rovna $\pm 11,5$ dB, viz Obr. 6.5.

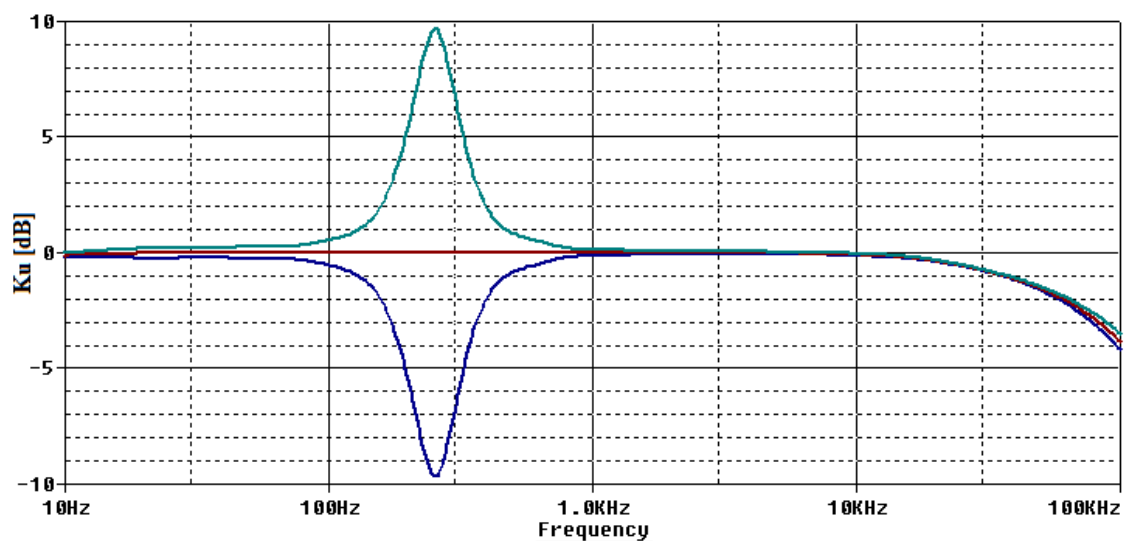
V případě zapojení jednoho sumačního obvodu je maximální míra zesílení a potlačení rovna teoretickým ± 12 dB, avšak výsledná frekvenční charakteristika dosahuje většího zvlnění, typicky 5 dB. V případě požadavku na maximální zesílení pouze na jedné frekvenci, pak dosahuje hodnot pouze $\pm 9,5$ dB, viz Obr. 6.4.



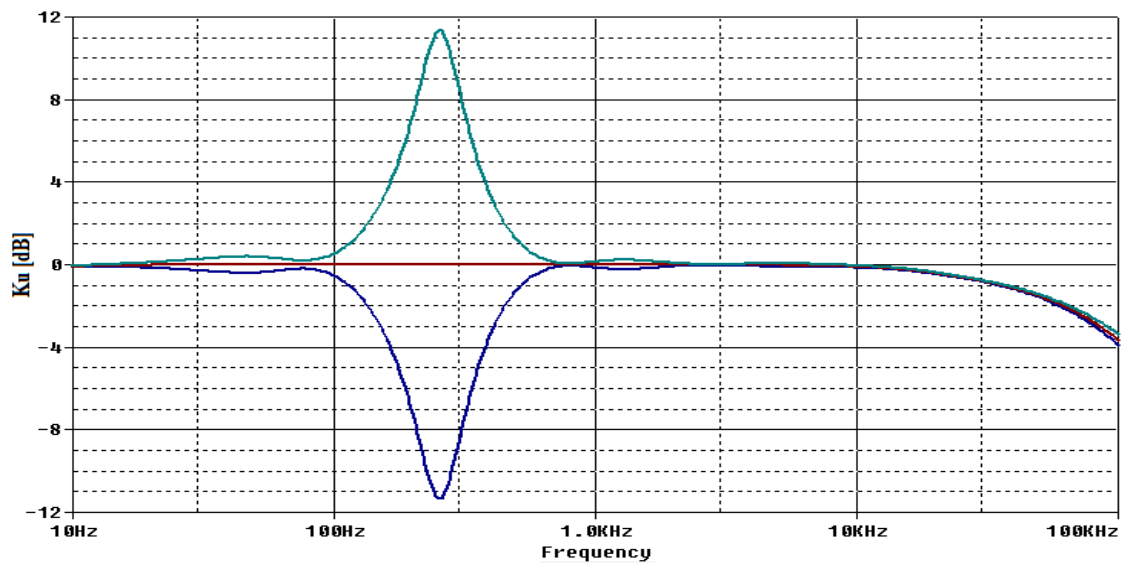
Obr. 6.2 Frekvenční charakteristika pro 2 sumační obvody v poloze $p = \max$, $p = \min$ a $p = 0.5$



Obr. 6.3 Frekvenční charakteristika pro 1 sumační obvod v poloze $p = \max$, $p = \min$ a $p = 0.5$

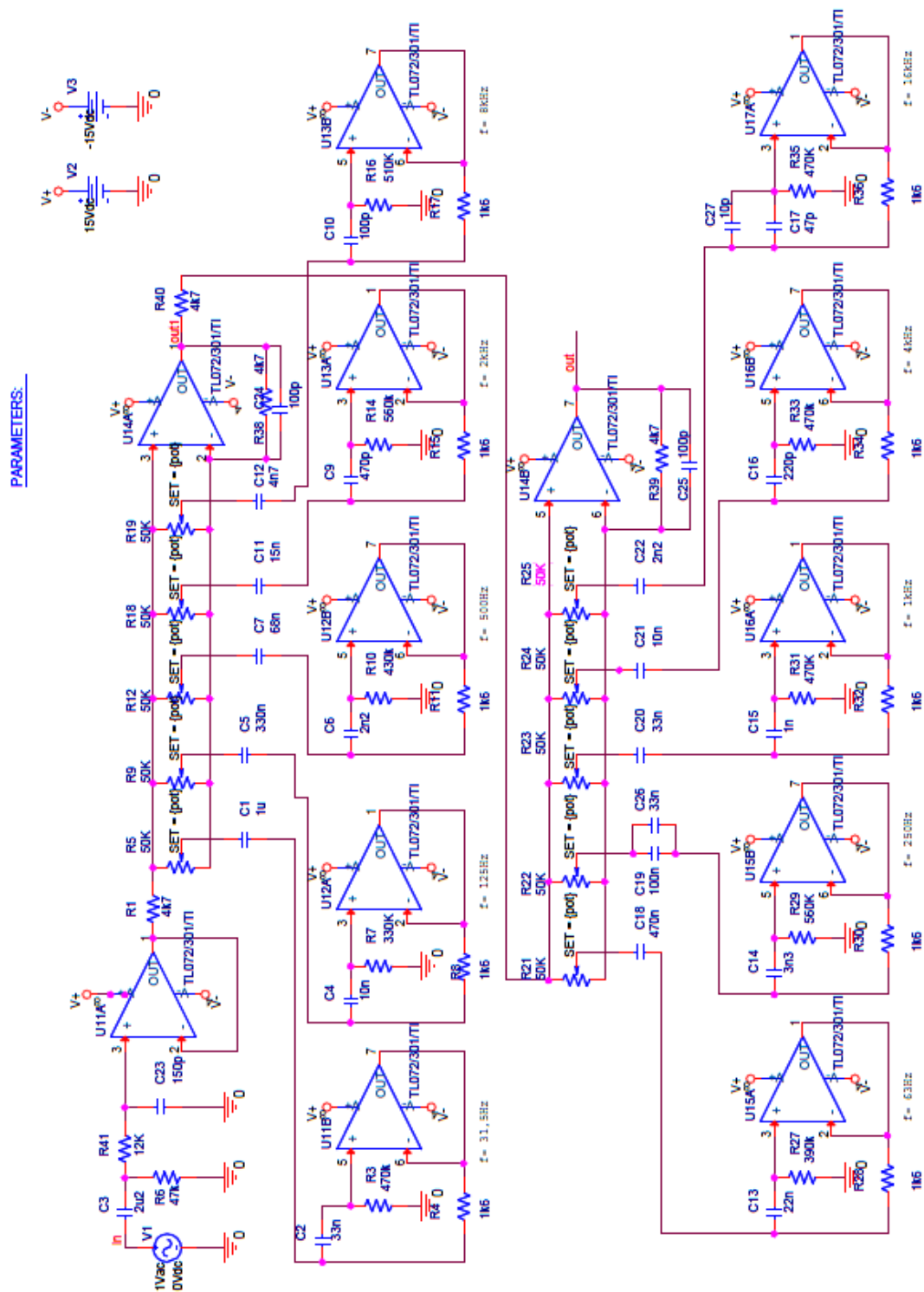


Obr. 6.4 Frekvenční charakteristika PP na frekvenci 250 Hz pro zapojení 1 sumačního obvodu

