



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

KONCOVÝ ZESILOVAČ A SUBWOOFER PRO AUTOMOBIL

AUTOMOTIVE AUDIO AMPLIFIER AND SUBWOOFER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

René Kolka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: René Kolka

ID: 164744

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Koncový zesilovač a subwoofer pro automobil

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy a funkcí koncových zesilovačů ve třídě H. Dále svoje studium zaměřte na obvody umožňující konstrukci tzv. "subwooferů" a to včetně konstrukce ozvučnice a výběru vhodného typu basového reproduktoru(ů). Na základě získaných zkušeností navrhnete obvodové zapojení koncového audio zesilovače s nominálním výkonem 4 x 25 W a zesilovače pro subwoofer s nominálním výkonem 2 x 70 W. Dále navrhnete inteligentní ovládání celého zařízení pomocí vhodného mikroprocesoru a navrhnete napájecí část vhodnou pro použití v osobním automobilu.

Navržené zapojení realizujte a odzkoušejte jeho vlastnosti. Na realizovaných zesilovačích vyzkoušejte naměřit některé základní parametry např. výstupní výkon, celkové harmonické zkreslení apod. Realizované zesilovače sestavte v jeden celek spolu s realizovaným ovládáním a vyzkoušejte celkovou funkčnost realizovaného systému.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ŠTÁL, P. Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D. BEN - technická literatura, 2008, 198 stran, ISBN: 8073002305.

[2] Texas Instruments: PCM2912A - USB DAC; [online], [cit. 22. 5. 2015]. Dostupné na [www: http://www.ti.com/lit/ds/sles216/sles216](http://www.ti.com/lit/ds/sles216/sles216).

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 26.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D., 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

Bakalářská práce popisuje návrh a realizaci dvou výkonových zesilovačů pro subwoofer a pro čtyři základní automobilové reproduktory. Dále je součástí práce řešení napájecích obvodů těchto zesilovačů. Ovládání zesilovačů je realizováno pomocí procesoru.

Bakalářská práce se dále věnuje problematice spojené s ozvučením automobilu, zejména se zaměřuje na rozmístění reproduktorů a výrobu kvalitního subwooferu a ozvučnice.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zesilovač, automobil, třída A, třída B, třída AB, třída C, třída D, třída G, třída H, reproduktor, subwoofer, ozvučnice, ATmega 16, aktivní výhybka, regulace hlasitosti, měnič napětí, napájecí napětí, měření.

ABSTRACT

Bachelor's thesis deals with the design and realization of two performance amplifiers for a subwoofer and for four basic car loud-speakers. The following part of the thesis is dealing with the power circuits of the amplifiers. The control of the amplifiers is realized by processor. The thesis is also dealing with the problems caused by sound system installation in a car, and concerns mainly with the boosters position and with producing high quality subwoofer and baffle-board.

KEYWORDS

Amplifier, car, class A, class B, class AB, class C, class D, class G, class H, loud-speaker, subwoofer, baffle-board, ATmega 16, active crossover, volume control, voltage converter, power voltage, measurement.

KOLKA, R. *Koncový zesilovač a subwoofer pro automobil*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 11 s., 3 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma koncový zesilovač a subwoofer pro automobil jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Dřínovskému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	1
1 Třídy zesilovačů	2
1.1 Zesilovač ve třídě A	2
1.2 Zesilovač ve třídě B.....	2
1.3 Zesilovač ve třídě AB.....	2
1.4 Zesilovač ve třídě C.....	2
1.5 Zesilovač ve třídě D	3
1.6 Zesilovač ve třídě G	3
2 Zesilovač ve třídě H	4
2.1.1 Plynulé napájení koncových tranzistorů.....	4
2.1.2 Skokové napájení koncových tranzistorů.....	4
3 Ozvučení automobilu	5
3.1 Subwoofer.....	5
3.1.1 Basový reproduktor.....	6
3.1.2 Ozvučnice	7
4 Návrh zařízení	10
4.1 Napájení zařízení.....	10
4.2 Vstupní přepínač	11
4.3 Obvod regulace hlasitosti	11
4.4 Návrh aktivní výhybky.....	12
4.5 Zesilovač 2x70W	14
4.6 Zesilovač 4x25 W	15
4.7 Využití mikroprocesoru ATmega 16.....	16
5 Realizace zařízení	18
5.1 Návrh a výroba bassreflexové ozvučnice	18
5.1.1 Návrh.....	18
5.1.2 Konstrukce.....	18
5.2 Návrh desek plošných spojů	19
5.2.1 Návrh desky plošného spoje pro výkonovou jednotku.....	19

5.2.2	Návrh desky plošného spoje pro řídicí jednotku.....	19
5.2.3	Návrh desky plošného spoje pro tlačítka.....	19
5.3	Umístění do přístrojové skříně.....	19
5.3.1	Výkonová jednotka.....	19
5.3.2	Řídicí jednotka.....	20
6	Řídicí program	21
6.1.1	Popis programu.....	21
7	Měření základních charakteristik	22
7.1	Měření koncového zesilovače LM3886.....	22
7.1.1	Měření modulové kmitočtové charakteristiky.....	22
7.1.2	Měření celkového harmonického zkreslení.....	23
7.1.3	Měření maximálního výstupního výkonu.....	25
7.1.4	Měření vstupní impedance zesilovače.....	25
7.1.5	Měření výstupní impedance zesilovače.....	26
7.2	Měření koncového zesilovače TDA7388.....	26
7.2.1	Měření modulové kmitočtové charakteristiky.....	26
7.2.2	Měření celkového harmonického zkreslení.....	28
7.2.3	Měření maximálního výstupního výkonu.....	29
7.2.4	Měření vstupní impedance zesilovače.....	29
7.2.5	Měření výstupní impedance zesilovače.....	30
7.3	Měření přeladitelné aktivní výhybky.....	30
7.4	Měření regulace hlasitosti.....	31
	Použité měřicí přístroje	31
8	Závěr	32
	Literatura	33
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	34
	Seznam příloh	35

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Možné rozmístění reproduktorů v automobilu. [3]	5
Obrázek 2. Uzavřena ozvučnice. [4]	7
Obrázek 3. Bassreflexová ozvučnice. [4]	7
Obrázek 4. Band-pass ozvučnice. [4]	9
Obrázek 5. Blokové schéma navrženého zařízení.....	10
Obrázek 6. Schéma zapojení regulace hlasitosti. [(příloha A.1)]	11
Obrázek 7. Simulace regulace hlasitosti pro různé hodnoty odporu potenciometru.....	12
Obrázek 8. Schéma dolní propusti Sallen-Key.	12
Obrázek 9. Schéma zapojení přeladitelné aktivní výhybky. [příloha A.1].....	13
Obrázek 10. Simulace výhybky při postupné změně odporu potenciometru o 10%.	13
Obrázek 11. Schéma zapojení výkonového audio zesilovače LM3886. [(příloha A.2)]	15
Obrázek 12. Zapojení výkonového audio zesilovače TDA7388 [(příloha A.2)]......	16
Obrázek 13. Modulová kmitočtová charakteristika pro koncové zesilovače LM3886...23	
Obrázek 14. THD + N v závislosti na kmitočtu a vstupním napětí pro LM3886.....25	
Obrázek 15. Modulová kmitočtová charakteristika pro TDA7388.....28	
Obrázek 16. THD + N v závislosti na kmitočtu a vstupním napětí pro TDA7388.....29	
Obrázek 17. Modulová kmitočtová charakteristika přeladitelné aktivní výhybky.31	

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Průměry reproduktorů a jejich doporučené průměry nátrubků.	8
Tabulka 2. Souhrn parametrů procesoru ATmega16.	17
Tabulka 3. Změřené a vypočítané hodnoty pro zesilovače LM3886.	22
Tabulka 4. Závislost harmonického zkreslení na kmitočtu a úrovni vstupního napětí. ..	24
Tabulka 5. Změřené a vypočítané hodnoty pro zesilovač TDA7388.	27
Tabulka 6. Naměřené a vypočítané hodnoty celkového harmonického zkreslení pro TDA7388.	28
Tabulka 7. Vliv digitálního potenciometru na modulovou kmitočtovou charakteristiku výhybky.	30
Tabulka 8. Změna výstupního napětí v závislosti na odporu digitálního potenciometru.	31

ÚVOD

Cílem tohoto projektu byl návrh výkonového audio zesilovače do automobilu pro subwoofer. Součástí práce je i návrh výkonového audio zesilovače pro čtyři základní reproduktory v automobilu, které budou napájeny pomocí autobaterie, jenž dokáže dodávat napětí o velikosti 12V.

V teoretické části se tato práce zaměřuje na zesilovače různých pracovních tříd, zejména pak na třídu H. Dále pojednává o možném rozmístění reproduktorů v automobilu a zaměřuje se také na problematiku spojenou s výrobou kvalitního subwooferu. V části zaměřené na subwoofer je popsáno jakou zvolit ozvučnici, výpočet parametrů této ozvučnice a jaký zvolit vhodný basový reproduktor.

Další část je zaměřena na samotný návrh zařízení. Obsahuje návrh obvodu, který slouží k správnému napájení celého zařízení, aktivní výhybku, která zajišťuje, aby subwoofer reprodukoval pouze nízké kmitočty a dále obvod pro regulaci hlasitosti. Další část kapitoly o návrhu zařízení popisuje realizaci dvou výkonových audio zesilovačů o nominálním výkonu 2x70 W a 4x25 W. V poslední části je popsán mikrokontrolér, který slouží k ovládání celého zařízení.

V praktické části je popsána konstrukce bassreflexové ozvučnice pro subwoofer. Dále se práce zabývá návrhem desek plošných spojů s následným uložením desek do přístrojových skříní.

Součástí práce je popis programu, který řídí celou sestavu.

Poslední kapitola v této práci je věnována měření základních charakteristik jako je modulová kmitočtová charakteristika, zkreslení, maximální výstupní výkon atp.

1 TŘÍDY ZESILOVAČŮ

1.1 Zesilovač ve třídě A

Pro zesilovače ve třídě A se nejčastěji používají výkonové součástky jako jsou například bipolární tranzistory nebo tranzistory typu MOSFET. Tyto tranzistory jsou zapojeny v jednočinném zapojení, při kterém jimi protéká nastavený takový klidový proud, aby byly neustále v aktivním stavu. Z toho důvodu pracují tyto výkonové součástky uprostřed své lineární pracovní oblasti a mají ze všech tříd zesilovačů nejmenší zkreslení. Velká nevýhoda zesilovačů pracujících ve třídě AB je jejich mála energetická účinnost koncového stupně (přibližně 50%) a také velké vyzařování tepla.[2]

1.2 Zesilovač ve třídě B

V zesilovači třídy B se používají výkonové součástky, které jsou ve dvojčinném zapojení a jejich klidový proud je oproti třídě A nulový.

Princip třídy B spočívá v tom, že v jedné polovině koncového stupně jsou výkonové součástky aktivní pouze při kladné půlplně vstupního signálu a v záporné půlplně jsou naopak součástky polarizovány v závěrném směru. Pro druhou polovinu koncového stupně je tento princip naprosto opačný. Z uvedeného vyplývá, že se tyto dvě poloviny koncového stupně střídají v činnosti a vzájemně se doplňují.

Bohužel velkou nevýhodou zesilovače této třídy je zkreslení, které je zapříčiněno pozvolným přechodem z nevodivého stavu do aktivního stavu. Na výstupním signálu vzniká takzvaný "schod". Toto zkreslení se nazývá přechodové a lze jej dobře vyzorovat u signálů s malou amplitudou. Naopak velkou výhodou zesilovačů ve třídě B je jejich větší účinnost(přibližně 78 %). [2]

1.3 Zesilovač ve třídě AB

V podstatě se jedná o vylepšení třídy B a to tak, že je v koncovém stupni zaveden malý klidový proud, který sice nepatrně zmenšuje účinnost zesilovače, ale ne tolik jako u zesilovače třídy A. Tento malý klidový proud je zaveden z důvodu zmenšení přechodového zkreslení, které je u třídy B velmi znatelný. Zjednodušeně lze říci, že při signálech s menší amplitudou pracuje jako zesilovač ve třídě A a při signálech s větší amplitudou jako zesilovač třídy B. Z toho plyne, že tato třída vyniká jak velmi dobrou účinností(přibližně 70%) a zároveň i malým zkreslením. [2]

1.4 Zesilovač ve třídě C

Zesilovače třídy C jsou v nízkofrekvenční technice nepoužitelné, jelikož jejich klidový proud je nulový a mají zavedeno předpětí, které je dále zavírá. Toto nastavení způsobuje, že přechod z neaktivního do aktivního stavu nastává až při vyšších úrovních

vstupního signálu. Výstupní signál ze zesilovače této třídy má ale mnohem větší zkreslení, než třída B. [2]

1.5 Zesilovač ve třídě D

Zesilovač pracující ve třídě D nepatří mezi lineární, jelikož využívá pro zpracování signálu PWM (pulsně šířkovou modulaci). Hlavní předností těchto zesilovačů je jejich velká účinnost, která dosahuje přibližně 80%. Této účinnosti je dosaženo díky koncovým tranzistorům, které pracují v spínacím režimu. Buď jsou zcela vypnuté a nebo jsou plně otevřené. Nevýhoda tohoto zesilovače spočívá ve větším zkreslení oproti třídám A nebo AB. [2]

1.6 Zesilovač ve třídě G

Jedná se o další úpravu třídy AB. Hlavní rozdíl je v napájení koncových tranzistorů. Napájení může být dvou nebo i vícestupňové. Velikost napájecího napětí se mění podle velikosti požadovaného výstupního signálu. Pokud výstupní signál překročí nastavenou hranici, připojí se na koncový stupeň zesilovače buď větší nebo menší napětí. Tato koncepce se vyznačuje větší účinností než třída AB, která je však kompenzována větší složitostí obvodového zapojení výsledného zesilovače. [2]

2 ZESILOVAČ VE TŘÍDĚ H

Zesilovače ve třídě H pracují na téměř stejném principu jako zesilovač ve třídě G. Podobnost mezi těmito třídami je tak velká, že se někdy může třída H jevit jako třída G a naopak. Zesilovač ve třídě H využívá faktu, že signálové špičky napětí v audio signálu trvají jen určitou omezenou dobu. Během reprodukce dosahuje asi 80% hudebního signálu mnohem menší výstupní úrovně, než představují tyto dynamické špičky. Tím pádem není nutné po celou dobu provozu zesilovače napájet koncové tranzistory plným napájecím napětím. Zavedením řízeného napájení dosáhneme snížení ztrátového výkonu a tím zvýšení celkové účinnosti celého zesilovače.[8]

Nejčastěji bývá třída H odlišována od třídy G tak, že napětí na koncových zesilovačích v této třídě se nemění skokově, ale přesně sleduje velikost vstupního signálu. Napájecí napětí se mění vždy tak, aby tranzistory pracovaly v optimálním režimu s konstantním úbytkem napětí nezávisle na velikosti zpracovaného signálu. Existuje však mnoho případů kde není třída H napájena plynule, ale skokově. Což je v přímém rozporu s předchozí definicí, a proto budou dále v práci podrobněji rozebrány obě možnosti napájení, jak plynulého tak i skokového napájení.[8]

2.1.1 Plynulé napájení koncových tranzistorů

Aby byly koncové tranzistory napájeny plynule, musí být napájecí napětí dynamicky proměnné. Toho dosáhneme tehdy, bude-li řízené napětí fungovat jako regulovaný zdroj. Velikost napájecího napětí se bude měnit v závislosti na velikosti zpracovávaného signálu. Odezva na změny vstupního signálu musí být však dostatečně rychlá, jinak by regulovaný zdroj nemusel stihnout zareagovat ještě před napěťovou špičkou. To by mohlo způsobit limitaci výstupního signálu.[8]

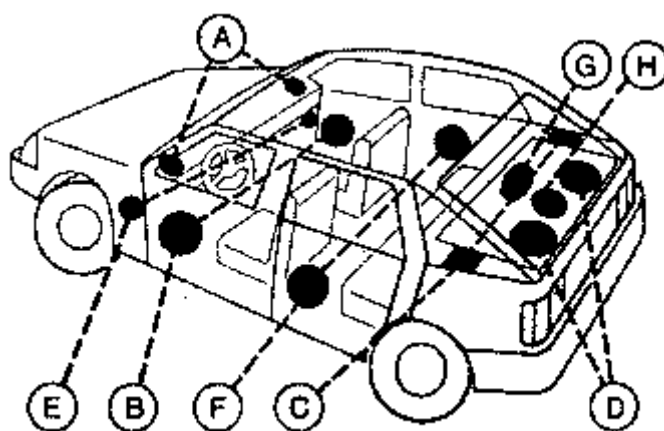
2.1.2 Skokové napájení koncových tranzistorů

Nejčastějším způsobem jak realizovat tuto metodu napájení koncových tranzistorů je ta, že se napájení rozdělí na dvě až tři úrovně. Oproti třídě G jsou tyto napěťové úrovně děleny tak, že je jejich rozdílový potenciál stejný. Tato výhoda umožňuje použití jednoho zdroje s více navzájem stejnými vinutími. Koncové tranzistory jsou napájeny z jedné dvojice vinutí a tvoří tak nižší úroveň napětí. Druhá dvojice sekundárních vinutí, která je po usměrnění zapojena tak, aby tvořila vyšší úroveň, se připojuje v okamžiku potřeby. Spínač napájecího napětí bývá nejčastěji realizován pomocí komparátoru, který porovnává nižší napěťovou úroveň s okamžitou hodnotou výstupního napětí zesilovače. Pokud se výstupní napětí blíží napájecímu, komparátor se překlopí a je tak aktivován vyšší obvod tvořený obvykle tranzistorem MOS-FET jako spínačem. Ten připojí jen po dobu trvání napěťové špičky druhou dvojici vinutí.[8]

3 OZVUČENÍ AUTOMOBILU

Vnitřní prostor automobilu je z hlediska akustiky velmi zajímavý, jelikož poloměr dozívání je velmi malý. To má za důsledek, že se kabina vozu velmi rychle "nasytí" zvukem a na lidský vjem to působí pocitem větší hlasitosti. Vnitřek automobilu je silně difuzním polem, protože zvuk je tvořen především odrazy, které vznikají kvůli vysoké odrazivosti skel.[3]

Ve vnitřním prostoru automobilu lze určit vhodná místa pro umístění příslušných reproduktorů (viz obrázek 1). Místo označené písmenem A je vhodné pro umístění výškových reproduktorů. Naopak zcela nevhodné je pro umístění basových reproduktorů, jelikož zde nelze vytvořit dostatečně velkou ozvučnici.