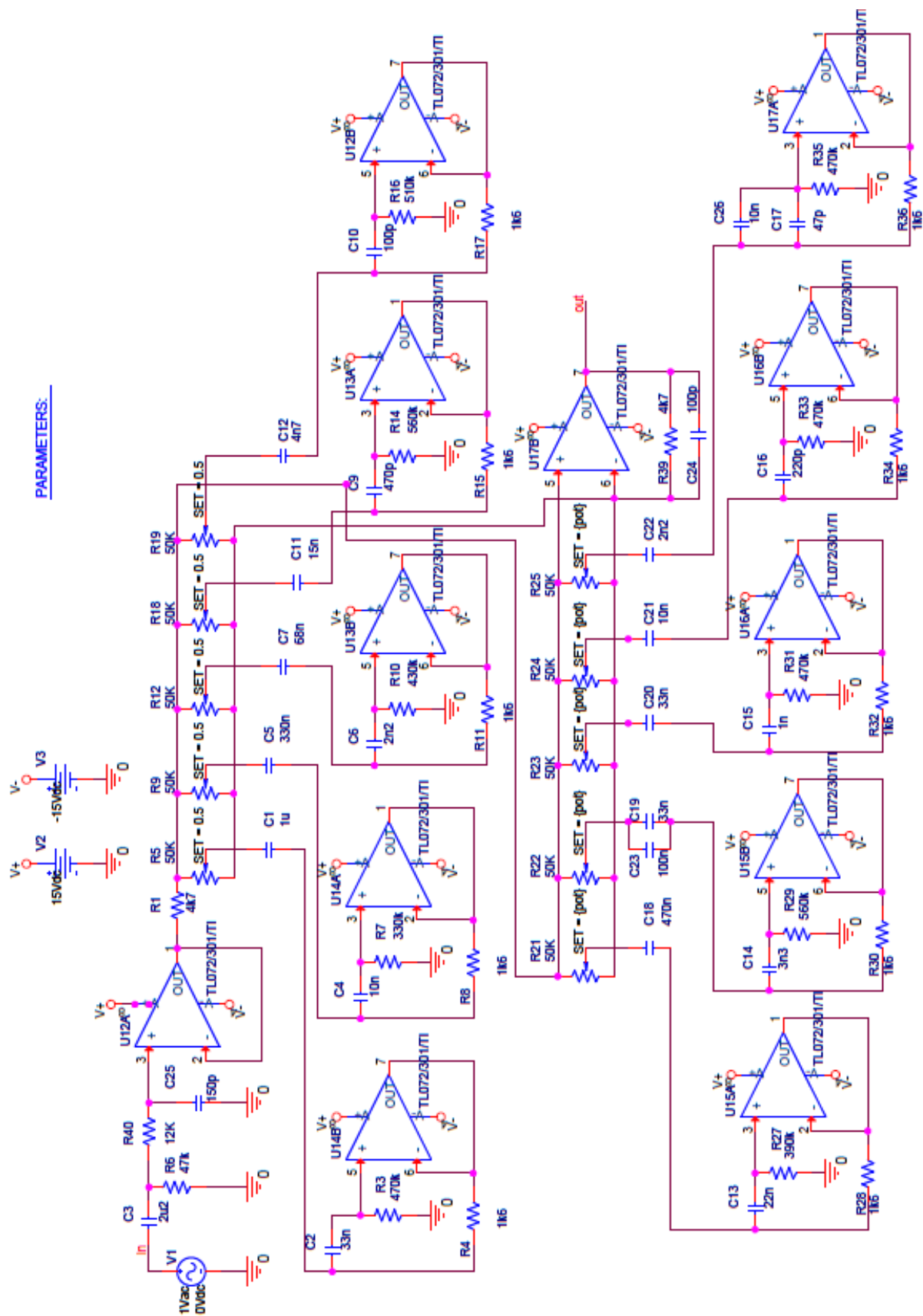


Obr. 6.5 Frekvenční charakteristika PP na frekvenci 250 Hz pro zapojení 2 sumačních obvodů

Vzhledem k příznivějším výsledkům simulace obvodu s dvěma sumačními obvody bylo toto zapojení použito pro realizaci grafického ekvalizéru.



Obr. 6.6 Simulační schéma jednoho kanálu pro dva sumační obvody



Obr. 6.7 Simulační schéma jednoho kanálu pro jeden sumační obvod

6.2 Výsledky měření

Nejprve bylo provedeno měření výstupního napětí pro obě větve napájecího zdroje.

Požadované napětí [V]	5	-5
Změřené napětí [V]	5,01	-5,1

Tab. 6.2 Výstupní napětí zdroje

Dále byl změřen klidový odběr jednotlivých komponent, tzn. ekvalizéru, desky řízení a desky tlačítek. Z desky řízení je napájen i LCD displej, proto bylo provedeno měření pro tři různá nastavení podsvětlení.

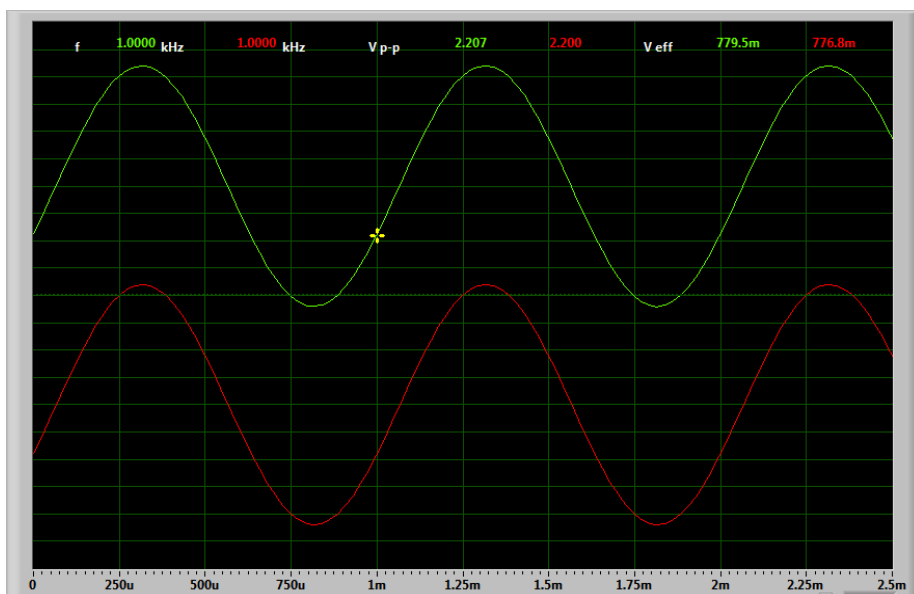
Větev napětí [V]	5	-5
Klidový odběr [mA]	143	141

Tab. 6.3 Klidový odběr desky ekvalizéru

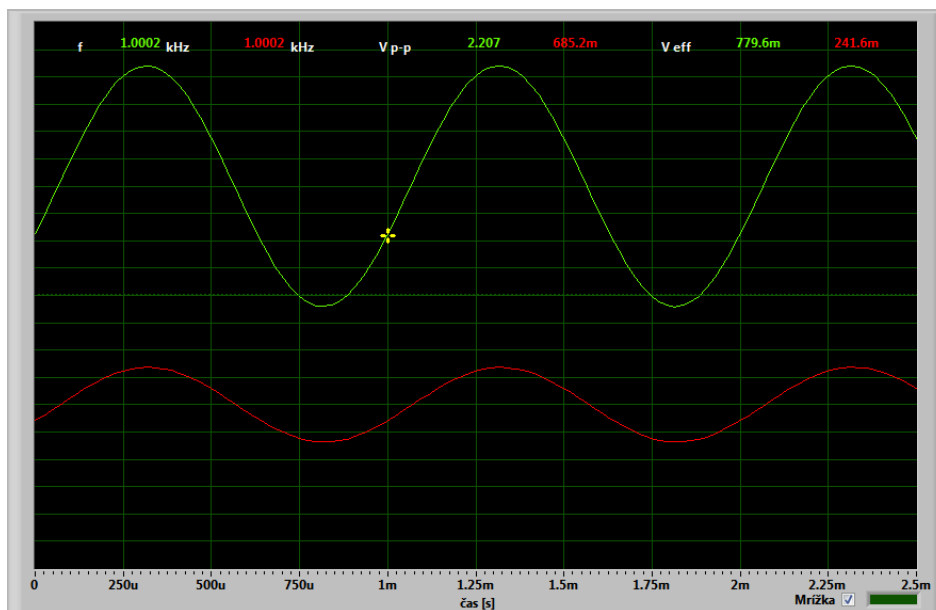
	Hodnota podsvětlení [%]		
	0	50	100
Deska řízení [mA]	10	23	36
Deska tlačítek [mA]	1	16	33

Tab. 6.4 Srovnání proudového odběru pro různou intenzitu podsvětlení

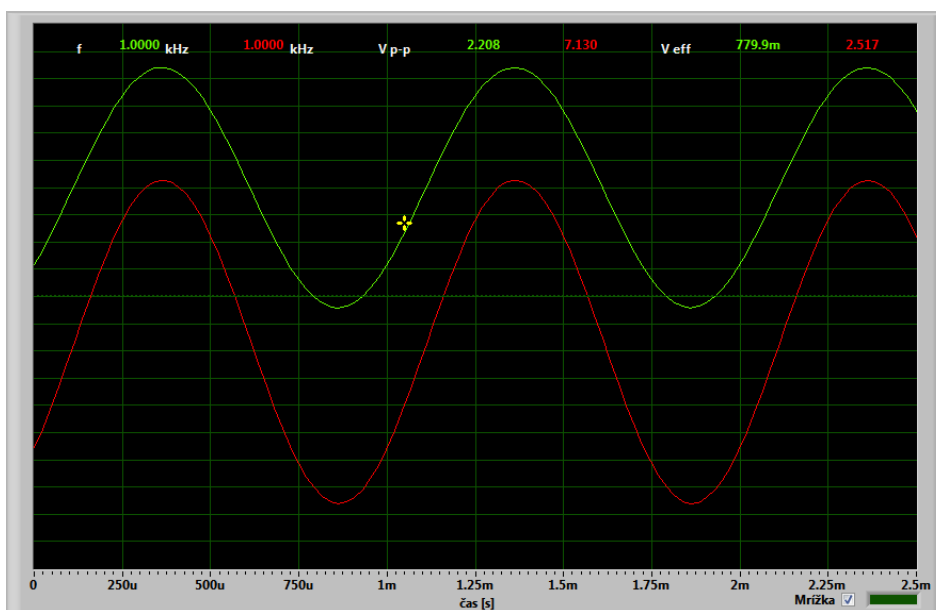
Základní funkčnost přístroje byla nejprve ověřena na osciloskopu. Následující průběhy byly pořízeny pomocí externí zvukové karty Focusrite Scarlet 2i2 a programu Scope [17]. Měření proběhlo při vstupní hodnotě $U=775$ mV. Průběhy jsou zachyceny pro levý kanál a frekvenci 1Khz. Zelenou barvou je zobrazen vstupní signál, červenou pak výstup z ekvalizéru.