Obrázek 1. Možné rozmístění reproduktorů v automobilu. [3]

Místa označená písmeny E, B a F jsou převážně určena pro širokopásmové reproduktory s malými nároky na prostor. Zde je ozvučnice vytvořena z dutého prostoru dveří.

Zavazadlový prostor je nejvhodnější pro umístění basového reproduktoru. Vhodná místa pro jejich umístění jsou na obrázku 1 označena písmeny D a H. Ozvučnice s dostatečně velkým objemem je vytvořena z uzavřeného objemu zavazadlového prostoru. Dolní mezní kmitočet se zde pohybuje okolo 20 Hz což je pro basový reproduktor naprosto ideální. Tato místa jsou však v letních měsících velmi teplotně namáhána a proto je potřeba zde umístěný subwoofer teplotně ochránit.

Místa označená písmeny C a G jsou poměrně univerzální. Umísťují se sem jak výškové, tak i středové nebo širokopásmové reproduktory. Je-li širokopásmový reproduktor umístěn již na místě označeném písmem C, pak je zbytečné jej dávat i na místo F. [3]

3.1 Subwoofer

Pro vybudění dokonalého akustického vjemu je především potřebné vybudit hlavně

nízké kmitočty. Tento typ zesilovače spolu s basovým reproduktorem a kvalitní ozvučnicí je velmi často nazýván termínem subwoofer.

K tomu, aby byl potenciál tohoto zařízení plně využit a jeho frekvenční charakteristika začínala od těch nejmenších kmitočtů (nejlépe kolem 20 Hz) je zapotřebí jej umístit do kvalitní, mechanicky pevné ozvučnice nejlépe s "akustickým filtrem". Ozvučnice zajistí, aby nedocházelo k takzvanému akustickému zkratu, který vzniká při vyrovnání tlaku před a za membránou. Dále platí, že čím větší objem bude subwoofer mít, tím nižší bude dolní mezní kmitočet, který lze subwooferem reprodukovat.

V dalším kroku je třeba subwoofer vhodně umístit. Nejvhodnější místo je v zavazadlovém prostoru automobilu, anebo pod sedadly z důvodu vytvoření další ozvučnice vzniklé z toho uzavřeného prostoru. Vzdálenost reproduktoru subwooferu by měla být od překážky, v tomto případě od stěny zavazadlového prostoru, minimálně 20 cm. Velmi také záleží na tom, jakým směrem bude reproduktor vyzařovat. Bude-li vyzařovat do rohu zavazadlového prostoru, mírně se tím může zvýšit účinnost na nízkých kmitočtech.

Subwoofer se zesilovačem by měl být propojen kabelem o dostatečném průřezu vodiče. Minimální doporučený průřez je 2 mm^2 . U vysoce výkonných audio soustav se doporučuje hodnota přibližně 4 mm^2 .

Aby nebyl subwoofer zbytečně buzen signály, které obsahují vyšší frekvence, než dokáže vyzářit, musí se do audio soustavy zařadit pasivní nebo aktivní výhybka. Tímto řešením se dosáhne nižšího intermodulačního zkreslení. [3]

Pomocí aktivní výhybky lze rozdělit reprodukováný audio signál pro požadované reproduktory. Obecně lze u takovýchto výhybek nastavit jejich mezní kmitočty a strmosti. Aktivní výhybka se zpravidla umísťuje před zesilovač, do části zapojení kde je linkové napětí. Některé výhybky mohou obsahovat konektory, které slouží přímo k přivedení reproduktorové úrovně. Výhybka pro subwoofery je vždy realizovaná pomocí dolní propusti.

Pasivní výhybky jsou pevně nastavené a na rozdíl od aktivní výhybky nepotřebují napájení. Umísťují se za zesilovač na reproduktorový výstup. [3]

3.1.1 Basový reproduktor

Při výběru vhodného basového reproduktoru se musíme zaměřit na několik důležitých věcí.

Obecně platí, že větší reproduktory sice vyžadují větší ozvučnici, ale naopak jejich vyzařování nízkých kmitočtů je mnohem kvalitnější.

Důležitým faktorem při jejich výběru je průměr kmitací cívky, která při zahřátí může snížit výslednou hodnotu akustického tlaku reproduktoru. Čím větší je kmitací cívka, tím dochází k menším termickým změnám. Tím pádem dochází k případně menší změně akustického tlaku.

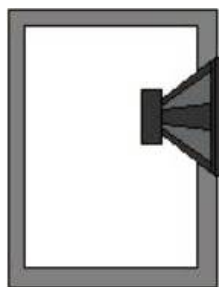
Důležitá je také maximální lineární výchylka membrány v ose reproduktoru X_{\max} . Tento parametr nám říká, jaké maximální výchylky membrána dosáhne bez toho, aniž by došlo ke zkreslení reprodukováného zvuku. Čím nižší kmitočet od reproduktoru vyžadujeme a čím vyšší je požadován akustický tlak, tím vyšší musí být maximální

lineární výchylka X_{\max} .

Nicméně hlavním parametrem u basových reproduktorů vhodných pro aplikaci do automobilu je citlivost. Ta by měla být co nejvyšší o minimální hodnotě +86dB. Citlivost reproduktoru je důležitá hlavně z toho důvodu, že audio zesilovače vhodné pro použití v automobilu dokáží dodat pouze omezený výkon, který je omezen napájením z autobaterie. [3]

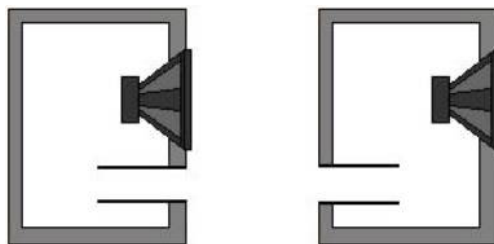
3.1.2 Ozvučnice

Ozvučnici reproduktoru, lze realizovat několika následujícími způsoby. Uzavřená ozvučnice je jedna z nejpoužívanějších a to díky tomu, že zabudováním reproduktoru do takovéto skříně zcela zmizí akustický zkrat. Princip a realizace této ozvučnice je zobrazen na obrázku 2. Uzavřený prostor, který vzniká za membránou, se však chová jako „pružina“. Díky tomuto jevu se rezonanční kmitočet realizovaného reproduktoru přesouvá k vyšším hodnotám. Proto tento typ ozvučnice není příliš vhodný pro basové reproduktory.



Obrázek 2. Uzavřena ozvučnice. [4]

Vhodný typ ozvučnice pro reprodukci nízkých kmitočtů je velmi často označován jako bassreflexová ozvučnice. Bassreflexový otvor v ozvučnici vyzářuje akustickou energii, která přispívá k energii vyzářené reproduktorem. Princip funkce této ozvučnice je zobrazen na obrázku 3. Celková výchylka membrány u nízkých kmitočtů může být menší a tím může být menší i nelineární zkreslení. Obvod akustického rezonátoru (bassreflexu) mění fázi kmitajícího vzduchu téměř o 180°. Tím je signál za ozvučnicí generován v protifázi (zadní strana membrány) oproti signálu na přední straně reproduktoru. V místě otvoru bassreflexu se tento signál objeví ve fázi se signálem z přední strany reproduktoru. [5]



Obrázek 3. Bassreflexová ozvučnice. [4]

Pro výpočet bassreflexové ozvučnice existuje několik metod. Objem ozvučnice, délku a průměr bassreflexového nátrubku můžeme zjistit aproximací. Jednou z těchto metod je Maximally flat aproximace. Nyní si názorně ukážeme jak vypadá výpočet ozvučnice pomocí této aproximace, podle vztahů z [3]. Nicméně existuje i několik on-line kalkulátorů jenž nám mohou ulehčit práci.

Předpokládejme, že máme zvolený basový reproduktor do automobilu od výrobce Carpower, SP-252C s parametry $V_{as}=96$ l, $Q_{ts}=0,41$, $f_s=35$ Hz.

1. Objem ozvučnice pro aproximaci Maximally flat je dán vztahem

$$V_b = 15,33V_{as}Q_{ts}^{2,86} = 15,33 \cdot 96 \cdot 0,41^{2,86} = 115 \text{ l}, \quad (3.2.3-1)$$

kde V_b je objem ozvučnice, Q_{ts} je celkový činitel jakosti a V_{as} je ekvivalentní objem reproduktoru.

2. Dolní mezní kmitočet se v tomto případě určí z

$$f_3 = \frac{0,26 \cdot f_s}{Q_{ts}^{1,4}} = \frac{0,26 \cdot 35}{0,41^{1,4}} = 31,71 \text{ Hz}, \quad (3.2.3-2)$$

kde je f_3 dolní mezní kmitočet, f_s značí rezonanční kmitočet reproduktoru.

3. Rezonanční kmitočet je pak dán následujícím vztahem

$$f_b = \frac{0,42 \cdot f_s}{Q_{ts}^{0,9}} = \frac{0,42 \cdot 35}{0,41^{0,9}} = 32,79 \text{ Hz}. \quad (3.2.3-3)$$

4. Nyní musíme zvolit průměr bassreflexového nátrubku, orientačně se dá tento parametr zvolit dle tabulky 1.

Tabulka 1. Průměry reproduktorů a jejich doporučené průměry nátrubků.

Průměr reproduktoru[mm]	Průměr nátrubku [mm]
<100	30
130-165	50
165-200	75
200-250	100
250-305	130
305-380	160

5. Zvolíme tedy průměr nátrubku $d=130$ mm a poté vypočítáme jeho délku jako

$$l = \frac{2361d^2}{f_b^2 V_b} - 0,732d = \frac{2361 \cdot 0,130^2}{32,79^2 \cdot 0,115} - 0,732 \cdot 0,130 = 0,227 \text{ m}.. \quad (3.2.3-4)$$

6. Pokud požadujeme nižší objem ozvučnice, například $V_b'=90$ l, musíme znovu vypočítat dolní mezní kmitočet bassreflexové ozvučnice a to následovně

$$f_3 = f_s \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b'}} = 35 \sqrt{\frac{96}{90}} = 36,15 \text{ Hz.} \quad (3.2.3-5)$$

7. Dále musíme vypočítat nový rezonanční kmitočet jako

$$f_b' = f_s \left(\frac{V_{as}}{V_b'} \right)^{0,32} = 35 \left(\frac{96}{90} \right)^{0,32} = 39,82 \text{ Hz.} \quad (3.2.3-6)$$

8. Nyní znovu vypočítáme délku nátrubku z již použitého vzorce

$$l' = \frac{2361 d^2}{f_b'^2 V_b'} - 0,732 d = \frac{2361 \cdot 0,130^2}{39,82^2 \cdot 0,090} - 0,732 \cdot 0,130 = 0,184 \text{ m.} \quad (3.2.3-7)$$

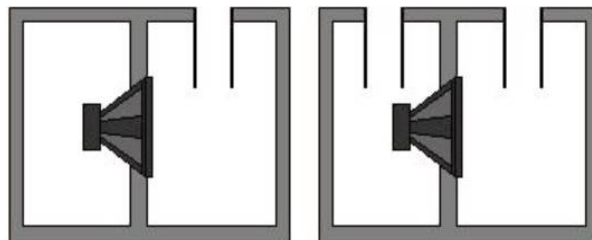
9. Aproximace Maximally flat, jak již ze samotného názvu vyplývá, slouží k získání maximálně ploché frekvenční charakteristiky. Zmenšení rozměru ozvučnice zapříčiní drobné navýšení citlivosti ozvučnice v určitém frekvenčním pásmu. O kolik se charakteristika zvlní zjistíme dosazením do následujícího vzorce

$$SPL_{peak} = 20 \log \left[2,6 Q_{ts} \left(\frac{V_{as}}{V_b'} \right)^{0,35} \right] = 20 \log \left[2,6 \cdot 0,41 \left(\frac{96}{90} \right)^{0,35} \right] = 0,75 \text{ dB.} \quad (3.2.3-8)$$

Touto metodou lze tedy poměrně velmi přesně vypočítat objem ozvučnice a rozměry bassreflexového nátrubku. Dále můžeme dle potřeby vypočítat změnu velikosti objemu spolu s navýšením citlivosti ozvučnice v určitém frekvenčním pásmu, jež je zapříčiněna právě touto změnou objemu ozvučnice.

Objem ozvučnice má určité optimum. Je-li objem malý, nepřinese ozvučnici typu bassreflex ve vyzařovaném výkonu již žádný zisk proti ozvučnici uzavřené. Jedinou výhodou zůstane menší zkreslení na nízkých kmitočtech. [5]

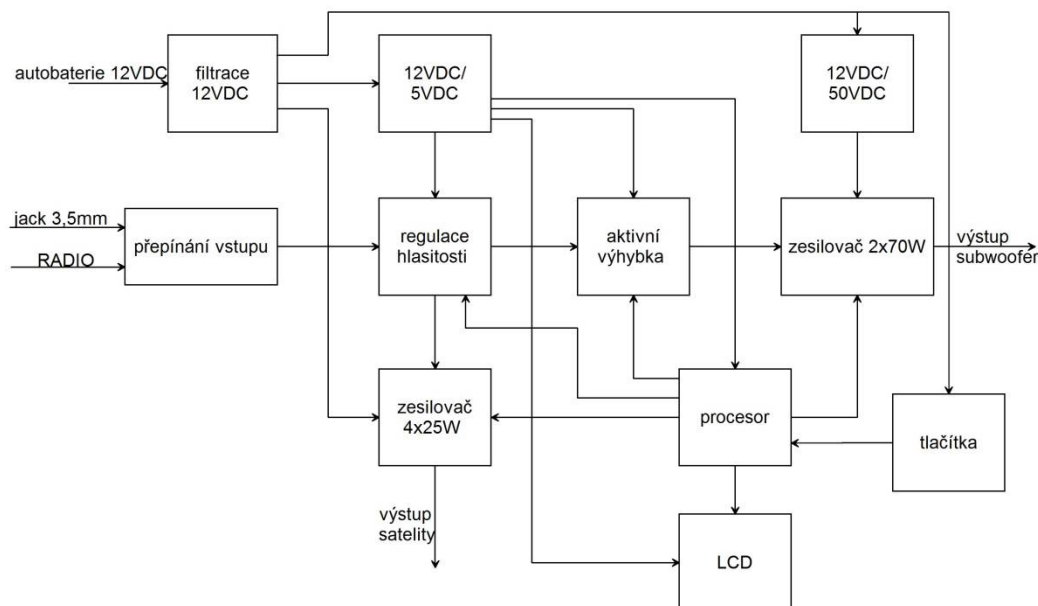
Dalším používaným typem ozvučnice je ozvučnice označovaná jako band-pass ozvučnice, zobrazená na obrázku 4. Tento typ ozvučnice se skládá minimálně ze dvou komor, z nichž alespoň jedna obsahuje bassreflex. Tato realizace slouží k reprodukování kmitočtů, na které je ozvučnice nastavená. Ostatní kmitočty jsou utlumeny. Tento typ ozvučnice je vhodné použít pro subwoofer



Obrázek 4. Band-pass ozvučnice. [4]

4 NÁVRH ZAŘÍZENÍ

Blokové schéma koncového zesilovače pro subwoofer a čtyř satelitních reproduktorů pro automobilovou audio aparaturu je zobrazen na obrázku 5. Řízení celé sestavy bude realizováno pomocí mikroprocesoru ATmega 16.



Obrázek 5. Blokové schéma navrženého zařízení.

4.1 Napájení zařízení

Celý systém je napájen pomocí autobaterie. Průměrná autobaterie by měla mít v ideálním stavu napětí 12 V DC, plně nabitá 14,4 V DC. Od těchto parametrů se odvíjí návrh celého zařízení.

Kvůli rušení, které může způsobovat zapalování automobilu, je v obvodu umístěn odrušovací filtr. Tento filtr slouží k odstranění rušení a je složen z několika kondenzátorů a tlumivky. Princip filtrace je shodný s CLC filtrem typu dolní propust. Detailní parametry tohoto řešení jsou uvedeny v příloze A.2.

Do této části obvodu je vložen i tranzistor typu MOS-FET, pomocí kterého je spínáno vstupní napětí z autobaterie. To je dále jištěno automobilovou pojistkou umístěnou na předním panelu a připojenou na svorky FUSE1 a FUSE2.

Jelikož zařízení obsahuje i takové části, které není možno napájet přímo 12 V, je nutné, aby obvod obsahoval i měnič napětí typu DC/DC. Jiná velikost napětí je požadována zejména u ovládací části, která obsahuje procesor, aktivní výhybku a regulaci hlasitosti. Celá řídicí část je kompatibilní s úrovněmi TTL logiky, tedy 5 V DC. Této hodnoty je dosaženo pomocí stabilizátoru 7805. Tento stabilizátor je schopen pracovat v rozsahu vstupního napětí od 6,5 V do 32 V a je při odpovídajícím chlazení schopen dodat proud až 1 A. Na výstupu 7805 je připojeno několik blokovacích

kondenzátorů, které slouží k vyhlazení odebíraného napětí pro digitální část (5 V) a také filtr LC typu dolní propust pro vyhlazení napájení analogové části zapojení (5 VA), schéma viz příloha A.1. Výkonový měnič je zde použit kvůli napájení zesilovače pro subwoofer LM3886, který vyžaduje při nesymetrickém napájení napětí alespoň 50 V.

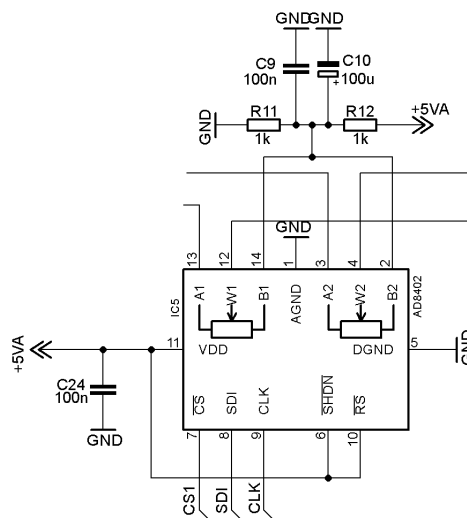
4.2 Vstupní přepínač

Zařízení je navrženo tak, aby bylo možné přehrávat signál z mobilního telefonu pomocí připojení přes jack o průměru 3,5mm, a nebo mít připojené autorádio.

Vstup pro připojení rádia musí být amplitudově upraven. Zesilovač je určen pro řízení všech čtyř základních reproduktorů v autě, proto kvůli univerzálnosti zesilovače je signál z autorádia odebírán z jeho výkonového výstupu. Výkonový výstup autorádia umí ve špičce dodat napětí přibližně 12 V, tato úroveň se proto upravuje vstupními děliči na linkovou úroveň (rezistory R9, R21, R24 a R25) a navíc se kompenzuje stejnosměrný offset (kondenzátory C18 a C19), který symetrické výstupy autorádia z principu mají. R22 a R23 jsou ochranné prvky proti elektrostatickému náboji, zkratu zvenčí atd. Schéma zapojení viz příloha A.1.

4.3 Obvod regulace hlasitosti

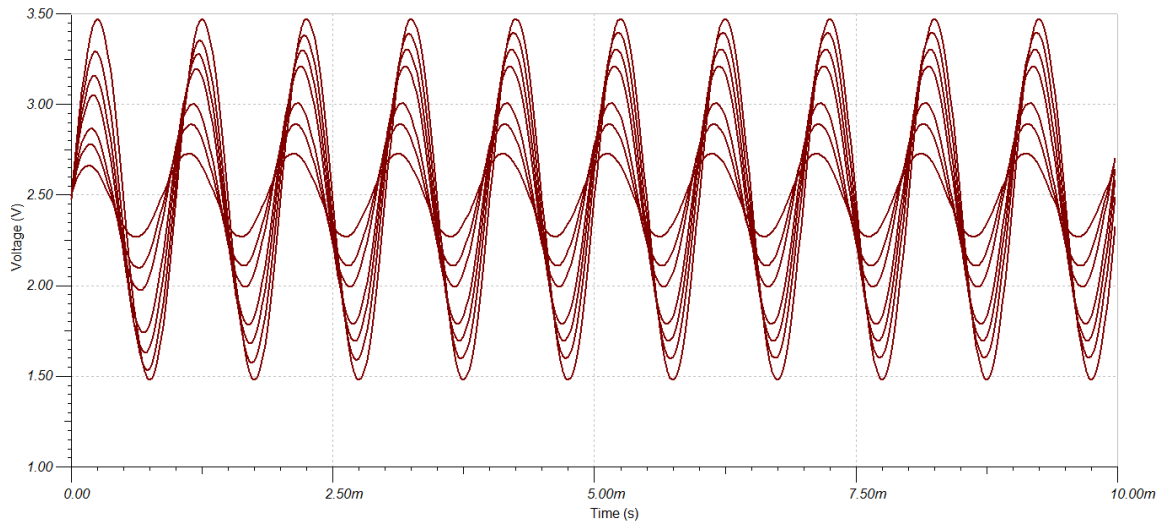
Regulace hlasitosti je zajištěna digitálním potenciometrem AD8402, který je zapojen jako dělič napětí, viz obrázek 6.



Obrázek 6. Schéma zapojení regulace hlasitosti. [(příloha A.1)]

Obvod AD8402 komunikuje s procesorem po sběrnici SPI. Na vrchní konce linek A1 a A2 jsou přivedeny kanály stereofonního vstupního signálu, z jezdců W1 a W2 se odebírá regulovaný stereofonní signál. Na spodní konce linek je přiveden offset, který se tvoří pomocí děliče R11 a R12, jejichž střed je střídavě uzemněn kondenzátory C9 a C10. Tento offset se přičte k signálu odebíranému z jezdců, pro signál samotný se však

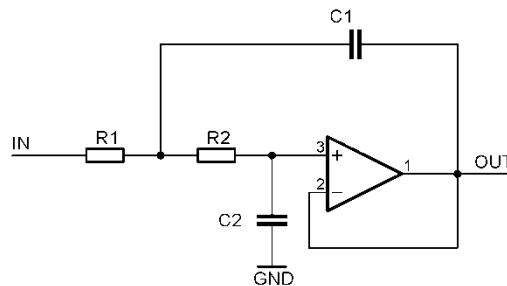
střed děliče chová jako zem, tedy vůči střídavému signálu se celé zapojení chová jako nastavitelný napěťový dělič. Regulace hlasitosti byla simulována v programu Tina Pro. Výsledek simulace je uveden na obrázku 7.



Obrázek 7. Simulace regulace hlasitosti pro různé hodnoty odporu potenciometru.

4.4 Návrh aktivní výhybky

Jedná se o dolní propust se strukturou Sallen-Key která zajišťuje, aby subwoofer reprodukoval pouze nízké kmitočty.



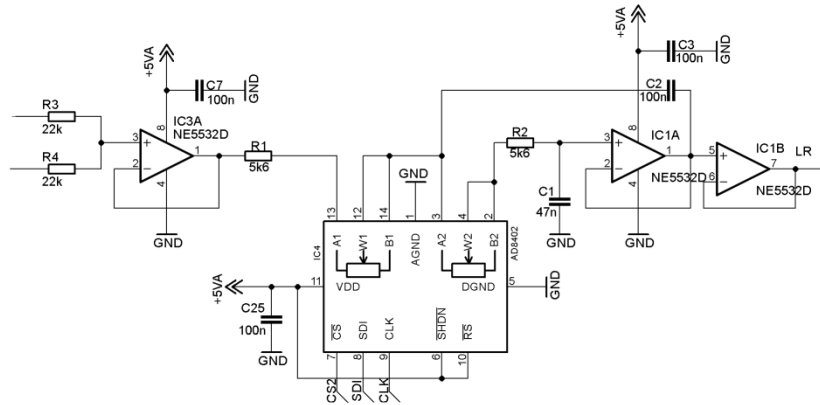
Obrázek 8. Schéma dolní propusti Sallen-Key.

Princip činnosti zapojení je zřejmý z obrázku 8 a spočívá v tom, že na nízkých kmitočtech se kondenzátory C1 a C2 chovají jako rozpojený obvod a vstupní signál projde na výstup bez omezení. Na vyšších kmitočtech se kondenzátory chovají jako zkrat, to znamená, že kladný vstup operačního zesilovače se skrz C2 uzemní a tím se sníží amplituda na výstupu.

Před přivedením signálu na aktivní výhybku je stereofonní signál sloučen pomocí rezistorů R3 a R4 na monofonní. Sloučený signál je posílen sledovačem napětí IC3A a poté přiveden na digitální potenciometr IC4, viz obrázek 9. Sledovač napětí je důležitý kvůli impedančnímu oddělení monofonního signálu ze směšovacích rezistorů R3 a R4 a digitálního potenciometru. Absence impedančního oddělení by způsobila dělicí poměr

mezi rezistory a digitálním potenciometrem.

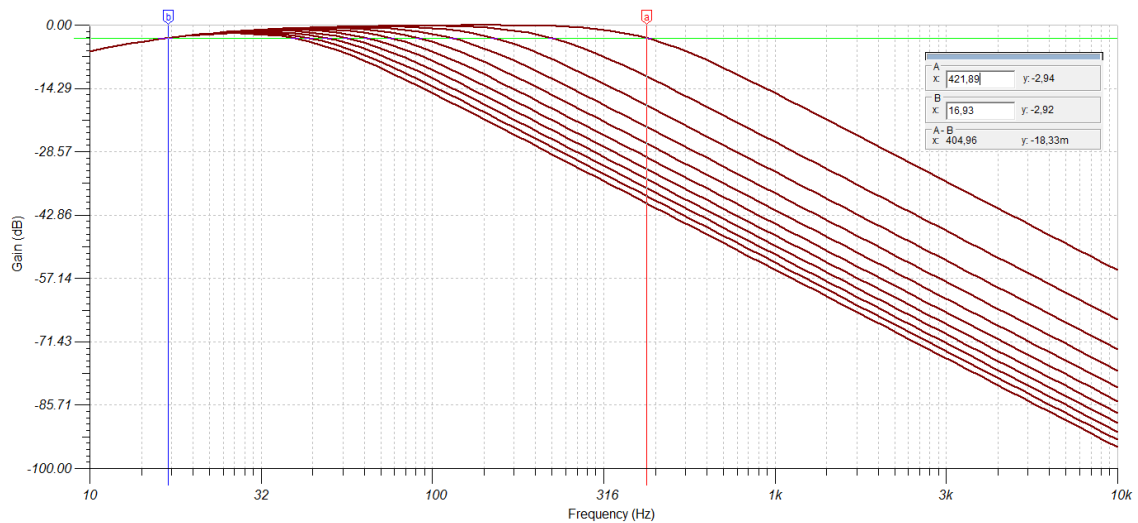
Pro vyšší komfort poslechu je výhybka navržena jako přeladitelná pomocí dvojitého digitálního potenciometru AD8402 o hodnotě odporu drah 50 kΩ. Tento digitální potenciometr má pouzdro SO14, napájen je z vodiče 5VA a je řízen pomocí procesoru ATMega 16. Jeden z dvojice potenciometrů je připojen do série k odporu R1 a druhý do série k odporu R2, schéma zapojení viz obrázek 9.



Obrázek 9. Schéma zapojení přeladitelné aktivní výhybky. [příloha A.1]

Při zvoleném odporu rezistorů $R1=R2=5,6 \text{ k}\Omega$ a kapacity kondenzátorů $C1=47 \text{ nF}$, $C2=100 \text{ nF}$, se výsledný mezní kmitočet teoreticky pohybuje od 40Hz do 414Hz. Tyto výsledky byly zjištěny pomocí online kalkulatoru [7]. Přeladitelnost byla odsimulována v programu Tina Pro. Výsledky simulace jsou uvedeny na obrázku 10.

Operační zesilovač pro realizaci aktivní výhybky byl zvolen NE5532 a je též napájen z větve 5VA.



Obrázek 10. Simulace výhybky při postupné změně odporu potenciometru o 10%.

4.5 Zesilovač 2x70W

Při návrhu zařízení byl kladen požadavek na vysoký výstupní výkon zesilovače při nízkém napájecím napětí. Nejprve byl pro realizaci zvolen zesilovač třídy H, TDA1562Q, který je navržen pro napájecí napětí 12 V a dokáže při zatěžovací impedanci 4 Ω dosáhnout výstupního výkonu 70 W. Ale kvůli nedostupnosti tohoto zesilovače byla zvolena varianta zapojení s obvodem LM3886.

Jelikož je dle zadání pro subwoofer požadován zesilovač s nominálním výkonem 2x70 W nabízí se varianta spojit dva zesilovače o stejném výkonu do můstkového nebo paralelního zapojení. Tímto by ale mohl vzniknout větší ztrátový výkon a tím i větší nároky na chlazení celého zařízení, což může u zesilovače do automobilu znamenat velký problém s chlazením, zejména v letních měsících. Proto byla zvolena varianta, kdy budou zrealizovány dva zesilovače, přičemž každý z nich bude mít svůj vlastní reproduktor umístěný v subwooferu, což bude působit dobře i po vizuální stránce.

Tento výkonový audio zesilovač svojí vnitřní topologií odpovídá struktuře běžného operačního zesilovače. Koncové tranzistory pracují ve třídě AB, to znamená, že mají nastavený nízký klidový pracovní proud, který zajišťuje pootevření tranzistorů v klidovém stavu a plynulý přechod práce mezi horními a spodními tranzistory. Tento princip zajišťuje nízké přechodové zkreslení, které umí zpětná vazba lehce vykompenzovat. Tím je dosaženo velmi nízkého celkového harmonického zkreslení (THD + N).

Výkonový audio zesilovač LM3886 je schopen při zátěži 4 Ω a symetrickém napájecím napětí 28 V dodávat výkon až 68 W. Při zátěži 8 Ω a symetrickém napájecím napětí 35 V dokáže dodávat 50 W. U obou variant se hodnota harmonického zkreslení pohybuje okolo 0,1 % a to ve frekvenčním rozsahu 20 Hz až do 20 kHz. Odstup signálu od šumu je větší než 92 dB.

LM3886 je již přes 10 let špičkou mezi integrovanými zesilovači třídy AB, a to jak díky dobrým parametrům, tak i kvůli jednoduchosti jeho zapojení. Nevyžaduje kolem sebe příliš mnoho podpurných součástí, a proto je realizace celého zesilovače méně náročná. Díky své jednoduchosti je tento typ zesilovače vhodný i pro amatérské využití. Zesilovač dále obsahuje i několik ochranných prvků, které zabraňují poškození zesilovače. Jsou to například obvody proti zkratu na výstupu, přepětí na výstupu a proti přehřátí.

Tento výkonový audio zesilovač lze zapojit buďto se symetrickým, anebo nesymetrickým napájecím napětím. V tomto případě je kvůli zjednodušení zvoleno přímo schéma zapojení pro nesymetrické napájení, které je uvedeno výrobcem v dokumentaci. [9]

Celé zařízení je napájeno pomocí autobaterie, jež dokáže dodat napětí pouze o velikosti 12 V. A proto je do obvodu zaveden výkonový DC/DC měnič, jež dokáže zvýšit napětí z 12 V na 50 V a dodávat při tom potřebný proud. Při tomto napájecím napětí můžeme dosáhnout výstupního výkonu přibližně o hodnotě 60 W. Na obrázku 12 můžeme vidět, že napájecí napětí je přivedeno na pin číslo 5, pin číslo 4, na který by mělo být připojeno záporné napětí je pouze uzemněn.

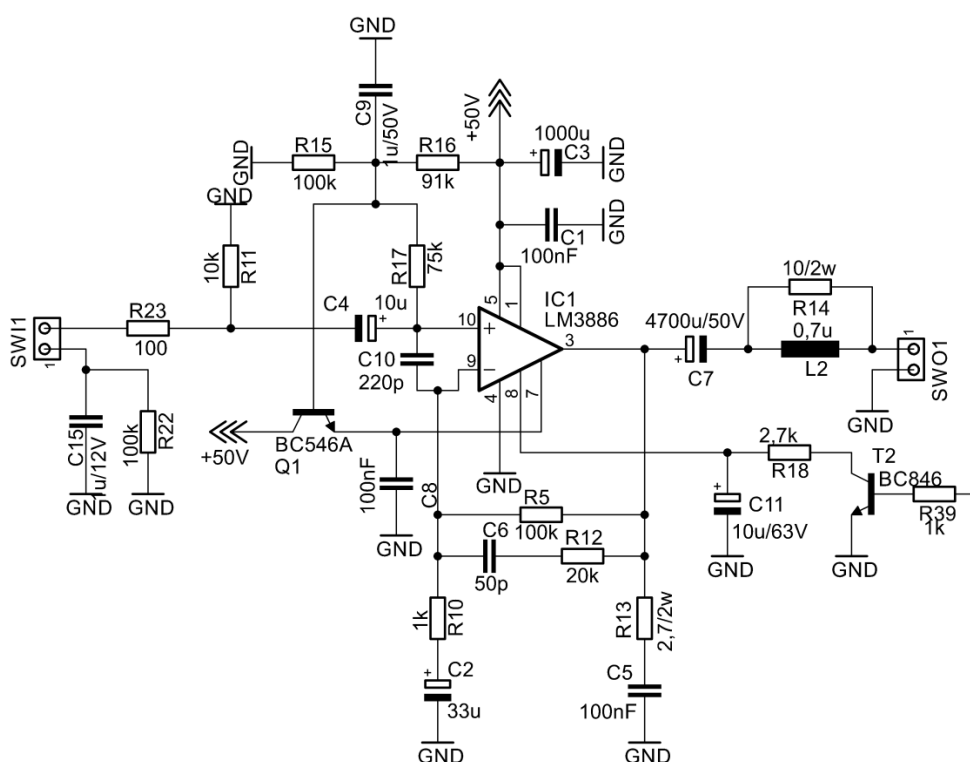
Další důležitou částí zesilovače je pin 8, který má význam funkce MUTE. Aby bylo možné funkci MUTE využívat, tak musí být na tomto pinu neustále takový proud,

aby nebyl menší než -0,5 mA. Toho je dosaženo díky rezistoru R18. Funkce MUTE je ovládána pomocí procesoru ATmega 16 přes tranzistor T2. Celkové zapojení zesilovače je uvedeno na obrázku 11.