Obr. 6.8 Průběh signálu při nastavení 0 dB na frekvenci 1 kHz

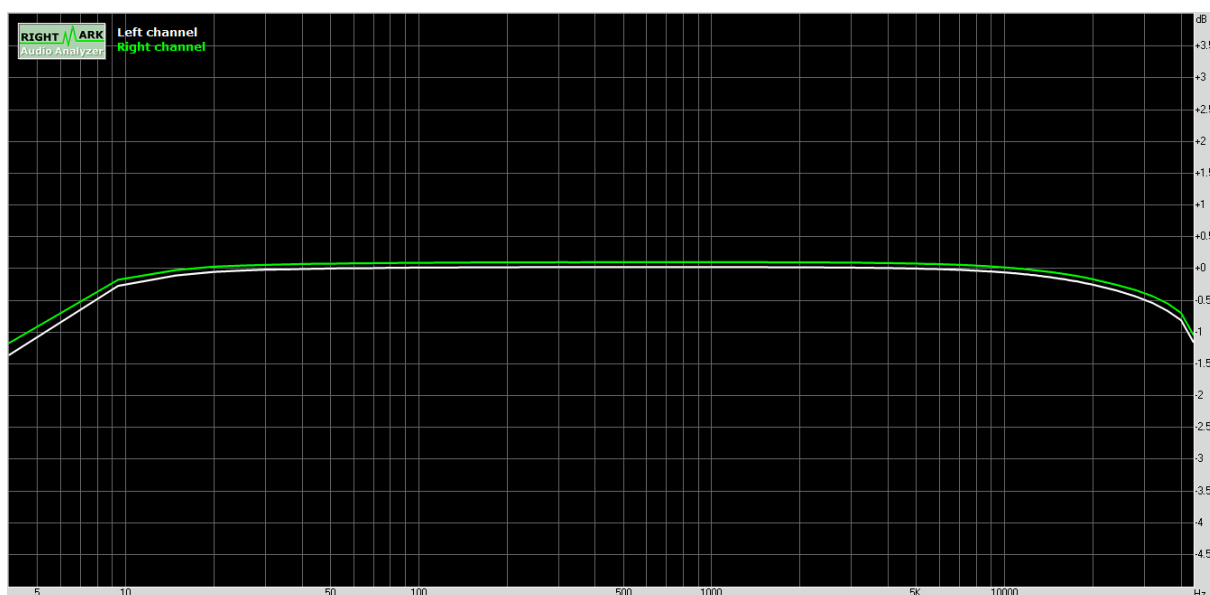


Obr. 6.9 Průběh signálu při nastavení -10 dB na frekvenci 1 kHz



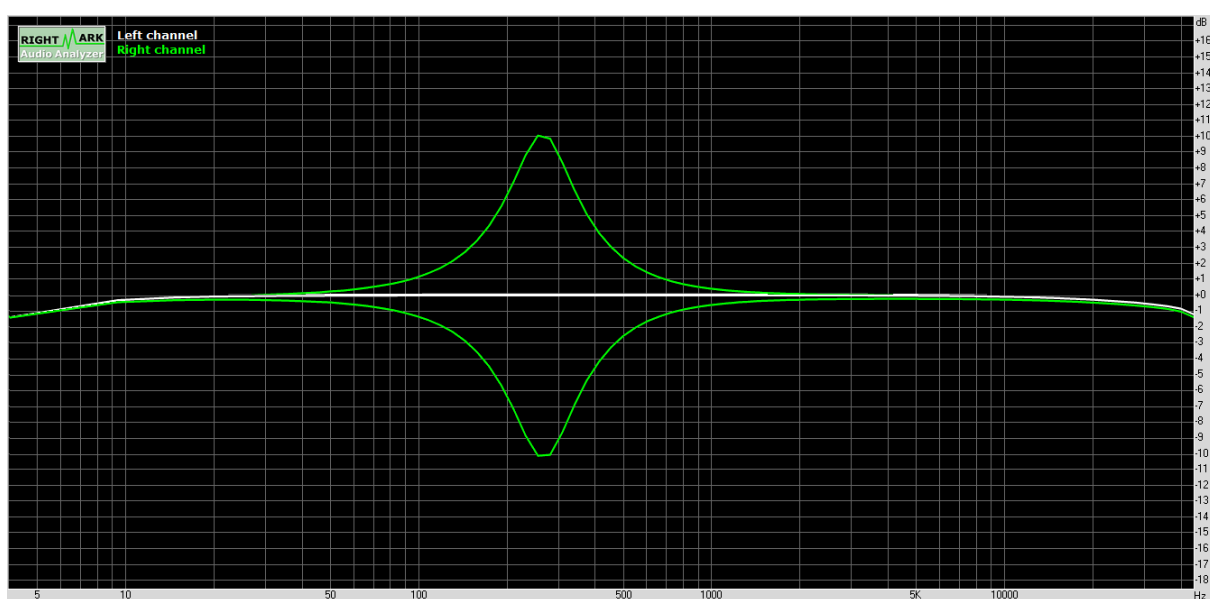
Obr. 6.10 Průběh signálu při nastavení 10 dB na frekvenci 1 kHz

Měření frekvenční charakteristiky proběhlo pomocí programu Rightmark audio analyzer. 6.25 [18]. Vzorkovací frekvence pro všechna měření byla nastavena na 96 kHz při bitové hloubce 16 bit. Na Obr. 6.11 je zobrazena frekvenční charakteristika ekvalizéru pro potenciometry nastavené na zesílení 0 dB. Jak je vidět z průběhu, frekvenční charakteristika je v audio pásmu 20 Hz-20kHz téměř rovná, na frekvenci 20 kHz je pokles cca 0,3 dB. Mezní kmitočet pro útlum 3 dB nelze vzhledem k omezenému frekvenčnímu rozsahu externí zvukové karty odečíst, nicméně by měl ležet přibližně na 100 kHz.



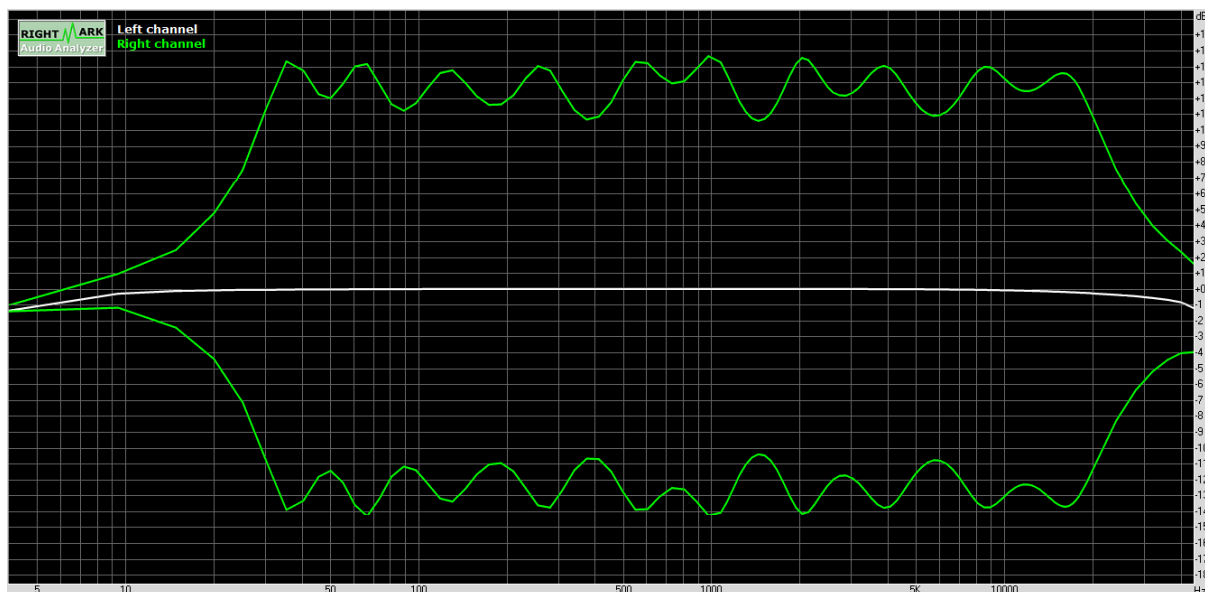
Obr. 6.11 Frekvenční charakteristika ekvalizéru pro zesílení 0 dB

Na obrázku Obr. 6.12 je zobrazeno frekvenční průběh na frekvenci 250 Hz. Jak je vidět, míra zesílení je v rozsahu ± 10 dB, přičemž ekvalizér byl navržen pro zesílení ± 12 dB.



Obr. 6.12 Frekvenční charakteristika PP na frekvenci 250 Hz

Následující obrázek Obr. 6.13 zobrazuje frekvenční charakteristiku při nastavených krajních hodnotách zesílení. Zde se je maximální míra zesílení přibližně ± 14 dB, hodnota zvlnění je cca 4 dB, což koresponduje s nasimulovanými průběhy.



Obr. 6.13 Frekvenční charakteristika v poloze $p = \max$, $p = \min$ a $p = 0.5$

Následující tabulka Tab. 6.5 udává srovnání požadovaných f_r . Změřené rezonanční kmitočty odpovídají teoretickým předpokladům, největší rozdíl jen na $f_r=500$ Hz, kde chyba činí 10 %. Tato okolnost byla způsobena osazením rezistoru jiné hodnoty v obvodu syntetické indukčnosti a to hodnoty 390 K Ω místo navržených 430 K Ω , z důvodu nedostupnosti dané součástky.

Požadováno	f_r [Hz]	31,5	63	125	250	500	1 K	2 K	4 K	8 K	16 K
Změřeno	f_r [Hz]	35	66	126	261	550	990	2 K	3,9 K	8,6 K	16,3 K

Tab. 6.5 Srovnání požadovaných a změřených f_r

Měření ostatních parametrů ekvalizéru probíhalo také pomocí programu Rightmark audio analyser verze 6.25. Zmíněný program kromě měření frekvenční charakteristiky umožňuje také měření odstupu signál/šum (noise level), dynamického rozsahu (dynamic range), harmonického zkreslení (THD), intermodulačního zkreslení (IMD) a přeslechů (stereo crosstalk). Měření probíhá metodou look-back record, tzn., že vstup a výstup kanálu zvukové karty je propojen. Před měřením ekvalizéru je třeba proměřit samotnou zvukovou kartu.

Test results								
Device:	Zvukova karta	Ekvalizer	[Empty]	[Empty]	[Empty]	[Empty]	[Empty]	[Empty]
Sampling mode:	16-bit, 96 kHz	16-bit, 96 kHz						
Frequency response (multitone), dB	+0.01, -0.05	+0.02, -0.15						
Noise level, dBA	-92.5	-92.4						
Dynamic range, dBA	92.6	92.4						
Total harmonic distortion (THD), %	0.017	0.017						
Intermodulation distortion + noise, %	0.018	0.018						
Stereo crosstalk, dB	-88.2	-86.9						
Intermodulation distortion + noise (swept freqs), %	0.016	0.016						
Frequency response (swept sine), dB	+0.0, -0.0	+0.0, -0.1						
Total harmonic distortion (swept freqs), d5								
	☒ Select	☒ Select	☐ Select	☐ Select	☐ Select	☐ Select	☐ Select	☐ Select
HINT: Right-click on result boxes to view the detailed reports...								