Velikost rezistoru R18 je vypočítána dle vzorce [9]:

$$R_{MUTE} = \frac{(|V_{EE}| - 2,6)}{I_8} [\Omega], \quad (4.5-1)$$

kde V_{EE} je záporné napájecí napětí na pinu 4 a I_8 je proud, který teče z pinu MUTE ($I_8 \geq -0,5 \text{mA}$).



Obrázek 11. Schéma zapojení výkonového audio zesilovače LM3886. [(příloha A.2)]

4.6 Zesilovač 4x25 W

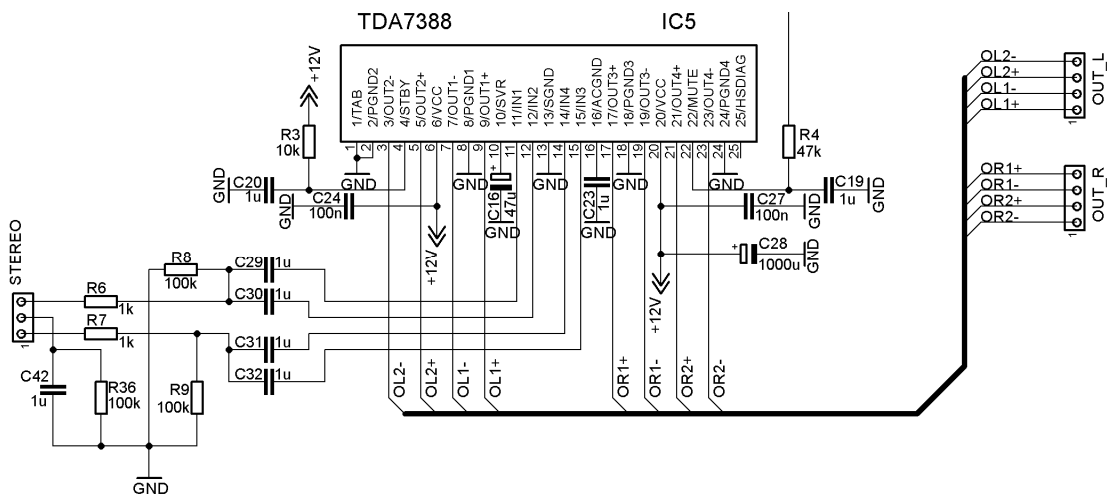
V tomto případě je využit výkonový audio zesilovač TDA7388, určený přímo pro ozvučení automobilu. Jeho hlavním úkolem je dodávat výkon čtyřem základním automobilovým reproduktorům.

Opět se jedná o zesilovač, jenž má vnitřní topologii třídy AB.

Tento výkonový zesilovač dokáže při impedanci zátěže 4Ω a napájecím napětí 14,4 V dodávat nominální výkon o hodnotě 4x25 W. Jelikož bude zařízení pracovat díky napětí z autobaterie, která dokáže dodávat přibližně 12 V DC, je očekáván výkon o velikosti

20 W. Harmonické zkreslení je u tohoto zesilovače bohužel o něco větší než u zesilovače pro subwoofer. Zkreslení se mění v závislosti na velikosti výstupního výkonu, například pro výkon 1 W je zkreslení přibližně 0,1 % a pro 20 W se zkreslení pohybuje už kolem 2%. Zesílení garantované výrobcem je 26 dB. [10]

Zapojení tohoto audio zesilovače vychází z doporučeného zapojení výrobce [10], které bylo mírně upraveno, zejména velikost kondenzátorů, jež filtrují napájecí napětí. Schéma zapojení je na obrázku 12.



Obrázek 12. Zapojení výkonového audio zesilovače TDA7388 [(příloha A.2)].

Oproti zesilovači LM3886, který postrádá funkci STAND-BY, je tomu zde naopak. TDA7388 má jak funkci MUTE tak i STAND-BY. Funkci MUTE byl přiřazen pin číslo 22. Aby byla funkce MUTE vypnuta je na tomto pinu požadováno minimálně napětí o velikosti 3,5 V. Pro zapnutí zesilovače je potřeba napětí o velikosti maximálně 1,5 V. STAND-BY nebude v tomto případě využito jelikož kvůli absenci této funkce u zesilovače LM3886 byl do napájecí části zařízení přidán tranzistor typu MOS-FET. Tím bude dosaženo řízení STAND-BY u všech výkonových zesilovačů zároveň. Nicméně, aby nebyl zesilovač neustále v režimu STAND-BY, musí být na jeho pin číslo 4 přivedeno napětí o velikosti minimálně 3,5 V.

4.7 Využití mikroprocesoru ATmega 16

Jedná se o 8bitový (v některých případech 32bitový) procesor, jeho paměť je rozdělena podle Harvardské architektury na paměť programu a paměť dat. Oddělení těchto dvou bloků umožňuje využití různých typů pamětí. Paměť typu FLASH je využita pro samotný program a paměť typu SRAM jako datová paměť. Paměť EEPROM slouží pro uchování dat i po vypnutí napájení. [11]

Hlavní parametry procesoru ATmega 16, jenž je využit v této práci, jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2. Souhrn parametrů procesoru ATmega16.

Taktovací frekvence	Int. osc.	1, 2, 4, 8 Mhz
	Ext. osc., krystal	1 - 16 MHz
Výpočetní výkon		až 16 Mlps
Velikost paměti FLASH		16 kB
Velikost paměti SRAM		1k B
Velikost paměti EEPROM		512 B
Počet IO portů/bitů		
8bitový čítač/časovač		2
16bitový čítač/časovač		1
Generátor reálného času		ANO
AD převodník	Počet kanálu	8
	Rozlišení	8 nebo 10 b
	Vzorkování	až 1Msps
Analogový komparátor		ANO
PWM generátor	Počet kanálů	4
	Rozlišení	2x8 b + 2x10 b
	Frekvence	až 62,5kHz
Podpora SPI		ANO
Podpora JTAG		ANO
Podpora I2C(TWI)		ANO

Pro účely této práce je procesor využit k ovládní hned několika částí zařízení. Jeho úkolem je ovládat digitální potenciometry AD8402 pomocí sběrnice SPI, které slouží k regulaci hlasitosti a přeladitelnosti výhybky. Dále řídí funkci MUTE a STAND-BY celé sestavy. Tyto procesy budou manuálně řízeny pomocí tlačítek (viz příloha A.3), kromě funkce STAND-BY, která je ovládána automaticky v závislosti na napětí na příslušném výstupu spínací skříňky automobilu. Veškeré úkony budou zobrazovány na LCD displeji.

5 REALIZACE ZAŘÍZENÍ

V této kapitole bude popsána realizace celého zařízení, zejména návrh a výroba bassreflexové ozvučnice pro subwoofer, návrh desek plošných spojů a jejich usazení do přístrojových skříní.

5.1 Návrh a výroba bassreflexové ozvučnice

Prvním a také tím nejdůležitějším faktorem při návrhu této ozvučnice byl výběr vhodných basových reproduktorů. Parametry reproduktoru ovlivňují jak výslednou velikost celé ozvučnice, tak i schopnost vyzářovat nízké kmitočty. Avšak při jejich výběru nebyly rozhodující pouze parametry, ale také přijatelná cena, která se u těch lepších může pohybovat až v řádech několika tisíců korun.

5.1.1 Návrh

V práci byly zvoleny reproduktory od společnosti Carpower, typ SP-252C, pro které byly provedeny výpočty již v teoretické části práce (viz podkapitola 3.1.2). V této podkapitole byl vypočítán objem ozvučnice pro jeden z reproduktorů 115l. Dle návrhu má mít každý z výkonových zesilovačů pro subwoofer svůj vlastní reproduktor. Vyrobít v praxi ozvučnici takového objemu a umístit ji do zavazadlového prostoru automobilu by bylo velmi nepraktické a neestetické. Proto byly rozměry ozvučnice a také i bassreflexového nátrubku znovu přepočítány pomocí programu LoudSpeaker LAB 3 (trial verze). Výsledkem simulace (viz příloha B.1) je objem o velikosti 55l a bassreflexový nátrubek o průměru 66 mm v délce 189 mm.

5.1.2 Konstrukce

Při výrobě ozvučnice byly zvoleny vnitřní rozměry 380 x 380 x 380 mm. Použitím těchto rozměrů je téměř přesně dosaženo požadovaného objemu. Podrobný konstrukční návrh je součástí přílohy B.2.

Výrobní materiál je LTD, jedná se o laminované dřevotřískové desky, jichž povrch je upraven dekorativním papírem v dekoru dřeva olše. Tloušťka materiálu činí 20 mm.

Deska byla naformátována dle přílohy B.2. Dále byly vyvrtány otvory pro spojovací šrouby, takzvané konfirmáty, a viditelné řezané hrany byly olemeny hranicí páskou. Následně byly vyfrézovány otvory pro basové reproduktory, bassreflexové nátrubky a reprosvorky. Před složením do jednoho celku, byly všechny spojové plochy podlepeny lepidlem Kleiberit. Po složení ozvučnice a jejím sešroubování byly pro lepší utěsnění všechny vnitřní rohy vymazány neutrálním silikonem. Vnitřní část ozvučnice je zobrazena v příloze B.3.

Vrchní deska je odnímatelná a určena pro snadný přístup do útrobu ozvučnice v případě poruchy nebo jiných úprav. Aby nedocházelo k nežádoucímu úniku akustického tlaku z vně bedny, bylo víko utěsněno pryžovým těsněním a uchyceno několika šrouby. Kompletní výrobek je zobrazen v příloze B.4.

5.2 Návrh desek plošných spojů

Desky plošných spojů byly navrženy pomocí programu EAGLE a vyrobeny ve školní dílně UREL. Veškeré finální návrhy a osazovací plány, spolu se seznamem součástek jsou uvedeny v příloze C a D.

5.2.1 Návrh desky plošného spoje pro výkonovou jednotku

Deska plošného spoje pro koncové výkonové zesilovače je navržena jako oboustranná o rozměrech 180 x 100 mm. Na celém povrchu desky byla rozlita zem (funkce polygon v programu EAGLE). Pro zajištění lepšího zemnění mezi oběma hladinami bylo umístěno na desku hned několik prokůvů, viz příloha C.1. Velikost DPS se nedala příliš ovlivnit kvůli velikosti některých součástek, zejména díky kondenzátorům C7 a C22, které na výstupu výkonových zesilovačů LM3886 slouží k oddělení stejnosměrné složky. Na této desce je umístěna i autopojistka, která však není přímo usazena na desce. Pomocí faston konektorů je vyvedena na zadní stranu skříně, z důvodu lepšího přístupu při výměně přetavené pojistky. Osazovací plán této DPS je uveden v příloze D.1, zde je také uveden seznam součástek.

5.2.2 Návrh desky plošného spoje pro řídicí jednotku

DPS je navržena jako jednostranná s rozměry 100 x 63 mm. Při návrhu této desky byl kladen důraz na správné rozmístění analogové a digitální části, a to tak aby nedocházelo k jejich vzájemnému rušení. Návrh se neobešel bez využití několika drátových propojek, například při pospojování digitálních potenciometrů k procesoru a propojení rozlité zemnicí plochy. Výsledný návrh je uveden v příloze C.2 a osazovací plán spolu se seznamem součástek v příloze D.2.

5.2.3 Návrh desky plošného spoje pro tlačítka

Jedná se o jednostrannou DPS o rozměrech 64 x 29 mm. Tato deska plošného spoje je navržena tak, aby se dala tlačítka umístit na přední panel řídicí jednotky, viz příloha C.3. Propojení mezi panelem tlačítek a řídicí deskou je provedeno konektory KONPC a vícežilovým kabelem. Osazovací plán a seznam součástek je uveden v příloze D.3.

5.3 Umístění do přístrojové skříně

5.3.1 Výkonová jednotka

Zařízení je navrženo tak, aby se část s koncovými zesilovači dala umístit do zavazadlového prostoru automobilu a ty se daly ovládat pomocí řídicí jednotky, umístěné v přední části vozu u řidiče.

Pro výkonovou jednotku byla vybrána kovová skříň s označením U-KK07-355 o rozměrech 350 x 70 x 217 mm. Tato skříň má již z výroby na zadní straně dva otvory, z nichž je využíván pouze jeden, a to pro přívod napájecího napětí z autobaterie. Na horní, spodní i zadní straně skříně jsou vyřezány větrací otvory. Mezi tyto větrací otvory je umístěn chladič s označením CHL32A. Jedná se o hliníkový chladič bez

povrchové úpravy se svodem tepla 1,3 K/W, ke kterému jsou připevněny všechny tři zesilovače.

Do přístrojové skříně byly z přední strany vyřezány otvory pro svorkovnice. Tyto svorkovnice slouží pro připojení reproduktorů a také pro přivedení signálu z řídicí jednotky. Do zadní části skříně byla vyřezána díra pro pouzdro na autopojistku. Svorka pro napájecí napětí je umístěna vně skříně, aby nedošlo k neúmyslnému dotyku.

DPS s koncovými zesilovači byla do skříně umístěna spolu s DC/DC měničem dodávajícím napájecí napětí pro LM3886 (viz příloha E.1).

5.3.2 Řídicí jednotka

Přístrojová skříň pro řídicí jednotku, byla navržena tak, aby byla mobilní a dala se improvizovaně umístit do jakéhokoliv typu automobilu. Při přímé instalaci do palubní desky konkrétního automobilu, by muselo dojít k novému návrhu přístrojové skříně, tak aby odpovídala rozměrům palubní desky.

Skříňka byla vyrobena z tvrdého bukového dřeva o vnitřních rozměrech 13,5 x 7,5 x 11 mm, tloušťka materiálu je 6 mm.

Před naformátováním a slepením byly vyfrézovány z přední strany otvory pro displej, tlačítka a audio vstup. Ze zadní strany pro přívodní napájecí kabely a konektor sloužící k propojení řídicí jednotky s výkonovou. Poté byla skříňka slepena PUR lepidlem Kleiberit. Po vytvrdnutí lepidla byla skříňka vybroušena brusným papírem. Pro lepší design a zachování struktury dřeva bylo použito černé mořidlo Positiv+. Kvůli přístupu k částem zařízení, je vrchní část skříňky připevněna pouze vruty.

DPS je do skříně uchycena pomocí distančních sloupků (viz příloha E.2).

6 ŘÍDÍCÍ PROGRAM

Součástí zadání práce bylo vytvořit inteligentní ovládání celého zařízení. Toho je dosaženo pomocí mikroprocesoru ATmega16, který je umístěn v řídicí jednotce spolu s digitálními potenciometry a výstupy pro ovládání režimu mute a stand-by. Celý program byl vytvořen ve vývojovém prostředí CodeVision AVR a je uveden v příloze na CD.

6.1.1 Popis programu

Základní funkcí programu je regulace hlasitosti a nastavování mezního kmitočtu výhybky.

Program lze rozdělit do dvou stavů, první je pro stav vypnutého zapalování, což je stav, při kterém je program neaktivní a neobsahuje žádný další kód. V tomto stavu jsou všechny výstupy v úrovni, která odpovídá stavu nečinnosti celé sestavy.

Druhá část obsahuje kód obsluhující periferie dle aktuálních požadavků. Při detekci klíčů v zapalování je provedena inicializace programu a deaktivuje se výstup reprezentující stand-by. Následně již běží nekonečná smyčka, v níž se pouze kontroluje aktuální stav zařízení z hlediska zapnutí a vypnutí. Uživatelské rozhraní je ve formě tlačítek, která jsou paralelně připojena na interrupt pin mikroprocesoru, který je ve stavu log. 1. Jakmile je detekována sestupná hrana, je interrupt pin nastaven jako výstup a přepnut do log. 0. Poté následuje kontrola, které tlačítko přerušení vyvolalo, což se provede pomocí nastavení pinu tlačítek jako vstupu a aktivování pull-up rezistorů těchto pinů. Detekce pinů je provedena pomocí součinu indexu pinu a jeho negované log. úrovně. Dle získané hodnoty je následně proveden příslušný úsek kódu, ve kterém se provádí obsluha periferií a LCD displeje, pro zobrazení stavu zařízení uživateli.

7 MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH CHARAKTERISTIK

Veškerá měření byla provedena ve školních laboratořích UREL.

7.1 Měření koncového zesilovače LM3886

Nastavené zesílení pro všechna měření bylo 33 dB a napájecí napětí +50 V.

7.1.1 Měření modulové kmitočtové charakteristiky

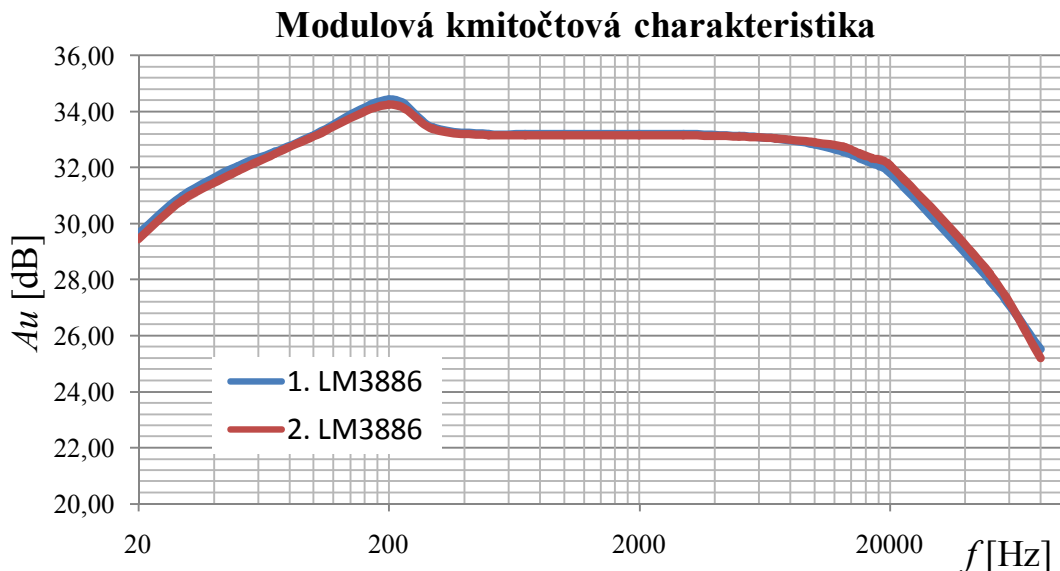
Měření bylo provedeno při konstantním vstupním napětí $U_{in} = 100 \text{ mV}$ a zátěži $R_z = 4 \text{ } \Omega$. Naměřené a vypočtené hodnoty obsahuje tabulka 3. Výsledný přenos byl vypočítán pomocí vzorce (7.1.1-1).

Tabulka 3. Změřené a vypočítané hodnoty pro zesilovače LM3886.

f	1. LM3886		2. LM3886	
	U_{out1}	Au	U_{out2}	Au
Hz	V	dB	V	dB
20	3,04	29,66	2,97	29,46
30	3,54	30,98	3,48	30,83
50	4,01	32,06	3,92	31,87
70	4,24	32,55	4,21	32,49
100	4,55	33,16	4,52	33,10
200	5,26	34,42	5,16	34,25
300	4,69	33,42	4,66	33,37
500	4,57	33,20	4,55	33,16
700	4,57	33,20	4,55	33,16
1000	4,57	33,20	4,55	33,16
2000	4,57	33,20	4,55	33,16
3000	4,57	33,20	4,54	33,14
5000	4,53	33,12	4,52	33,10
7000	4,48	33,03	4,48	33,03
10000	4,38	32,83	4,41	32,89
13000	4,25	32,57	4,33	32,73
15000	4,15	32,36	4,22	32,51
17000	4,05	32,15	4,13	32,32
20000	3,89	31,80	4,02	32,08
50000	2,5	27,96	2,57	28,20
80000	1,89	25,53	1,82	25,20

Vzorec pro výpočet napět'ového zesílení v dB:

$$A_u = 20 * \log \left(\frac{U_{out}}{U_{in}} \right) [\text{dB}]. \quad (7.1.1-1)$$



Obrázek 13. Modulová kmitočtová charakteristika pro koncové zesilovače LM3886.

Z výsledného grafu (obrázek 13.) můžeme vyčíst, že největšího zesílení dosahuje zesilovač na kmitočtu 200 Hz, tj. 34,25 dB. V případě této práce, kdy budou zesilovače budit basové reproduktory, je toto zesílení na 200 Hz ideální. Mezní kmitočet je $f_d = 33$ Hz a $f_h = 20,5$ kHz. Poměrně velká nelinearita a menší zesílení v rozmezí kmitočtu 20 - 50 Hz nehraje příliš velkou roli, jelikož použité basové reproduktory SP-252C mají dolní mezní kmitočet 50 Hz. Drobné rozdíly v modulové kmitočtové charakteristice mezi použitými zesilovači mohou být způsobeny tolerancí použitých součástek, rozdílnou výrobní sérií zesilovačů nebo chybovostí měřicích přístrojů.

7.1.2 Měření celkového harmonického zkreslení

Měření $THD + N$ [%] bylo provedeno v kmitočtovém rozsahu od 20 Hz do 20 kHz na třech různých vstupních napětích U_{in} , při zátěži $R_z = 4 \Omega$. Výsledky toho měření jsou zaznamenány v tabulce 4. Audio analyzátor, kterým bylo $THD + N$ měřeno udával harmonické zkreslení v decibelech. Pro lepší orientaci byly hodnoty přepočteny na procenta pomocí vzorce 7.1.2-1. Na výsledky měření mělo vliv samotné harmonické zkreslení použitých měřicích přístrojů.

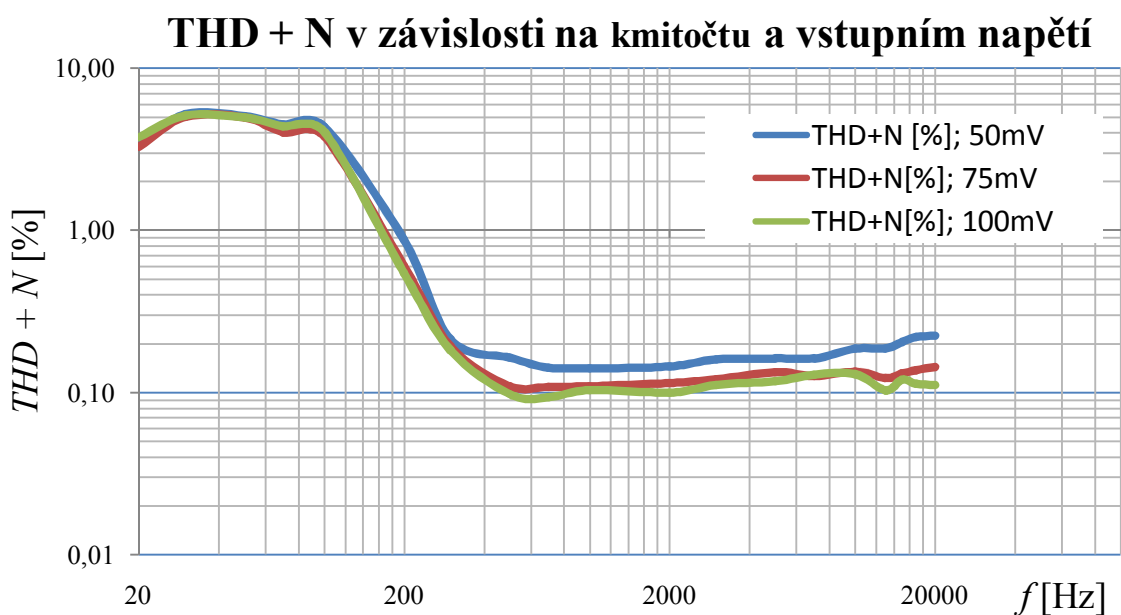
Tabulka 4. Závislost harmonického zkreslení na kmitočtu a úrovni vstupního napětí.

f	U _{in} = 50mV		U _{in} = 75mV		U _{in} = 100mV	
	THD + N		THD + N		THD + N	
Hz	dB	%	dB	%	dB	%
20	-29,66	3,29	-29,7	3,27	-28,5	3,76
30	-25,67	5,21	-26,01	5,01	-25,82	5,12
50	-25,89	5,08	-26,11	4,95	-26,08	4,97
70	-26,91	4,51	-27,92	4,02	-27,16	4,39
100	-27,23	4,35	-28,42	3,79	-27,91	4,02
200	-41,18	0,87	-44,37	0,60	-45,22	0,55
300	-53,47	0,21	-54,32	0,19	-54,78	0,18
500	-55,7	0,16	-59,21	0,11	-60,2	0,10
700	-56,9	0,14	-59,3	0,11	-60,6	0,09
1000	-56,97	0,14	-59,19	0,11	-59,7	0,10
2000	-56,8	0,14	-58,8	0,11	-59,98	0,10
3000	-55,9	0,16	-58,38	0,12	-59,04	0,11
5000	-55,8	0,16	-57,49	0,13	-58,59	0,12
7000	-55,8	0,16	-57,99	0,13	-57,78	0,13
10000	-54,6	0,19	-57,44	0,13	-57,7	0,13
13000	-54,55	0,19	-58,2	0,12	-59,7	0,10
17000	-53,12	0,22	-57,21	0,14	-58,9	0,11
20000	-52,97	0,22	-56,87	0,14	-59,1	0,11

Vzorec pro přepočítání $THD + N$ [dB] na $THD + N$ [%]:

$$THD + N = 10^{\left(\frac{THD+N_{[dB]}}{20}\right)} [\%]. \quad (7.1.2-1)$$

Měření bylo provedeno pro oba zesilovače LM3886, uvedeny jsou však pouze jedny výsledky, jelikož naměřené hodnoty byly až na pár drobných odchylek totožné. Největší míra celkového harmonického zkreslení je pro všechna měřená vstupní napětí na kmitočtu $f = 30$ Hz.



Obrázek 14. THD + N v závislosti na kmitočtu a vstupním napětí pro LM3886.

7.1.3 Měření maximálního výstupního výkonu

Měření proběhlo na kmitočtu $f = 1$ kHz a zátěži $R_z = 4 \Omega$. Postupným navyšováním vstupního napětí U_{in} a pozorováním výstupního napětí U_{out} na osciloskopu, dokud nedošlo k jeho limitaci. Tím byla zjištěna maximální hodnota výstupního napětí, kterou dokáže zesilovač zesílit bez jakéhokoliv zkreslení a limitace. Dosazením této hodnoty do vzorce 7.1.3-1 byla vypočtena maximální hodnota výstupního výkonu P_{max} , kterou dokáže koncový zesilovač LM3886 dodat do zátěže.

$$P_{max} = \frac{U_{out}^2}{R_z} [W] \quad (7.1.3-1)$$

1. zesilovač: změřeno $U_{out} = 16,41$ V, po dosazení do vzorce 7.1.3-1

$$P_{max1} = 67,32 \text{ W.}$$

2. zesilovač: změřeno $U_{out} = 16,38$ V, po dosazení do vzorce 7.1.3-1

$$P_{max2} = 67,08 \text{ W.}$$

7.1.4 Měření vstupní impedance zesilovače

Toto měření bylo provedeno pomocí generátoru, kterým byl přes sériový rezistor $R_0 = 100 \text{ k}\Omega$ na vstup zesilovače přiveden signál o kmitočtu $f = 1$ kHz a amplitudě $U_{gen} = 50$ mV. Následně bylo pomocí osciloskopu změřeno napětí za sériovým rezistorem U_R , na kterém vznikl průchodem proudu úbytek napětí. Po dosazení do vzorce 7.1.4-1 dostaneme vstupní impedanci zesilovače Z_{in} .

$$Z_{in} = \frac{U_R}{(U_{gen} - U_R)} * R_0 [\Omega], \quad (7.1.3-1)$$

1. Zesilovač: změřeno $U_R = 8,8$ mV, po dosazení do vzorce 7.1.4-1

$$Z_{in1} = 21,36 \text{ k}\Omega.$$

2. Zesilovač: změřeno $U_R = 9,1$ mV, po dosazení do vzorce 7.1.4-1

$$Z_{in2} = 22,25 \text{ k}\Omega.$$

7.1.5 Měření výstupní impedance zesilovače

Na výstup zesilovače byla připojena zátěž $R_z = 4 \Omega$, pomocí generátoru byl na vstup přiveden signál o kmitočtu $f = 1$ kHz a amplitudě $U_{gen} = 100$ mV. Poté byla změřena hodnota výstupního napětí s připojenou zátěží U_2 a následně s odpojenou zátěží U_{20} . Výstupní impedance Z_{out} byla vypočítána pomocí vzorce 7.1.5-1.

$$Z_{out} = \frac{U_{20} - U_2}{U_2} [\Omega] \quad (7.1.5-1)$$

1. Zesilovač: změřeno $U_2 = 4,58$ V, $U_{20} = 4,69$ V, po dosazení do vzorce 7.1.5-1

$$Z_{out1} = 0,024 \Omega.$$

2. Zesilovač: změřeno $U_2 = 4,59$ V, $U_{20} = 4,71$ V, po dosazení do vzorce 7.1.5-1

$$Z_{out2} = 0,026 \Omega.$$

7.2 Měření koncového zesilovače TDA7388

Nastavené zesílení pro všechna měření bylo 26 dB a napájecí napětí +12 V.

7.2.1 Měření modulové kmitočtové charakteristiky

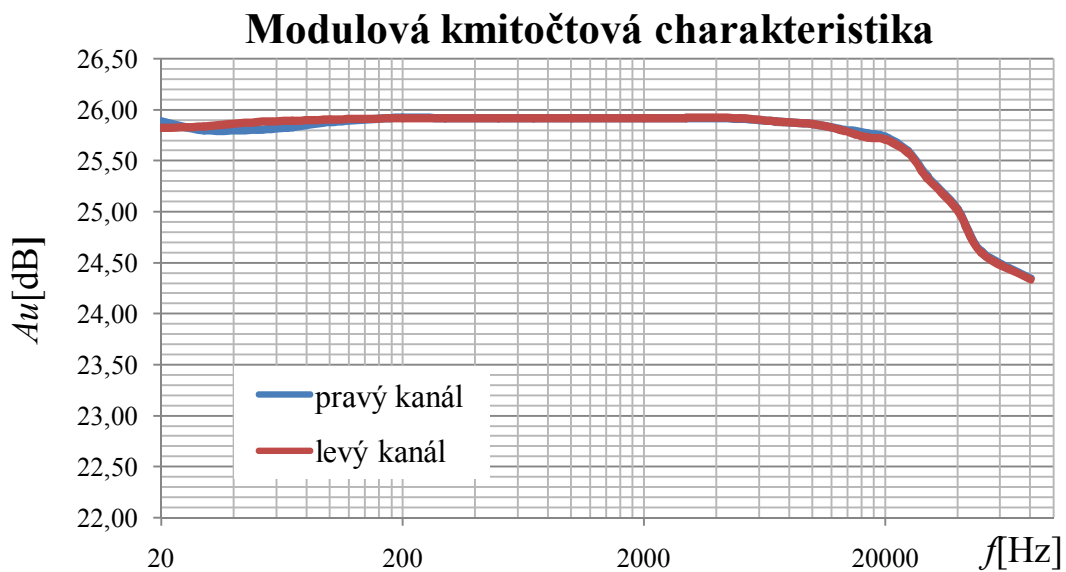
Měření bylo provedeno při konstantním vstupním napětí $U_{in} = 200$ mV a zátěží $R_z = 4 \Omega$. Naměřené a vypočtené hodnoty obsahuje tabulka 5. Výsledný přenos byl vypočítán pomocí vztahu 7.1.1-1.

Laboratorní audio analyzátor, kterým byla modulová kmitočtová charakteristika měřena, dokázal na vstup zesilovače dodat signál o maximálním kmitočtu 80 kHz. V tomto případě je koncový zesilovač natolik kvalitní, že i na 80 kHz není zaznamenán pokles na výstupním napětí o -3 dB. Kvůli tomu se nedá odečíst jeho dolní i horní mezní kmitočet.

Tabulka 5. Změřené a vypočítané hodnoty pro zesilovač TDA7388.

f	pravý kanál		levý kanál	
	U _{out}	A _u	U _{out}	A _u
Hz	V	dB	V	dB
20	3,94	25,89	3,91	25,82
30	3,90	25,80	3,92	25,84
50	3,90	25,80	3,94	25,88
70	3,91	25,83	3,94	25,89
100	3,94	25,88	3,95	25,90
200	3,96	25,92	3,95	25,92
300	3,95	25,92	3,95	25,92
500	3,95	25,92	3,95	25,92
700	3,95	25,92	3,95	25,92
1000	3,95	25,92	3,95	25,92
2000	3,95	25,92	3,95	25,92
3000	3,95	25,92	3,95	25,92
5000	3,95	25,91	3,95	25,92
7000	3,94	25,89	3,94	25,89
10000	3,93	25,86	3,93	25,86
13000	3,90	25,81	3,90	25,81
15000	3,90	25,79	3,88	25,76
17000	3,88	25,76	3,87	25,73
20000	3,87	25,74	3,86	25,71
50000	3,40	24,61	3,40	24,60
80000	3,30	24,35	3,29	24,33

Z vypočítaných hodnot byl vynesena graf (viz obrázek 15), na kterém lze pozorovat, že na celé šířce pásma 20 – 20 kHz je zesílení lineární. Mezní kmitočty f_d a f_h se nacházejí mimo pracovní pásmo. Pro účely užití tohoto zesilovače je změřena charakteristika naprosto ideální, jelikož TDA7388 slouží k vybuzení širokopásmových reproduktorů.



Obrázek 15. Modulová kmitočtová charakteristika pro TDA7388.