Obr. 6.14 Výstup z programu Rightmark audio analyzer

Na Obr. 6.14 je zobrazen výstup ze zmíněného programu, výsledky v levém sloupci jsou parametry samotné zvukové karty, výsledky v pravém sloupci pak vznikly při měření ekvalizéru. Jak je vidno, naměřené hodnoty se kromě přeslechů od sebe vůbec neliší, což znamená, že výsledné parametry ekvalizéru jsou lepší než má externí zvukové karta. Použité OZ mají dle datasheetu [19] harmonické zkreslení 0.00003 %, což leží hluboko pod hodnotou zkreslení zvukové karty. V případě přeslechů pak můžeme změřenou hodnotu považovat za parametr samotného ekvalizéru.

7 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo prostudovat funkci grafického ekvalizéru, zvolit vhodné obvodové zapojení a navrhnout zařízení vlastní, přičemž bylo nutné brát ohled na splnění zadaných podmínek, tedy možnost řízení tohoto ekvalizéru prostřednictvím mikrokontroléru. Bylo využito zapojení v praxi poměrně často užívané, v němž je říditelným prvkem potenciometr, namísto potenciometru klasického byl však aplikován potenciometr digitální. Na základě poznatků byly zvoleny parametry ekvalizéru následovně: 10 pásem (oktávový ekvalizér), maximální míra zesílení signálu ± 12 dB a frekvence rezonančních obvodů je dána: 31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 KHz, 2 KHz, 4 KHz, 8 KHz, 16 KHz.

Pro tyto parametry byl navržen obvod ekvalizéru a odsimulován pomocí programu PSpice. Simulace proběhla pro 2 obvodová zapojení, pro zapojení základní a zapojení upravené, jež by mělo z části negativní vlastnosti spočívající ve vzájemném ovlivňování vedlejších frekvenčních pásem eliminovat. Výsledky simulací jsou podrobněji popsány v předchozí kapitole. Mírně lepších vlastností dosahovalo zapojení modifikované, a proto bylo zvoleno pro celkovou koncepci přístroje.

Dále bylo nastíněno kompletní zapojení jednotlivých bloků přístroje. Pro komunikaci mikrokontroléru s digitálními potenciometry bylo z uvedených důvodů použito rozhraní I2C. K ovládání celého zařízení slouží mikrokontrolér firmy Atmel - Atmega16. Na pozici napětového a diferenčního zesilovače byl zvolen obvod firmy Texas Instruments - OPA1602, což je OZ určený výhradně pro audio zařízení nejvyšší zvukové kvality. Na pozici OZ v obvodu syntetické indukčnosti byl vybrán obvod stejného výrobce - TL 972. Pro dané obvodové řešení byl proveden návrh desky plošných spojů, jež byly posléze osazeny součástkami, a celé zařízení bylo oživeno.

Další kapitola se zabývá popisem programu pro MCU a PC. Zdrojový kód je rozsáhlý, a proto je pozornost zaměřena pouze na popis základních a nejdůležitějších struktur programu. V práci je nastíněn princip ovládání přístroje pomocí tlačítek, dále je popsána obsluha připojeného LED displeje a pozornost je věnována také komunikaci s digitálními potenciometry pomocí rozhraní I2C. Práce také popisuje fungování jednoduchého programu pro ovládání ekvalizéru pomocí PC.

Poslední část práce se zabývá zhodnocením výsledků. Naměřené průběhy jsou obdobné jako v případě simulace. Přístroj byl navržen pro míru zesílení ± 12 dB, ale míra regulace při nastavení zesílení na jedné frekvenci dosahuje hodnot pouze ± 10 dB. K tomu bylo přihlédnuto při tvorbě programového vybavení a přístroj tak umožňuje nastavit zesílení ve zmíněném rozsahu. Při nastavení všech potenciometrů na zesílení ± 10 dB je výsledná frekvenční charakteristika totožná jako v případě simulace. Maximální hodnota přenosu je ± 14 dB, při zvlnění cca 4 dB. Ostatní parametry přístroje jsou následující: odstup S/Š < -92 dB, THD+N $< 0,017$ %, IMD+N $< 0,018$ % a přeslech mezi kanály < -87 dB. Zhotovený přístroj je plně funkční, stejně i ovládání zařízení prostřednictvím PC. Fotky finálního výrobku jsou uvedeny v příloze.

BIBLIOGRAFIE

- [1] DOSTÁL, T. *Elektrické filtry*. Brno: Skripta FEKT VUT, 2007.
- [2] HÁJEK, K. a J. SEDLÁČEK. *Kmitočtové filtry*. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 535 s.. ISBN 80-7300-023-7.
- [3] SEDLÁČEK, J. a J. VALSA. *Elektrotechnika II*. Brno: Skripta FEKT VUT, 2006.
- [4] Wikipedie. *Ekvalizér* [online]. [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ekvalizér>
- [5] KRATOCHVÍL, T. *Nízkofrekvenční a audio elektronika (prezentace k předmětu 2011/12)*. Brno: FEKT VUT.
- [6] VLČEK, J. Devítipásmový ekvalizér. *Amatérské radio*. Praha: Amaro, s.r.o, 2000, **2000** (V).
- [7] BOHN, D. In: *Bandwidth in Octaves Versus Q in Bandpass Filters* [online]. 2008 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: http://www.rane.com/pdf/ranenotes/Bandwidth_in_Octaves_vs_Q_in_Bandpass_Filters.pdf
- [8] ATMEL CORPORATION. *8-bit Microcontroller ATmega16* [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf>
- [9] INTERSIL. *ISL22343 Quad Digitally Controlled Potentiometer* [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/fn64/fn6423.pdf>
- [10] FRÝZA, T. *Mikroprocesorová technika a embedded systémy*. Brno: Skripta FEKT VUT, 2011.
- [11] TEXAS INSTRUMENTS. *MAX232* [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf>

- [12] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. *LM7805* [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM7805.pdf>
- [13] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. *LM7905* [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM7905.pdf>
- [14] MIDAS. *MC22005A6W* [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://www.midasdisplays.com/pdf/MC22005A.pdf>
- [15] FLEURY, P. *LCD Library for HD44870 based LCD's* [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://homepage.hispeed.ch/peterfleury/>
- [16] FLEURY, P. *I2C Master Interface* [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://homepage.hispeed.ch/peterfleury/avr-software.html>
- [17] ZEITNITZ, C. *Soundcard Oscilloscope* [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://www.zeitnitz.de/Christian/index>.
- [18] LUKIV, A. et al. *RightMark Audio Analyzer 6.2.5* [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: http://audio.rightmark.org/index_new.shtml
- [19] TEXAS INSTRUMENTS. *OPA1602* [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa1602.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

DP	–	dolní propust
EQ	–	ekvalizér
fr	–	rezonanční frekvence
f_m	–	mezní frekvence
HP	–	horní propust
Ku	–	modul přenosu
MCU	–	mikrokontrolér
OZ	–	operační zesilovač
PP	–	pásmová propust
PZ	–	pásmová zádrž
Q	–	činitel jakosti
DPS	–	deska plošných spojů

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Schéma zapojení dolní propusti DP	3
Obr. 2.2 Modulová charakteristika dolní propusti DP	4
Obr. 2.3 Schéma zapojení horní propusti HP	4
Obr. 2.4 Modulová charakteristika horní propusti HP	5
Obr. 2.5 Zapojení sériového rezonančního obvodu	5
Obr. 2.6 Schéma zapojení pásmové propusti PP	6
Obr. 2.7 Modulová charakteristika pásmové propusti PP pro různé činitele jakosti	6
Obr. 2.8 Schéma zapojení pásmové zádrže PZ	7
Obr. 2.9 Modulová charakteristika pásmové zádrže PZ pro různé činitele jakosti.....	7
Obr. 3.1 Zapojení pásmového filtru [4].....	9
Obr. 3.2 Schéma syntetické indukčnosti [4].....	9
Obr. 3.3 Zapojení pro minimální přenos vlevo a maximální přenos vpravo [1]	10
Obr. 4.1 Blokové schéma zařízení.....	14
Obr. 4.2 Obvodové schéma ekvalizéru	16
Obr. 4.3 Obvodové schéma desky řízení.....	17
Obr. 4.5 Obvodové schéma zdroje	18
Obr. 4.4 Obvodové schéma desky tlačítek	18
Obr. 5.1 Blokové schéma menu přístroje	19
Obr. 5.2 Vývojový diagram menu.....	20
Obr. 5.3 Ukázka programu Graphic equalizer	26
Obr. 5.4 Vývojový diagram programu graphic equalizer	26
Obr. 6.1 Frekvenční charakteristika jednotlivých pásmových propustí	27
Obr. 6.2 Frekvenční charakteristika pro 2 sumační obvody v poloze $p = \max$, $p = \min$ a $p = 0.5$	28
Obr. 6.3 Frekvenční charakteristika pro 1 sumační obvod v poloze $p = \max$, $p = \min$ a $p = 0.5$	28
Obr. 6.4 Frekvenční charakteristika PP na frekvenci 250 Hz pro zapojení 1 sumačního obvodu	28
Obr. 6.5 Frekvenční charakteristika PP na frekvenci 250 Hz pro zapojení 2 sumačních obvodů	29
Obr. 6.6 Simulační schéma jednoho kanálu pro dva sumační obvody	30
Obr. 6.7 Simulační schéma jednoho kanálu pro jeden sumační obvod.....	31
Obr. 6.8 Průběh signálu při nastavení 0 dB na frekvenci 1 kHz	32
Obr. 6.9 Průběh signálu při nastavení -10 dB na frekvenci 1 kHz	33
Obr. 6.10 Průběh signálu při nastavení 10 dB na frekvenci 1 kHz	33
Obr. 6.11 Frekvenční charakteristika ekvalizéru pro zesílení 0 dB	34
Obr. 6.12 Frekvenční charakteristika PP na frekvenci 250 Hz	34
Obr. 6.13 Frekvenční charakteristika v poloze $p = \max$, $p = \min$ a $p = 0.5$	35
Obr. 6.14 Výstup z programu Rightmark audio analyzer	36

SEZNAM TABULEK

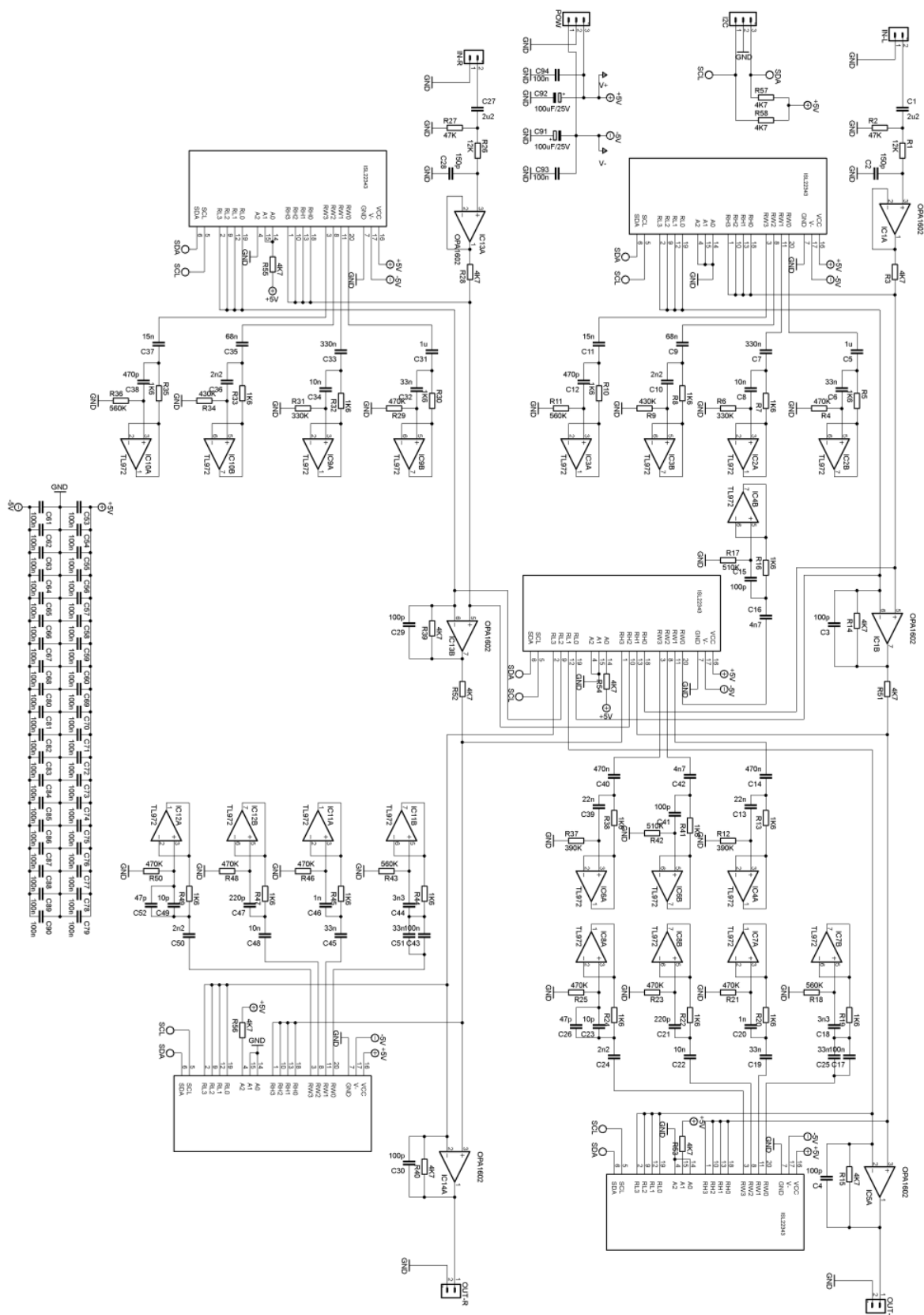
Tab. 3.1 Korekční kmitočty grafických ekvalizérů	9
Tab. 3.2 Porovnání vypočtených a zvolených hodnot součástek pásmových propustí.....	12
Tab. 5.1 Hodnoty fyzické adresy a adresy registru pro jednotlivé frekvence	23
Tab. 5.2 Tabulka přepočteného zesílení na 8 bit hodnotu.....	23
Tab. 6.1 Porovnání požadovaného a změřené fr	27
Tab. 6.2 Výstupní napětí zdroje	32
Tab. 6.3 Klidový odběr desky ekvalizéru.....	32
Tab. 6.4 Srovnání proudového odběru pro různou intenzitu podsvětlení	32
Tab. 6.5 Srovnání požadovaných a změřených fr	35

SEZNAM PŘÍLOH

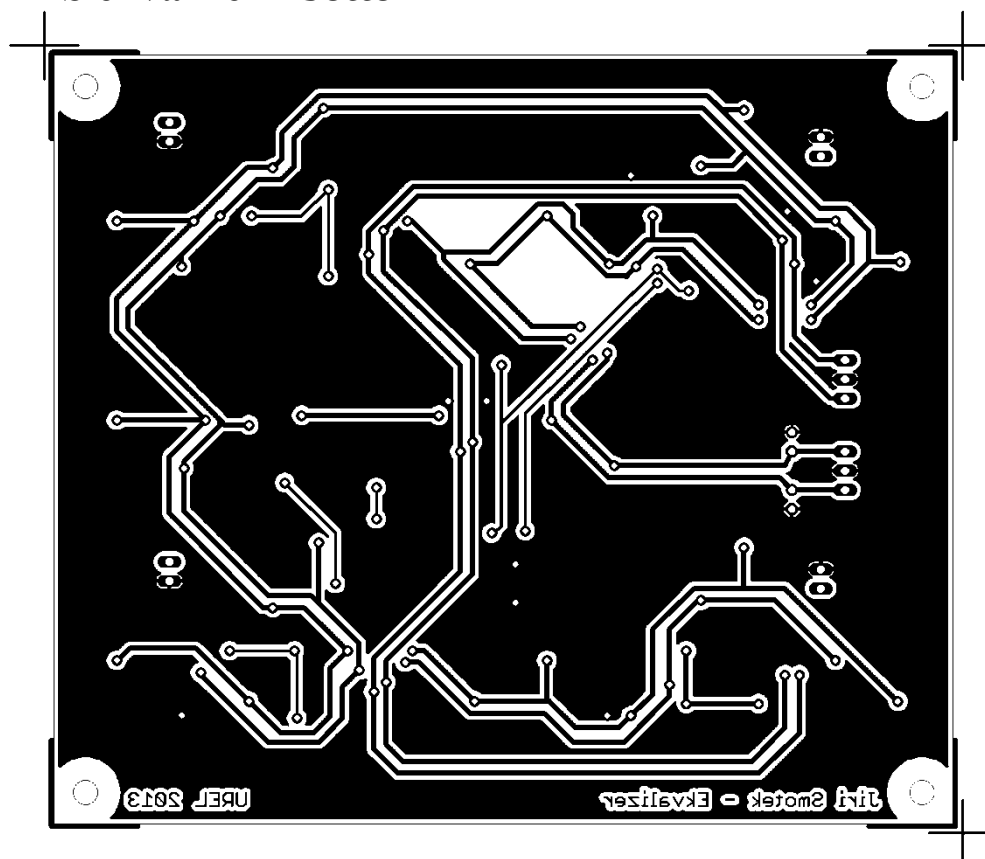
A	Návrh zařízení a seznam součástek	42
A.1	Obvodové schéma ekvalizéru.....	42
A.2	DPS ekvalizér - bottom	43
A.3	DPS ekvalizér - top	44
A.4	Osazovací plán ekvalizéru.....	45
A.5	Seznam součástek ekvalizéru	45
A.6	Obvodové schéma řízení	47
A.7	DPS řízení – bottom	47
A.8	Osazovací plán DPS řízení – top.....	48
A.9	Osazovací plán DPS řízení – bottom.....	48
A.10	Seznam součástek DPS řízení	48
A.11	Obvodové schéma tlačítek.....	49
A.12	DPS tlačítek – bottom	49
A.13	Osazovací plán DPS tlačítek – top	50
A.14	Osazovací plán DPS tlačítek – bottom.....	50
A.15	Seznam součástek DPS řízení	50
A.16	Obvodové schéma zdroje	51
A.17	DPS zdroje – bottom	51
A.18	Osazovací plán DPS zdroje	52
A.19	Seznam součástek DPS zdroje	52
B	Fotografie ekvalizéru	53
B.1	Pohled zepředu	53
B.2	Pohled zezadu.....	53
B.3	Vnitřek přístroje	53
C	Ukázka menu	54