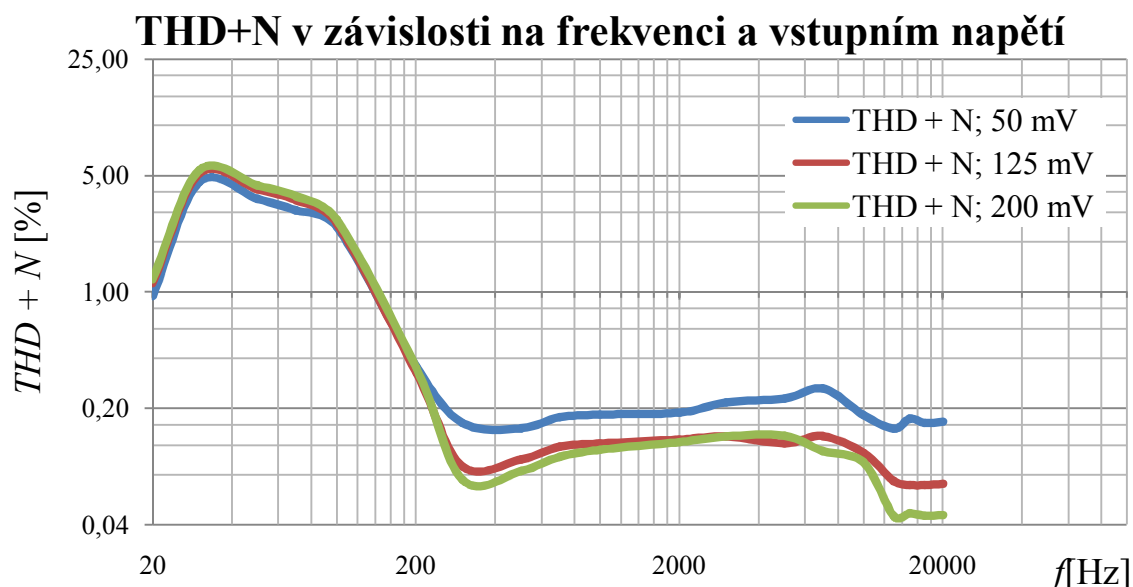
7.2.2 Měření celkového harmonického zkreslení

Tabulka 6. Naměřené a vypočítané hodnoty celkového harmonického zkreslení pro TDA7388.

f	U _{in} = 50mV		U _{in} = 125mV		U _{in} = 200mV	
	THD + N		THD + N		THD + N	
Hz	dB	%	dB	%	dB	%
20	-40,5	0,94	-39	1,12	-38,5	1,19
30	-26,83	4,56	-25,78	5,14	-25,4	5,37
50	-28,85	3,61	-27,68	4,13	-27,24	4,35
70	-30,2	3,09	-28,95	3,57	-28,5	3,76
100	-32,2	2,45	-31,79	2,57	-31,39	2,69
200	-48,94	0,36	-49,71	0,33	-49,08	0,35
300	-55,69	0,16	-60,94	0,09	-62,58	0,07
500	-56,37	0,15	-60,1	0,10	-61,52	0,08
700	-55,05	0,18	-58,6	0,12	-59,82	0,10
1000	-54,7	0,18	-58,2	0,12	-58,92	0,11
2000	-54,46	0,19	-57,74	0,13	-58,02	0,13
3000	-53,28	0,22	-57,3	0,14	-57,3	0,14
5000	-52,8	0,23	-58,2	0,12	-57,23	0,14
7000	-51,6	0,26	-57,3	0,14	-59,12	0,11
10000	-54,78	0,18	-59,35	0,11	-60,49	0,09
13000	-56,4	0,15	-62,7	0,07	-66,94	0,04
17000	-55,7	0,16	-63,2	0,07	-66,9	0,05
20000	-55,6	0,17	-63	0,07	-66,81	0,05

Měření proběhlo stejně jako v kapitole 7.1.2 a výsledky z tohoto měření jsou zaznamenány v tabulce 6. Největší míra celkového harmonického zkreslení je stejně jako u zesilovače LM3886 na kmitočtu $f = 30$ Hz.

Naměřené hodnoty celkového harmonického zkreslení byly opět přepočítány pomocí vzorce (7.1.2-1) na THD + N v procentech a poté vyneseny do grafu (viz obrázek 16).



Obrázek 16. THD + N v závislosti na kmitočtu a vstupním napětí pro TDA7388.

7.2.3 Měření maximálního výstupního výkonu

Velikost maximálního výstupního výkonu P_{\max} byla změřena pro levý i pravý kanál zesilovače.

Levý kanál: změřeno $U_{\text{out}} = 9,11$ V, po dosazení do vztahu 7.1.3-1

$$P_{\max} = 20,75 \text{ W.}$$

Pravý kanál: změřeno $U_{\text{out}} = 9,10$ V, po dosazení do vztahu 7.1.3-1

$$P_{\max} = 20,70 \text{ W.}$$

7.2.4 Měření vstupní impedance zesilovače

Měření bylo provedeno stejně jako v kapitole 7.1.4, s tím rozdílem, že za sériový rezistor byl zvolen $R_0 = 38$ k Ω .

Levý kanál: změřeno $U_R = 20,34$ mV, po dosazení do vztahu 7.1.4-1

$$Z_{inL} = 26,06 \text{ k}\Omega.$$

Pravý kanál: změřeno $U_R = 20,31$ mV, po dosazení do vztahu 7.1.4-1

$$Z_{inP} = 25,99 \text{ k}\Omega.$$

7.2.5 Měření výstupní impedance zesilovače

Parametry byly nastaveny obdobně jako v kapitole 7.1.5.

Levý kanál: změřeno $U_2 = 3,965 \text{ V}$, $U_{20} = 4,136 \text{ V}$, po dosazení do vztahu 7.1.5-1

$$Z_{\text{outL}} = 0,043 \Omega.$$

Pravý kanál: změřeno $U_2 = 3,971 \text{ V}$, $U_{20} = 4,14 \text{ V}$, po dosazení do vztahu 7.1.5-1

$$Z_{\text{outP}} = 0,0425 \Omega.$$

7.3 Měření přeladitelné aktivní výhybky

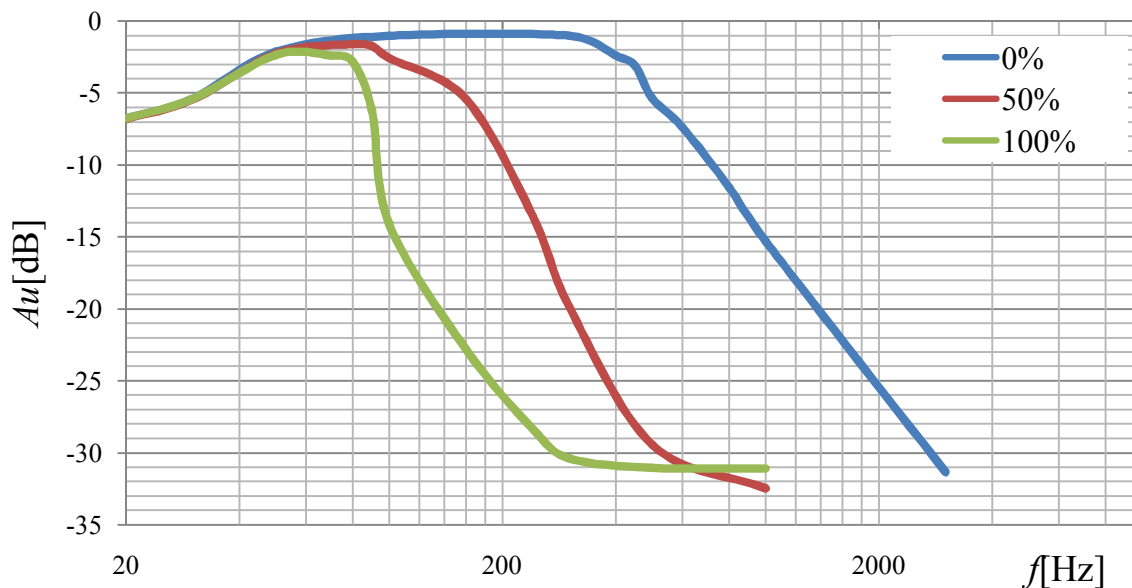
Přeladitelnost aktivní výhybky byla ověřena na třech odlišných hodnotách odporu digitálního potenciometru.. Měření probíhalo při vstupním napětí $U_{\text{in}} = 1 \text{ V}$.

Tabulka 7. Vliv digitálního potenciometru na modulovou kmitočtovou charakteristiku výhybky.

Poloha jezdce 0 %			Poloha jezdce 50%			Poloha jezdce 100%		
f	U_{out}	Au	f	U_{out}	Au	f	U_{out}	Au
hz	V	dB	hz	V	dB	hz	V	dB
20	0,46	-6,76	20	0,46	-6,78	20	0,46	-6,76
30	0,54	-5,40	30	0,53	-5,48	30	0,54	-5,42
50	0,78	-2,12	50	0,77	-2,26	50	0,76	-2,34
100	0,89	-1,01	80	0,83	-1,60	70	0,76	-2,38
300	0,89	-1,01	90	0,82	-1,71	80	0,72	-2,82
400	0,76	-2,37	100	0,74	-2,58	90	0,49	-6,21
450	0,70	-3,10	160	0,54	-5,42	100	0,20	-14,11
500	0,54	-5,38	240	0,21	-13,51	160	0,07	-22,83
600	0,43	-7,37	300	0,10	-19,83	240	0,04	-28,34
800	0,26	-11,55	500	0,03	-29,45	300	0,03	-30,40
1000	0,17	-15,31	1000	0,02	-32,47	500	0,03	-31,06
3000	0,03	-31,37	-	-	-	1000	0,03	-31,09

Digitální potenciometr byl pomocí procesoru postupně nastaven na hodnotu 0Ω , $25 \text{ k}\Omega$ a $50 \text{ k}\Omega$. Tím získáváme přibližně přehled o schopnosti měnit mezní kmitočet výhybky. Z naměřených hodnot byl vytvořen graf, který názorně zobrazuje přeladitelnost výhybky, viz obrázek 17. Mezní kmitočet výhybky v případě nastavení 0Ω je $f_{\text{mez}} = 82 \text{ Hz}$, pro $25 \text{ k}\Omega$ je $f_{\text{mez}} = 135 \text{ Hz}$ a pro maximální možnou hodnotu $50 \text{ k}\Omega$ byl mezní kmitočet výhybky odečten $f_{\text{mez}} = 480 \text{ Hz}$.

Modulová kmitočtová charakteristika výhybky



Obrázek 17. Modulová kmitočtová charakteristika přeladitelné aktivní výhybky.

7.4 Měření regulace hlasitosti

Vstupní signál měl parametry $U_{in} = 1V$ a $f = 1\text{ kHz}$. Výstupní napětí bylo přepočteno pomocí vztahu 7.1.1-1.

Tabulka 8. Změna výstupního napětí v závislosti na odporu digitálního potenciometru.

Poloha jezdce 0 %		Poloha jezdce 50 %		Poloha jezdce 100 %	
U_{out}	Au	U_{out}	Au	U_{out}	Au
V	dB	V	dB	V	dB
0,003	-50,46	0,316	-10,01	0,984	-0,14

POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

ROHDE&SCHWARZ UPV AUDIO ANALYZER

ROHDE&SCHWARZ RTM 1052 OSCILLOSCOPE

Laboratorní zdroj Manson SDP-2405

8 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout koncový audio zesilovač pro subwoofer spolu s inteligentním ovládáním, včetně samotné realizace.

Teoretická část práce se věnuje problematice spojené s konstrukcí subwooferu. Zejména na výpočet objemu bassreflexové ozvučnice spolu s výpočtem délky a šířky bassreflexového nátrubku.

Velký důraz byl kladen při návrhu napájecí části, a to kvůli rušení jenž může vzniknout při zapalování automobilu. Toto rušení je anulováno pomocí odrušovacího filtru, který je principiálně shodný s CLC filtrem typu dolní propust.

Při návrhu koncového audio zesilovače pro subwoofer, musel být vyřešen problém s napájecím napětím. Existuje jen velmi málo výkonových zesilovačů, které jsou běžně dostupné a dokážou při malém napájecím napětí dodat nominální výkon o hodnotě až 70 W. Tento problém byl vyřešen pomocí DC/DC měniče napětí, který navyšuje úroveň napětí z 12 V na 50 V a napájí integrovaný výkonový audio zesilovač LM3886, jenž je schopný dodávat při zátěži 4 Ω nominální výkon o velikosti 68 W.

Další částí je návrh koncového audio zesilovače s nominálním výkonem 4x25 W, toho je dosaženo díky integrovanému zesilovači TDA7388. U tohoto integrovaného zesilovače nemusel být řešen problém s napájecím napětím, jelikož je určen přímo do automobilu.

V praktické části byl proveden návrh desek plošných spojů, které byly následně osazeny a oživeny. Dle zadání byl také navržen a vyroben subwoofer s bassreflexovou ozvučnicí o objemu 2 x 55 l.

Dále bylo provedeno měření základních charakteristik zesilovačů, jako je modulová kmitočtová charakteristika, celkové harmonické zkreslení, maximální výstupní výkon a také vstupní/výstupní impedance. Při měření harmonického zkreslení zesilovače dosahovala míra harmonického zkreslení maximálně 5 %. Výrobce deklaruje v technické dokumentaci hodnotu v řádech desetin procent. Toho zde nebylo dosaženo, hodnoty se však stále pohybují v přijatelném rozmezí. Měřené modulové kmitočtové charakteristiky zesilovačů odpovídají charakteristice udávané v technické dokumentaci součástek.

U řídicí jednotky byla měřením ověřena funkce digitálních potenciometrů regulovat úroveň hlasitosti a měnit mezní kmitočet výhybky. Při měření modulové kmitočtové charakteristiky aktivní výhybky byl zjištěn útlum výstupního signálu. Tento útlum by mohl vznikat na operačním zesilovači NE5532, který je součástí obvodu aktivní výhybky.

Po provedení příslušných měření byla jednotlivá zařízení umístěna do přístrojových skříní, propojena v jeden celek a odzkoušena jejich funkčnost spolu s inteligentním ovládáním. Při zkoušce byla zjištěna nekvalitní reprodukce nízkých kmitočtů použitých basových reproduktorů SP-252C, která vyplývá i z jejich modulové kmitočtové charakteristiky udávané výrobcem. Proto by bylo vhodné tyto reproduktory vyměnit za kvalitnější.

LITERATURA

- [1] KESL, Jan. *Elektronika: učebnice : základní studijní materiál pro střední školy*. 2., aktualiz. a rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 136 s. ISBN 80-730-0143-8.
- [2] *Elnika.sweb.cz* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://elnika.sweb.cz/zesilovace/tridy_vykon_zes.htm
- [3] TOMAN, Kamil. *REPRO DUKTORY A REPROSOUSTAVY I*. 1. Česko: BEN, 2003.
- [4] *Repromania* [online]. 2005, 21.10.2008 [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: <http://www.repromania.net/teorie/rozdelovani-ozvucnic.php>
- [5] SVOBODA, Ladislav a Miloslav ŠTEFAN. *Reproduktory a reproduktorové soustavy*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1969, 257 s. Malá radiotechnická knihovna.
- [6] Dolní propust Sallen-Key. *Urel.feec.vutbr* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTEO/mteo/09%20dolni%20propust%20Sallen%20Key%20-%20teoreticky%20uvod.pdf>
- [7] *Okawa-denshi* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/OPseikiLowkeisan.htm>
- [8] SPÁČIL, Tomáš. *Návrh a konstrukce audio výkonového zesilovače ve třídě H* [online]. Brno, 2012, 2012 [cit. 2015-12-02]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/10105/BBCE.pdf?sequence=1>. VUT. Vedoucí práce Ing. Martin Dušek.
- [9] *LM3886* [online]. Dallas: texas instruments, 1999, 2013 [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3886.pdf>
- [10] *TDA7388* [online]. 2007, 2013-09-17 [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00179160.pdf>
- [11] ATmega 16. *Atmel* [online]. 2009, 3.2.2014 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/doc2466.pdf>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