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ A SEZNAM SOUČÁSTEK

A.1 Obvodové schéma ekvalizéru

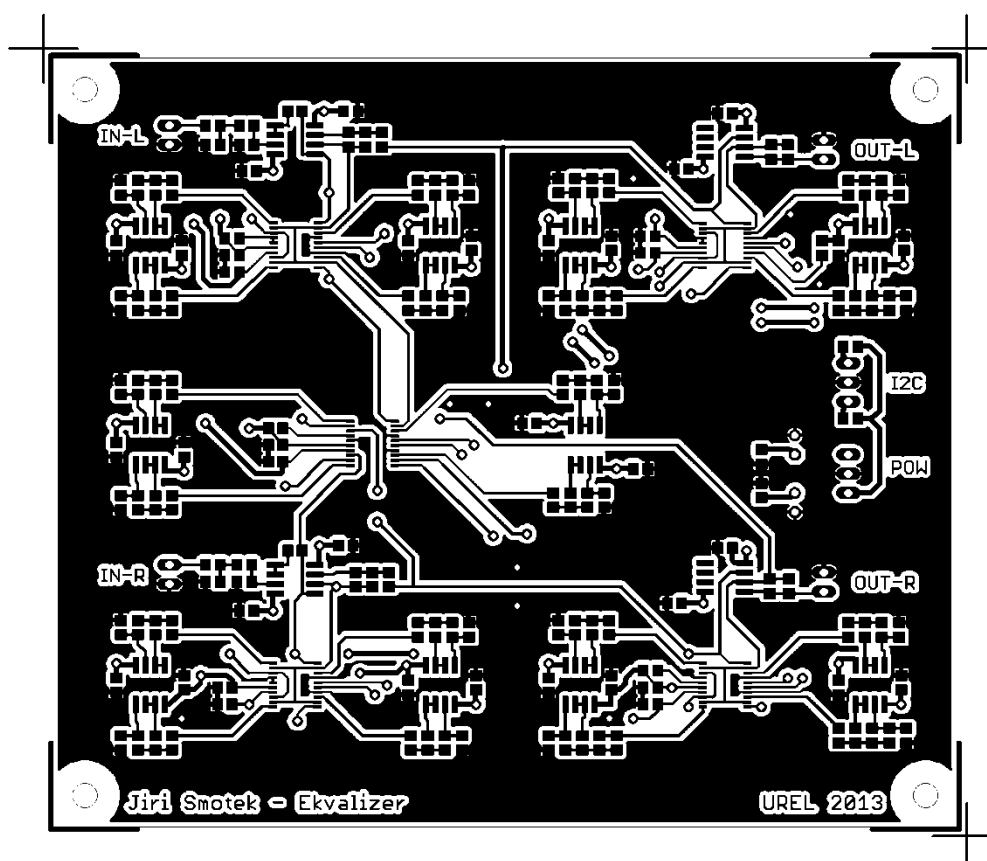


A.2 DPS ekvalizér - bottom



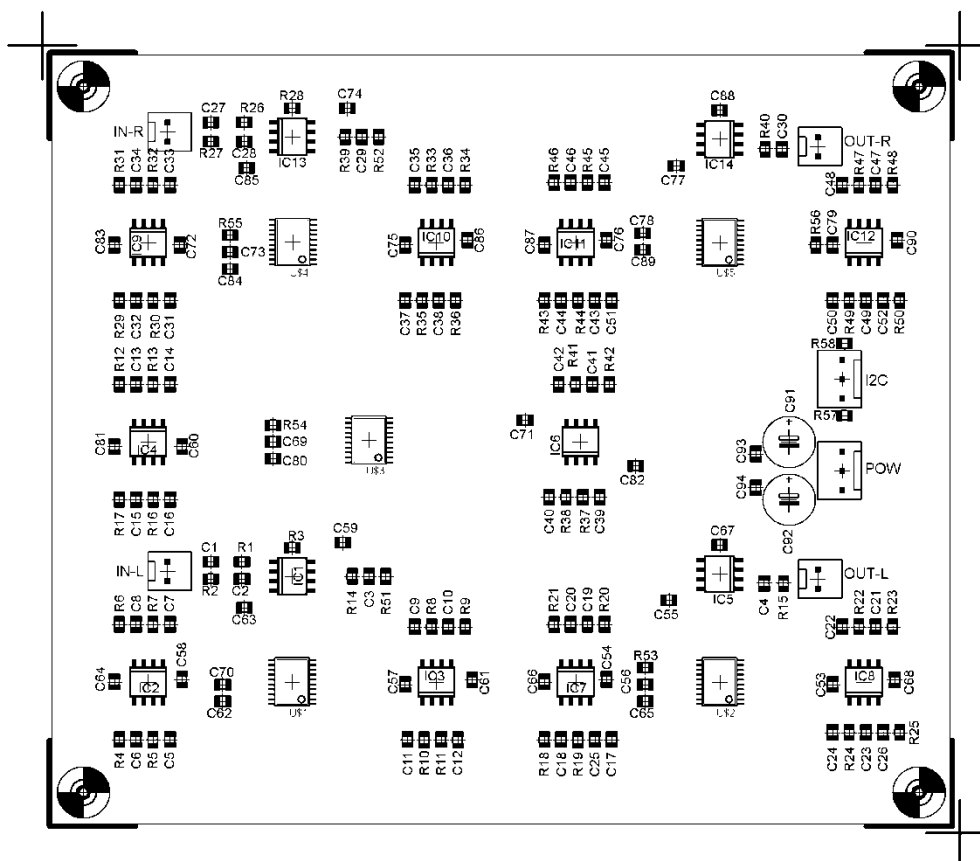
Rozměry desky 102x119 [mm], měřítko M 1:1

A.3 DPS ekvalizér - top



Rozměry desky 102x119 [mm], měřítko M 1:1

A.4 Osazovací plán ekvalizéru



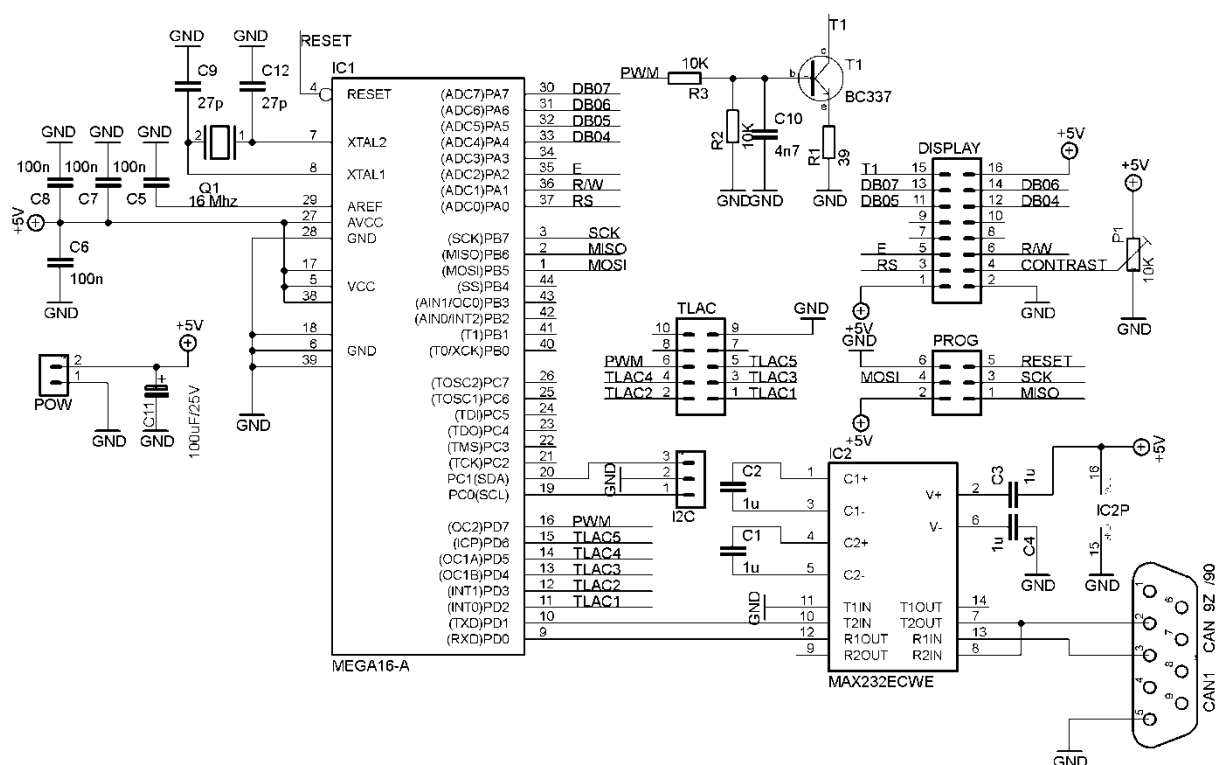
Rozměry desky 102x119 [mm], měřítko M 1:1

A.5 Seznam součástek ekvalizéru

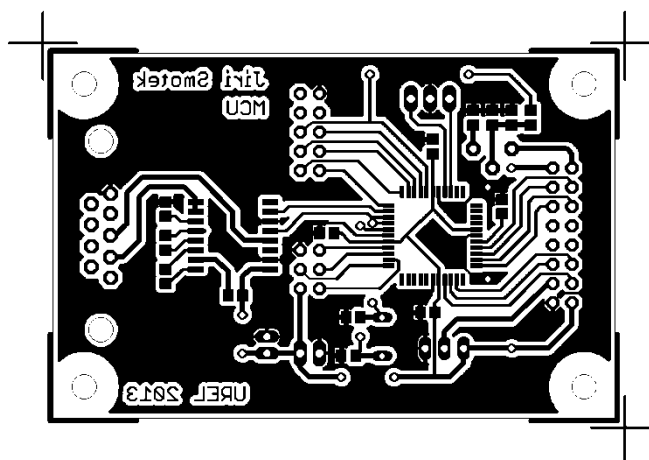
Množství	Hodnota	Pouzdřo	Označení
20	1K6	R-EU_R0805	R5, R7, R8, R10, R13, R16, R19, R20, R22, R24, R30, R32, R33, R35, R38, R41, R44, R45, R47, R49
14	4K7	R-EU_R0805	R3, R14, R15, R28, R39, R40, R51, R52, R53, R54, R55, R56, R57, R58
2	12K	R-EU_R0805	R1, R26
2	47K	R-EU_R0805	R2, R27
2	330K	R-EU_R0805	R6, R31
2	390K	R-EU_R0805	R12, R37
2	430K	R-EU_R0805	R9, R34
8	470K	R-EU_R0805	R4, R21, R23, R25, R29, R46, R48, R50
2	510K	R-EU_R0805	R17, R42
4	560K	R-EU_R0805	R11, R18, R36, R43
2	10p	C-EUC0805	C23, C49
2	47p	C-EUC0805	C26, C52
6	100p	C-EUC0805	C3, C4, C15, C29, C30, C41
2	150p	C-EUC0805	C2, C28

2	220p	C-EUC0805	C21, C47
2	470p	C-EUC0805	C12, C38
2	1n	C-EUC0805	C20, C46
4	2n2	C-EUC0805	C10, C24, C36, C50
2	3n3	C-EUC0805	C18, C44
2	4n7	C-EUC0805	C16, C42
4	10n	C-EUC0805	C8, C22, C34, C48
2	15n	C-EUC0805	C11, C37
2	22n	C-EUC0805	C13, C39
6	33n	C-EUC0805	C6, C19, C25, C32, C45, C51
2	68n	C-EUC0805	C9, C35
42	100n	C-EUC0805	C17, C43, C53, C54, C55, C56, C57, C58, C59, C60, C61, C62, C63, C64, C65, C66, C67, C68, C69, C70, C71, C72, C73, C74, C75, C76, C77, C78, C79, C80, C81, C82, C83, C84, C85, C86, C87, C88, C89, C90, C93, C94
2	330n	C-EUC0805	C7, C33
2	470n	C-EUC0805	C14, C40
2	1u	C-EUC0805	C5, C31
2	2u2	C-EUC0805	C1, C27
2	100uF/25V	CPOL-EUE2.5-7	C91, C92
5	ISL22343	ISL22343	U\$1, U\$2, U\$3, U\$4, U\$5
4	OPA1602	OPA1602	IC1, IC5, IC13, IC14
10	TL972	TL972	IC2, IC3, IC4, IC6, IC7, IC8, IC9, IC10, IC11, IC12
4		PSH02-02P	IN-L, IN-R, OUT-L, OUT-R
2		PSH02-03P	I2C, POW

A.6 Obvodové schéma řízení

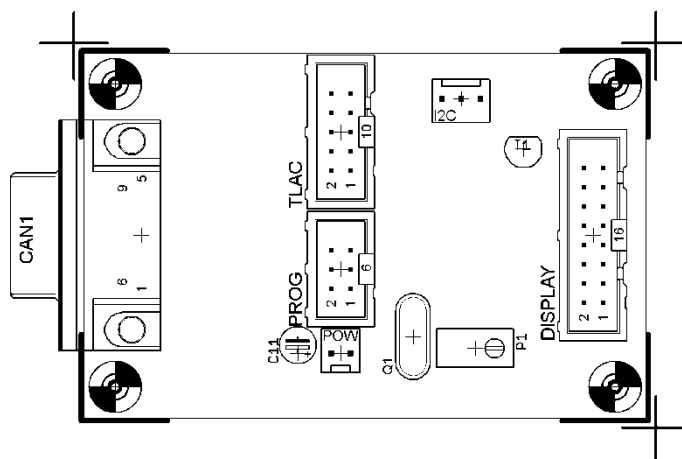


A.7 DPS řízení – bottom



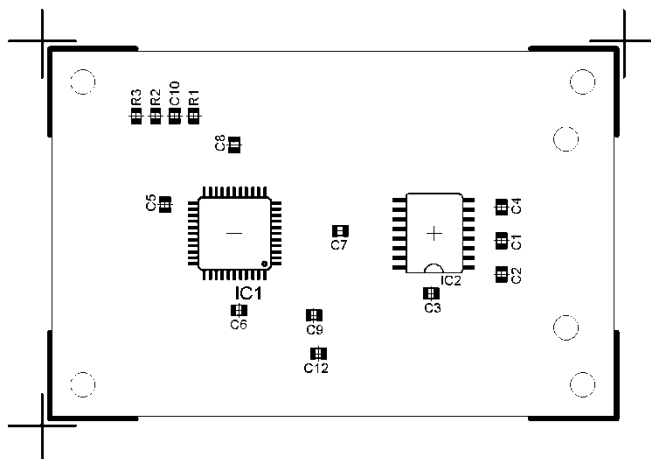
Rozměry desky 48x74 [mm], měřítko M 1:1

A.8 Osazovací plán DPS řízení – top



Rozměry desky 48x74 [mm], měřítko M 1:1

A.9 Osazovací plán DPS řízení – bottom



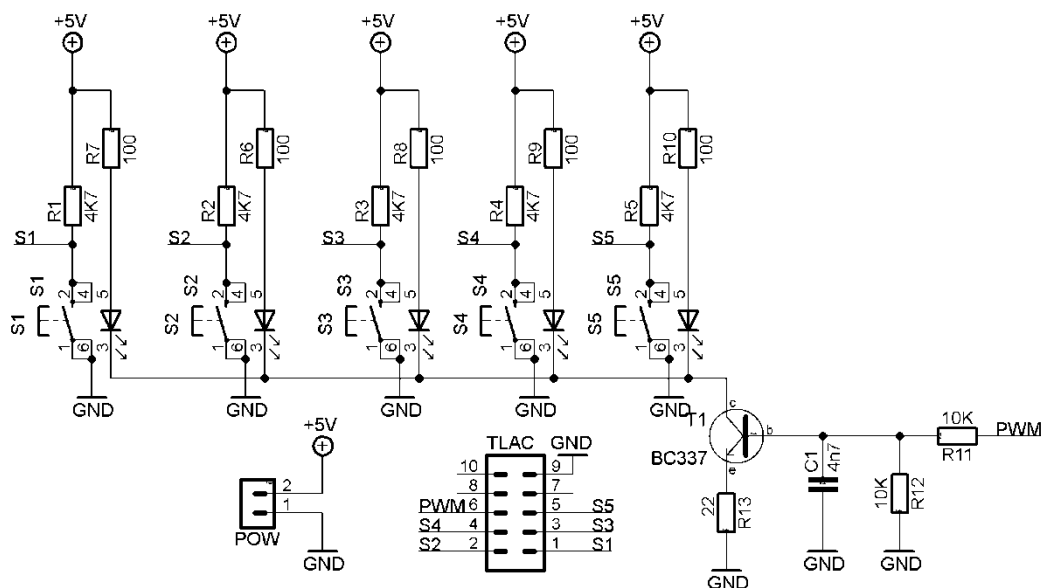
Rozměry desky 48x74 [mm], měřítko M 1:1

A.10 Seznam součástek DPS řízení

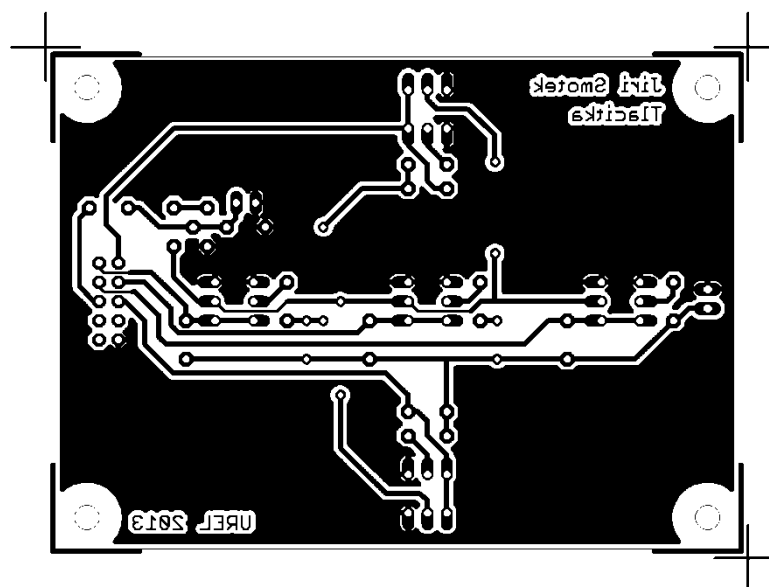
Množství	Hodnota	Pouzdro	Označení
1	39	R-EU_R0805	R1
2	10K	R-EU_R0805	R2, R3
1	10K	TRIMR64W	P1
2	27p	C-EUC0805	C9, C12
1	4n7	C-EUC0805	C10
4	100n	C-EUC0805	C5, C6, C7, C8
4	1u	C-EUC0805	C1, C2, C3, C4
1	100uF/25V	ELEKTROLYT_2	C11
1	BC337	BC337	T1
1	MAX232ECWE	MAX232ECWE	IC2
1	MEGA16-A	MEGA16-A	IC1
1	16 MHz	XTAL/S	Q1