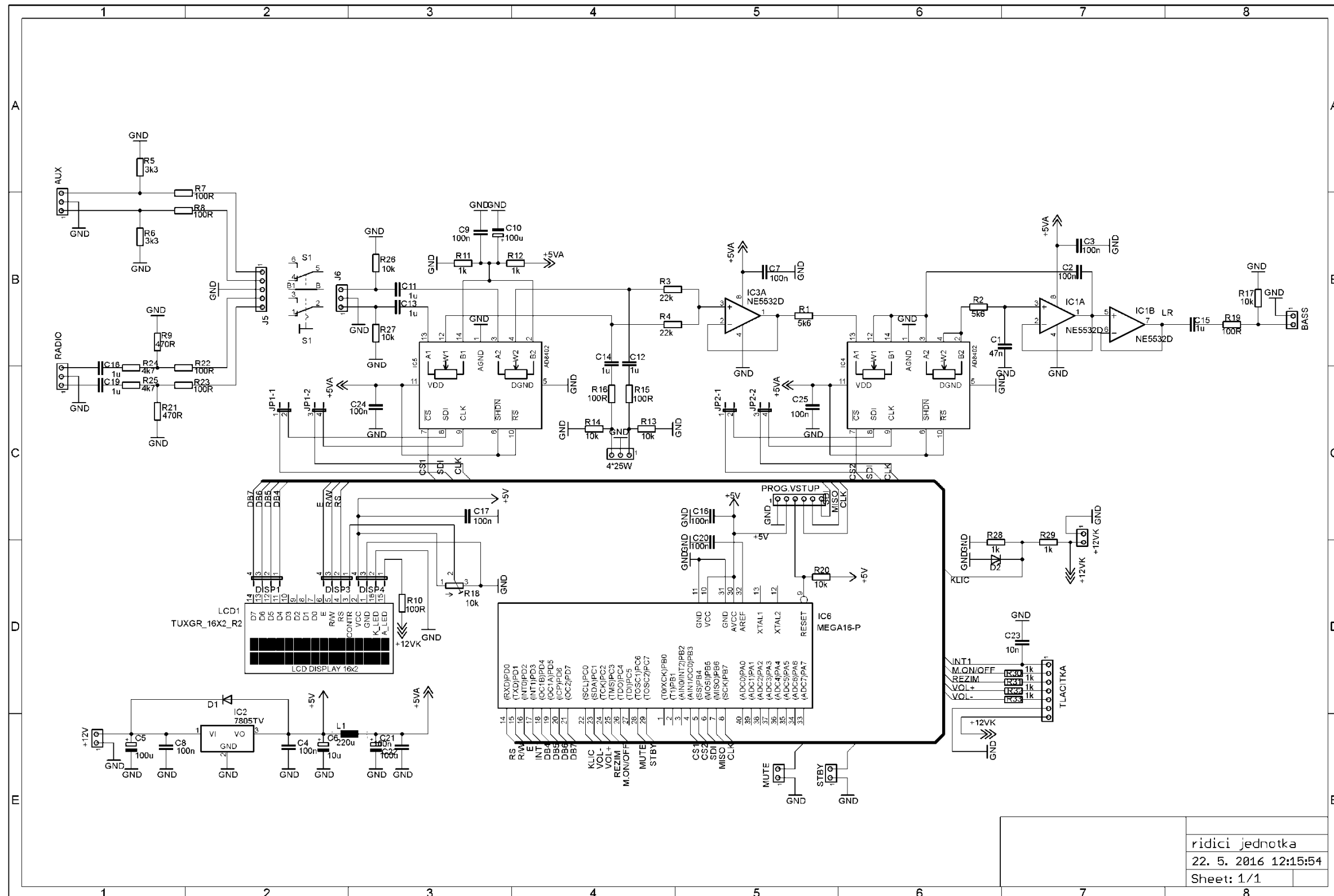
Q_{ts}	Celkový činitel jakosti
V_{as}	Ekvivalentní objem reproduktoru
V_b	Potřebný objem pro maximálně rovnou charakteristiku bassreflexu
f_s	Rezonanční kmitočet reproduktoru
f_3	Dolní mezní kmitočet bassreflexu při použití aproximace Maximally flat
f_b	Rezonanční kmitočet bassreflexu při aproximaci Maximally flat
f'_3	Dolní mezní kmitočet bassreflexu při snížení objemu V_b
f'_b	Rezonanční kmitočet bassreflexu při snížení objemu V_b
l	Délka bassreflexového nátrubku
l'	Délka bassreflexového nátrubku po snížení objemu V_b
V'_b	Snížený objem ozvučnice
d	Průměr bassreflexového nátrubku
SPL_{peak}	Špička jenž vznikne na SPL charakteristice při snížení objemu V_b
THD	Total harmonic distortion, celkové harmonické zkreslení
X_{max}	Maximální lineární výchylka
R_{MUTE}	Rezistor určující proud na pinu MUTE
V_{EE}	Záporné napájecí napětí
I_8	Proud tekoucí pinem MUTE
Ω	Jednotka elektrického odporu
W	Jednotka výkonu
V_A	Napětí pro analogovou část
V	Elektrické napětí
R	Elektrický odpor
C	Elektrická kapacita
L	Vlastní indukčnost
Hz	Hertz, jednotka frekvence
DPS	Deska plošného spoje
Z_{in}	Vstupní impedance zesilovače
Z_{out}	Výstupní impedance zesilovače

SEZNAM PŘÍLOH

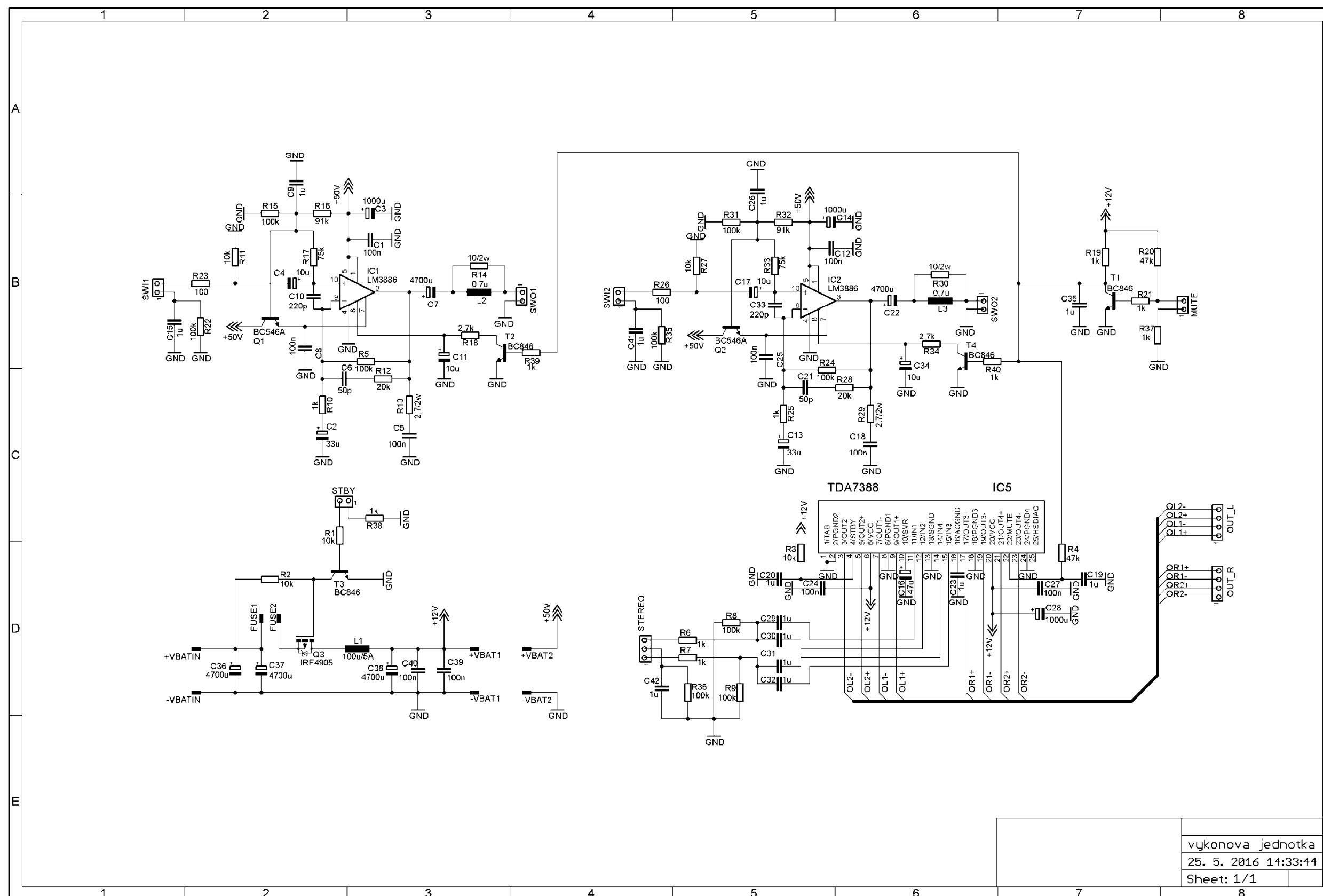
A	Návrh zařízení	36
A.1	Obvodové zapojení řídicí jednotky	36
A.2	Obvodové zapojení výkonové jednotky	37
A.3	Obvodové zapojení tlačítek	38
B	Návrh a výroba ozvučnice	39
B.1	Výsledek simulace bassreflexové ozvučnice	39
B.2	Konstrukční návrh bassreflexové ozvučnice	40
B.3	Vnitřní provedení bassreflexové ozvučnice.....	41
B.4	Kompletní bassreflexová ozvučnice.....	41
C	Desky plošných spojů	42
C.1	Deska plošného spoje výkonové jednotky.....	42
C.2	Deska plošného spoje řídicí jednotky.....	44
C.3	Deska plošného spoje tlačítek.....	44
D	osazovací plány a seznamy součástek	45
D.1	Osazovací plán a seznam součástek výkonové jednotky	45
D.2	Osazovací plán a seznam součástek řídicí jednotky	48
D.3	Osazovací plán a seznam součástek tlačítek.....	50
E	fotodokumentace	52
E.1	Přístrojová skříň výkonové jednotky.....	52
E.2	Přístrojová skříň řídicí jednotky.....	53