1		MLW6	PROG
1		MLW10	TLAC
1		MLW16	DISPLAY
1		PSH02-02P	POW
1		PSH02-03P	I2C
1	CAN_9Z_/90	CAN_9Z_/90	CAN1

A.11 Obvodové schéma tlačítek

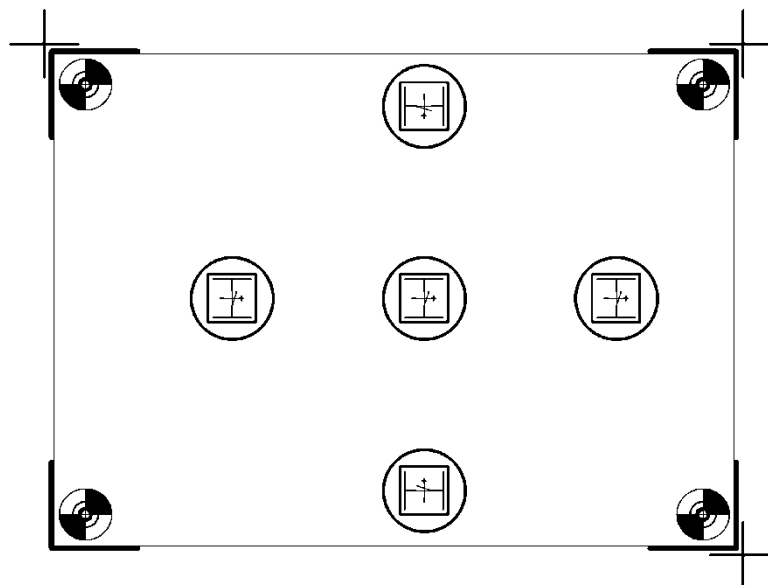


A.12 DPS tlačítek – bottom



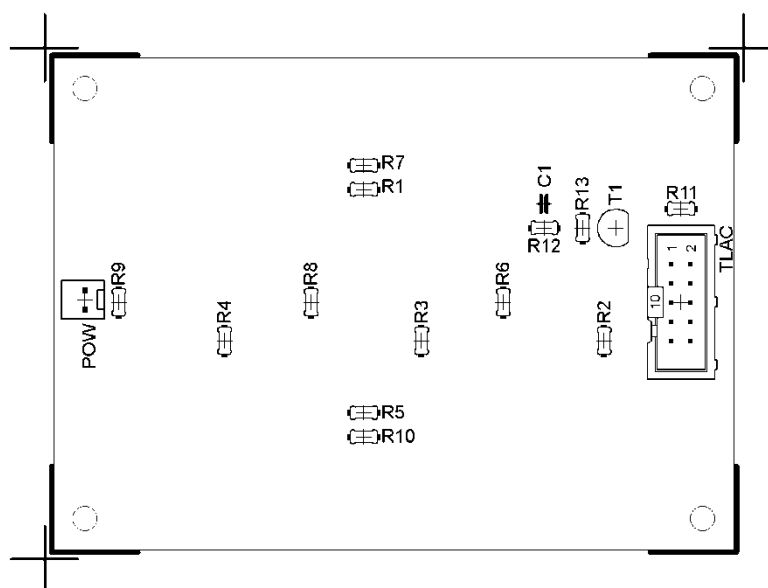
Rozměry desky 65x90 [mm], měřítko M 1:1

A.13 Osazovací plán DPS tlačítek – top



Rozměry desky 65x90 [mm], měřítko M 1:1

A.14 Osazovací plán DPS tlačítek – bottom



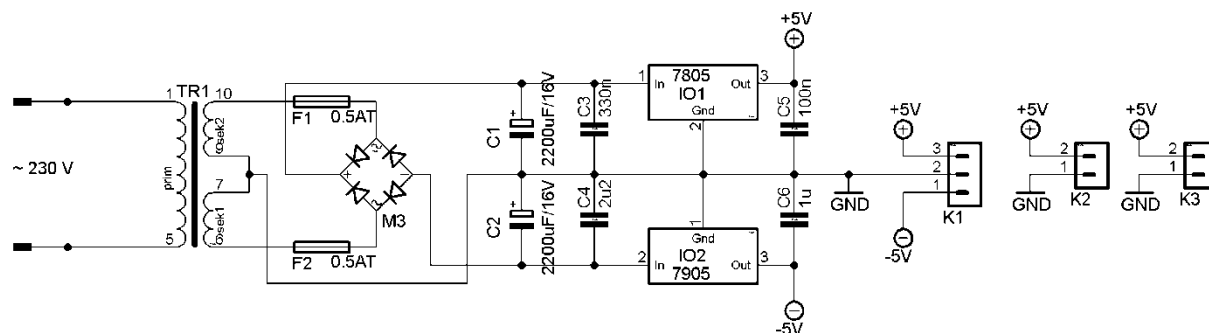
Rozměry desky 65x90 [mm], měřítko M 1:1

A.15 Seznam součástek DPS řízení

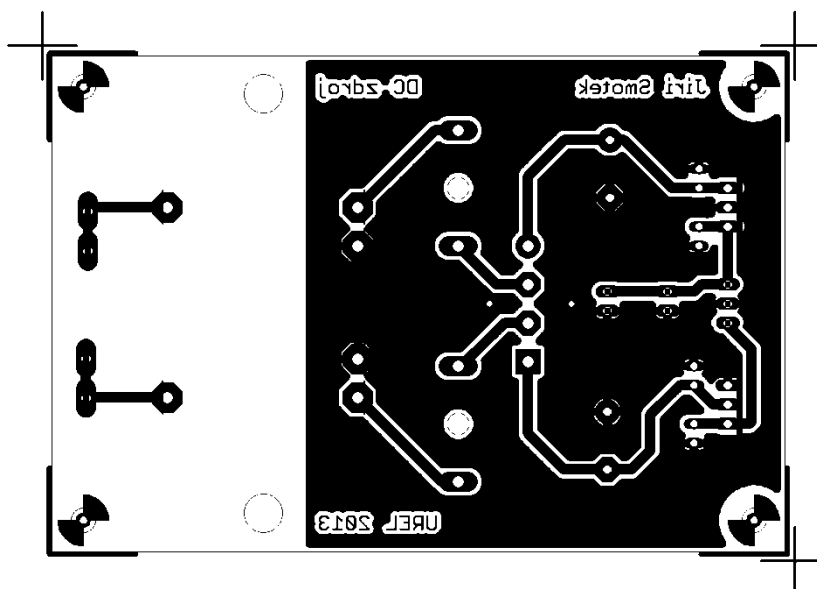
Množství	Hodnota	Pouzdro	Označení
1	22	R_5	R13
5	100	R_5	R6, R7, R8, R9, R10
5	4K7	R_5	R1, R2, R3, R4, R5
2	10K	R_5	R11, R12
1	4n7	KERAMIK_2,5	C1
1	BC337	BC337	T1

5		PDT	S1, S2, S3, S4, S5
1		MLW10	TLAC
1		PSH02-02P	POW

A.16 Obvodové schéma zdroje

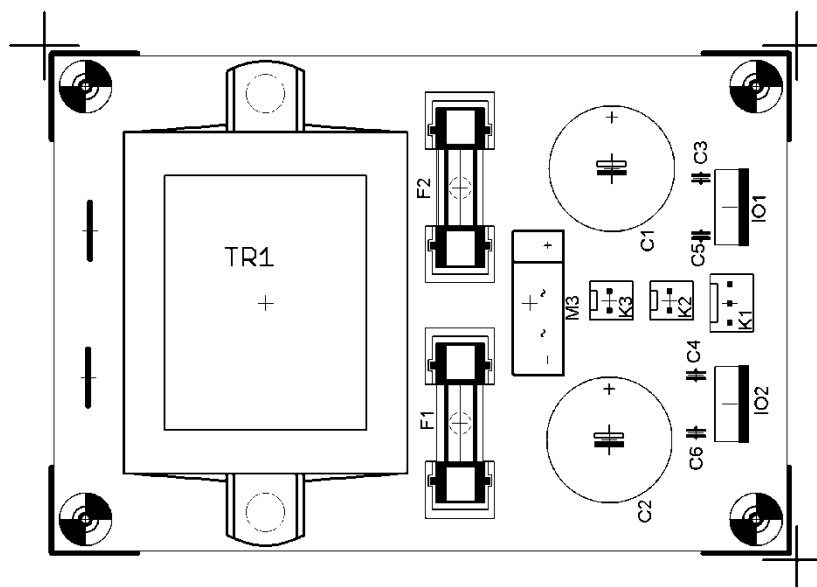


A.17 DPS zdroje – bottom



Rozměry desky 65x97 [mm], měřítko M 1:1

A.18 Osazovací plán DPS zdroje



Rozměry desky 65x90 [mm], měřítko M 1:1

A.19 Seznam součástek DPS zdroje

Množství	Hodnota	Pouzdro	Označení
2		PSH02-02P	K2, K3
1		PSH02-03P	K1
2	0.5AT	FUSEGSH15	F1, F2
1	100n	C-KERAMIK_2,5	C5
1	330n	C-KERAMIK_2,5	C3
1	1u	C-KERAMIK_2,5	C6
1	2u2	C-KERAMIK_2,5	C4
2	2200uF/16V	CPOL-EUE7.5-16	C1, C2
1	7805	78_STOJ?	IO1
1	7905	79_STOJ?	IO2
1	D-MUSTEK_B250C4000	D-MUSTEK_B250C4000	M3
2	PIN2F061.040	PIN2F061.040	J1, J2

B FOTOGRAFIE EKVALIZÉRU

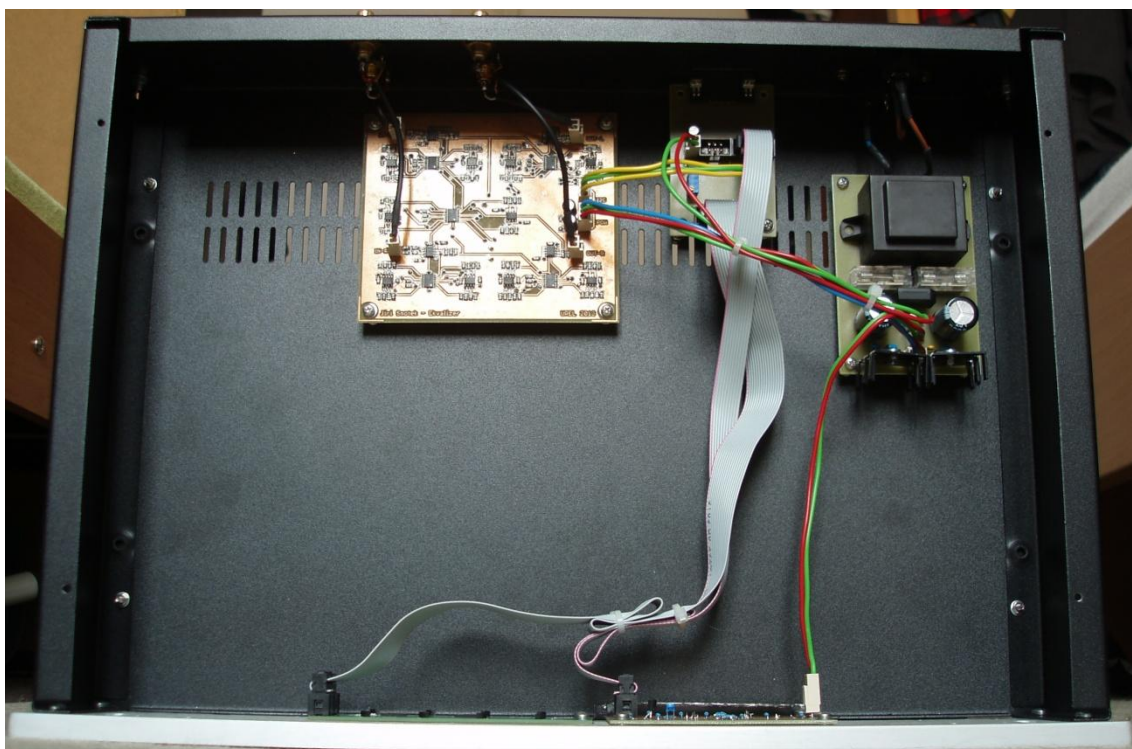
B.1 Pohled zepředu



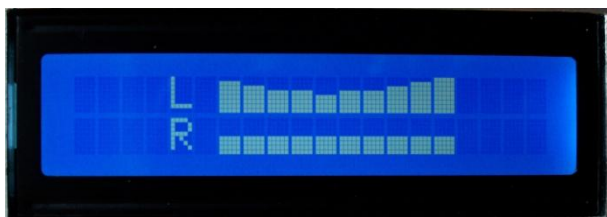
B.2 Pohled zezadu



B.3 Vnitřek přístroje



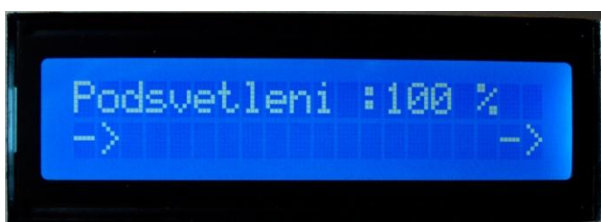
C UKÁZKA MENU



Ukázka grafického ekvalizéru, menu č. 0



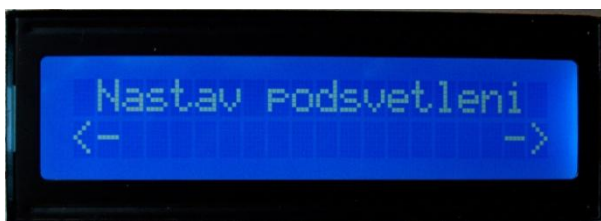
Ukázka podsvětlení, menu č.5, 1. položka



Menu č.5, 1. položka



Menu č.1, 1. položka



Menu č.2, 2. položka



Menu č.3,4 6.položka



Menu č.2, 1. položka



Menu č.2, 3. položka



Menu č.2, 2. položka