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

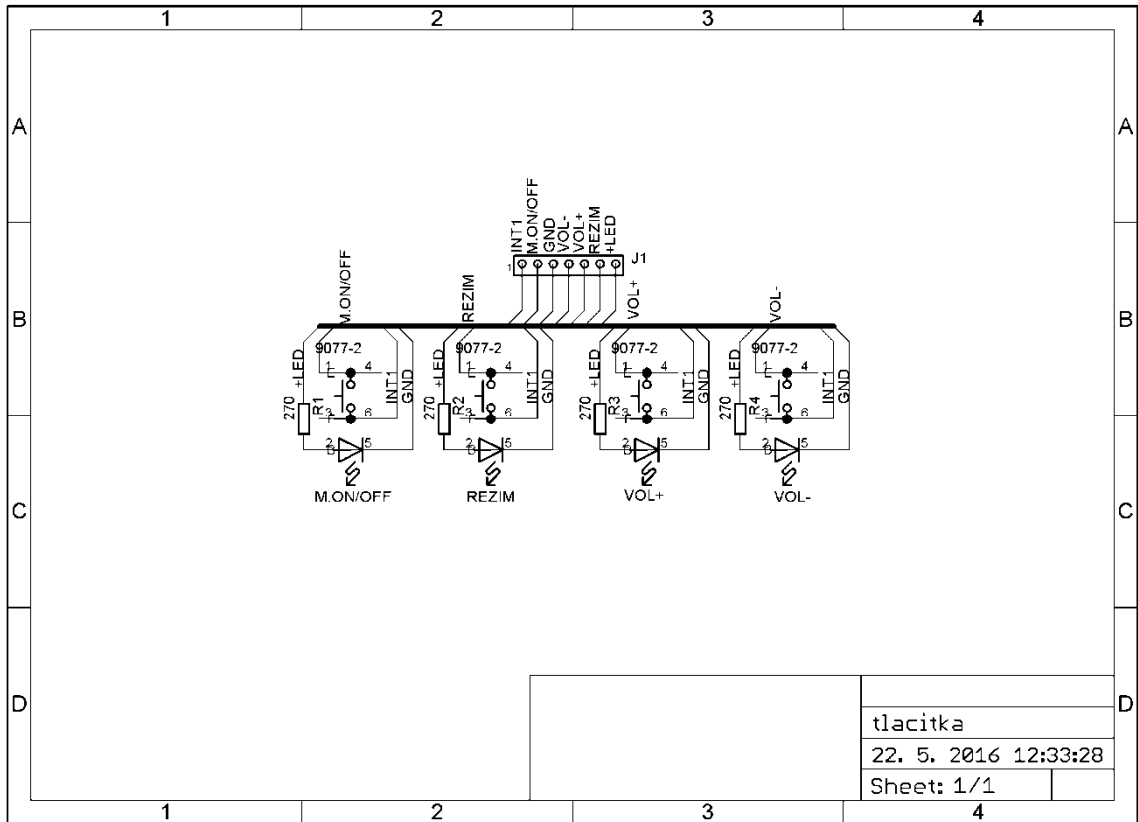
A.1 Obvodové zapojení řídicí jednotky



A.2 Obvodové zapojení výkonové jednotky

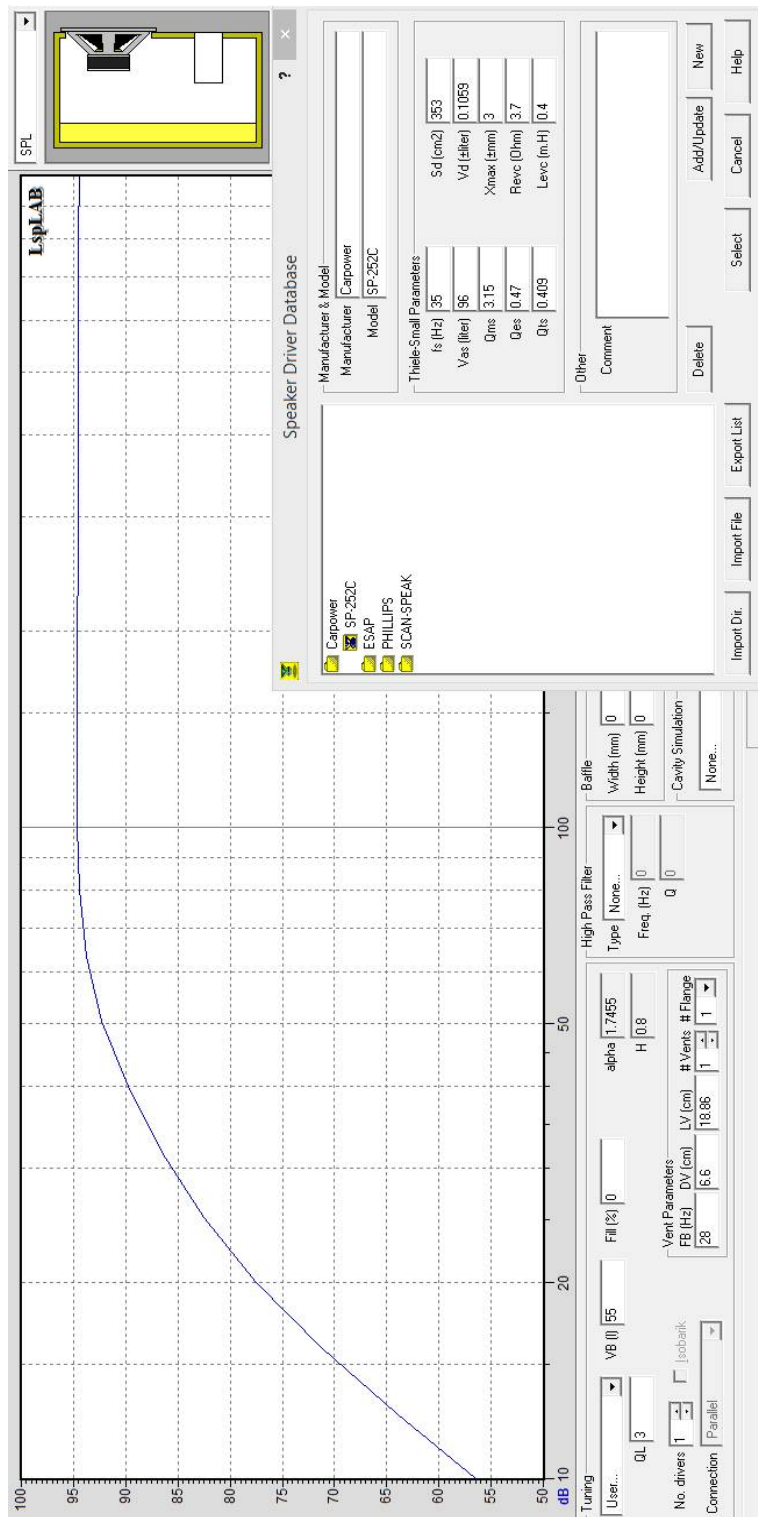


A.3 Obvodové zapojení tlačítek

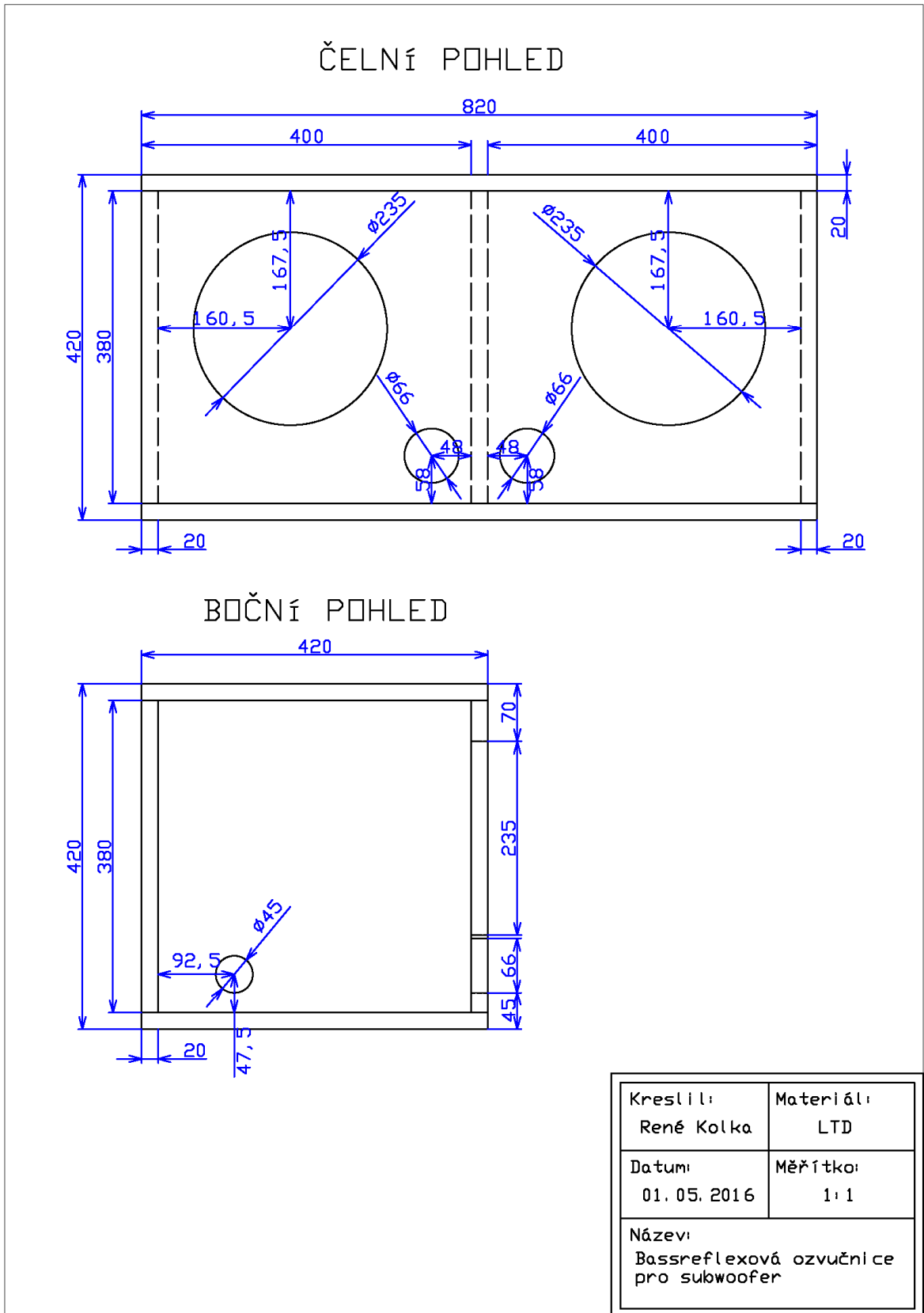


B NÁVRH A VÝROBA OZVUČNICE

B.1 Výsledek simulace bassreflexové ozvučnice



B.2 Konstrukční návrh bassreflexové ozvučnice



B.3 Vnitřní provedení bassreflexové ozvučnice



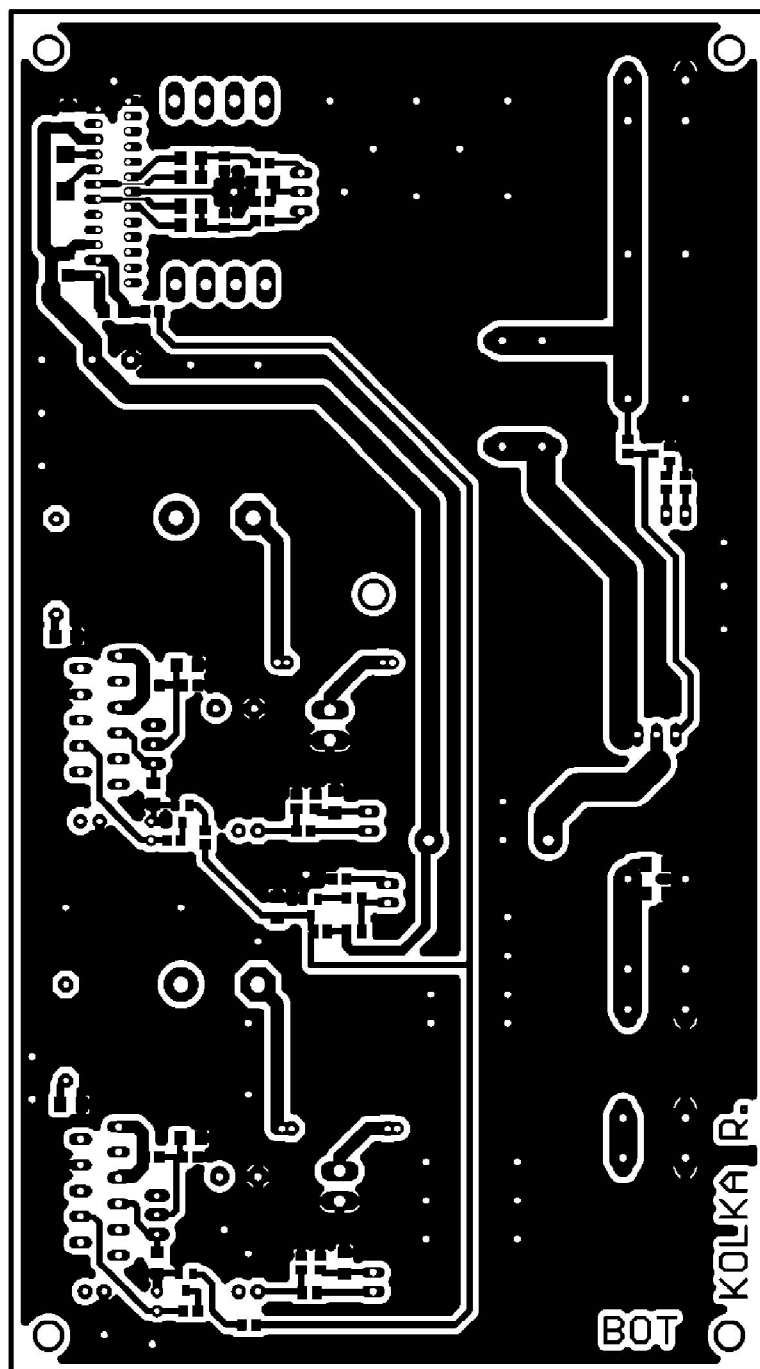
B.4 Kompletní bassreflexová ozvučnice



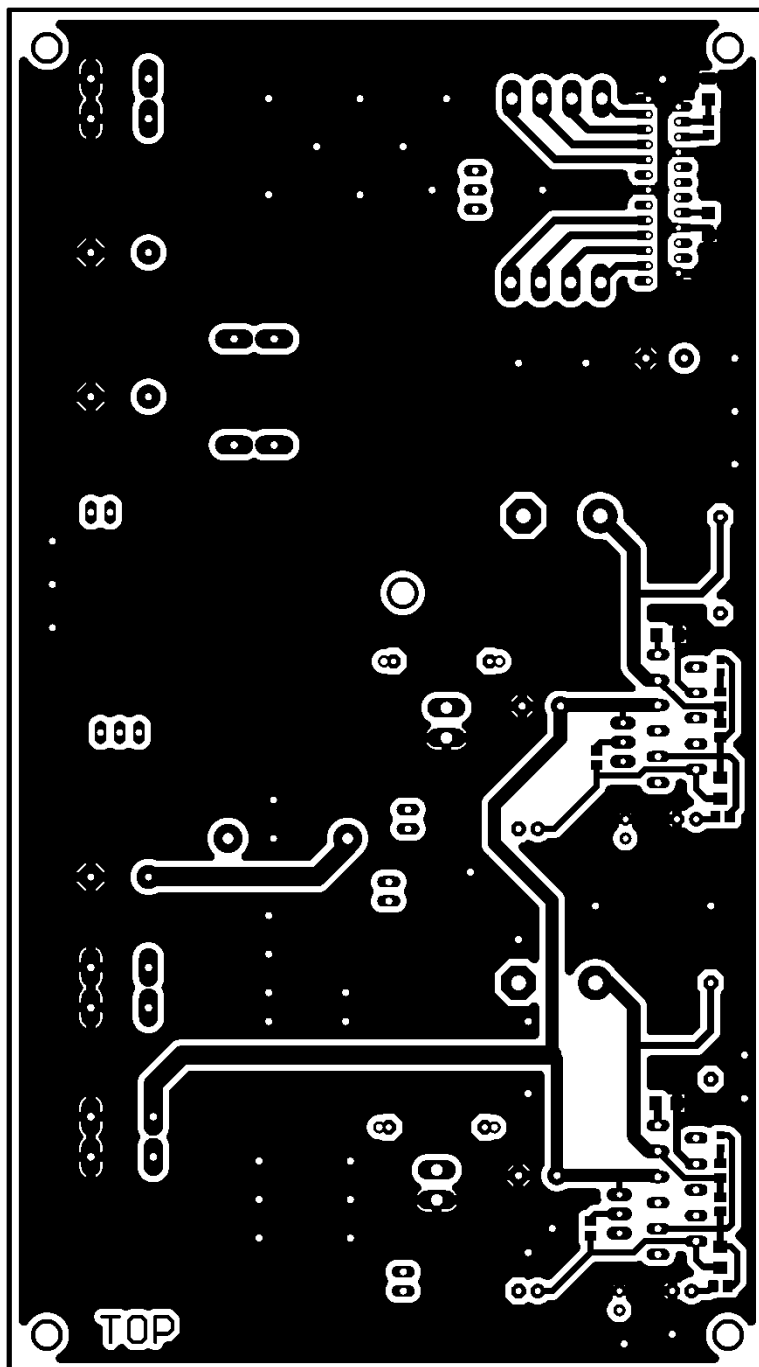
C DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

C.1 Deska plošného spoje výkonové jednotky

strana BOTTOM, rozměry 180 x 100 [mm], měřítko M 1:1

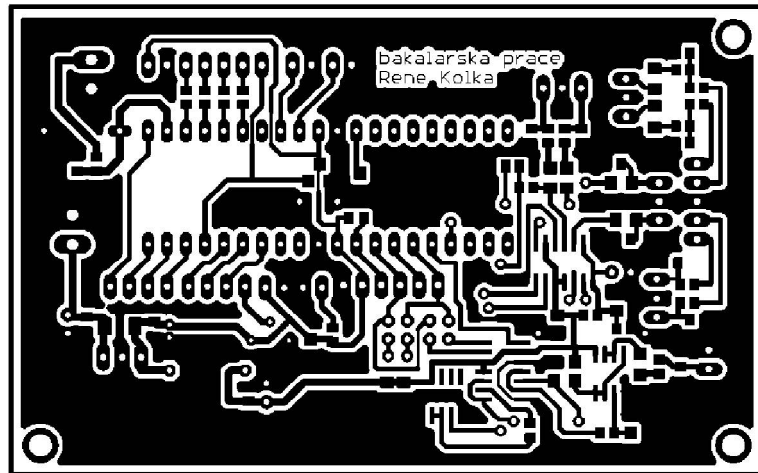


strana TOP, rozměry 180 x 100 [mm], měřítko M 1:1



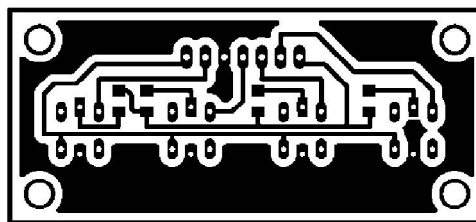
C.2 Deska plošného spoje řídicí jednotky

rozměry 100 x 63 [mm], měřítko M 1:1



C.3 Deska plošného spoje tlačítek

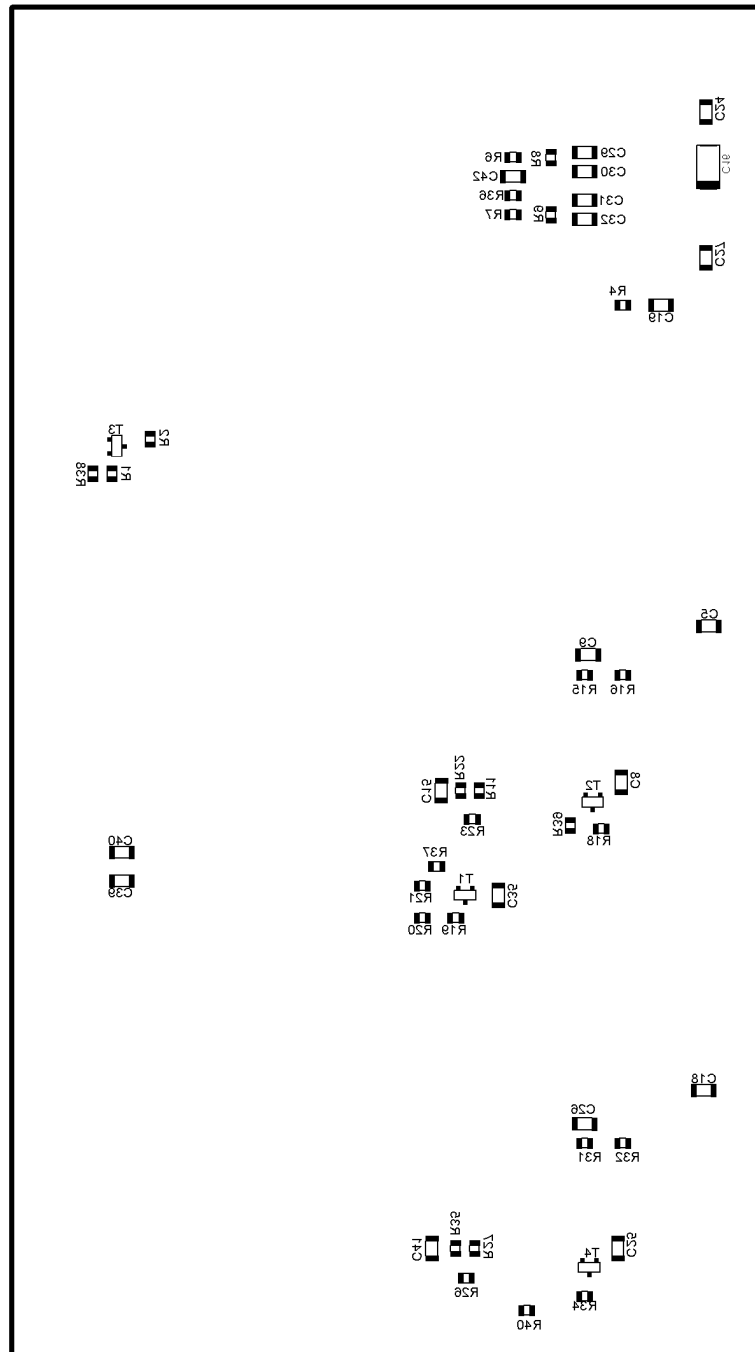
rozměry 64 x 29 [mm], měřítko M 1:1

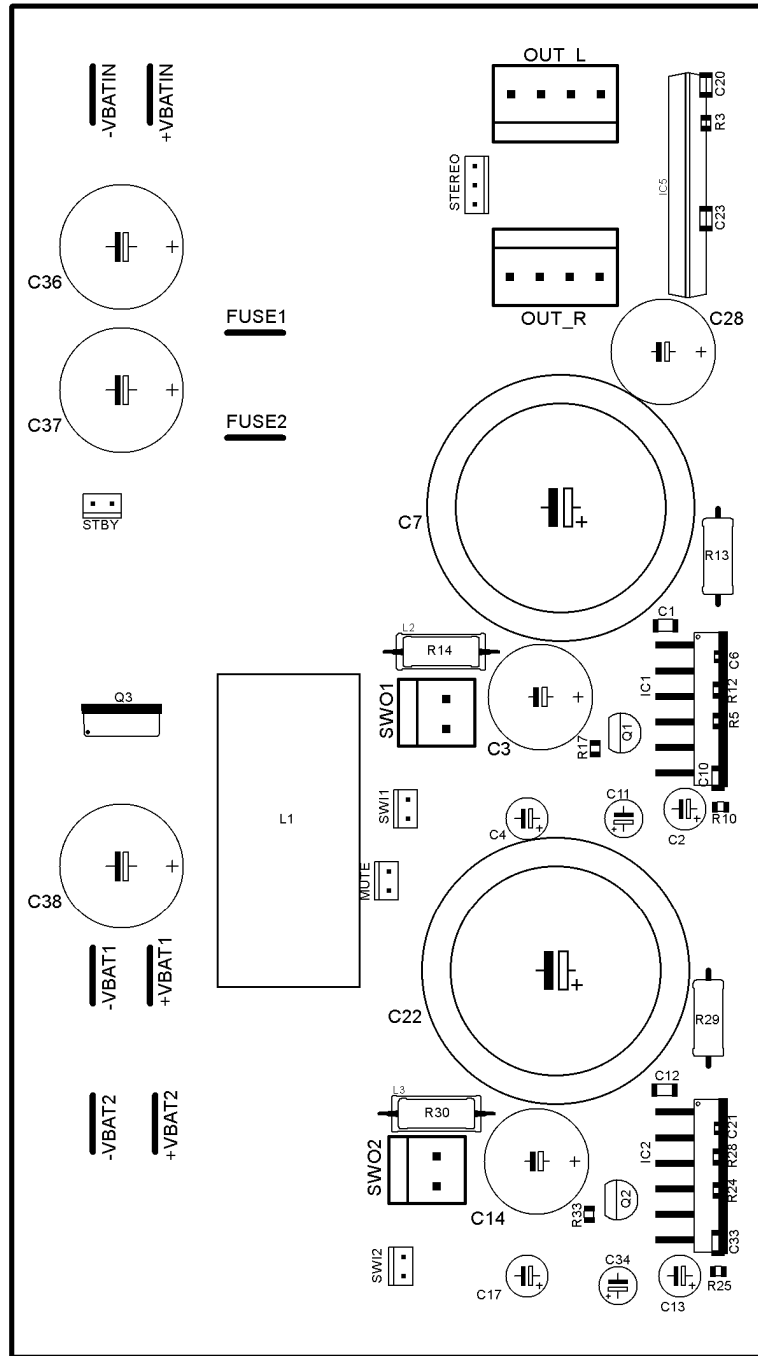


D OSAZOVACÍ PLÁNY A SEZNAMY SOUČÁSTEK

D.1 Osazovací plán a seznam součástek výkonové jednotky

strana BOTTOM





seznam součástek výkonové jednotky

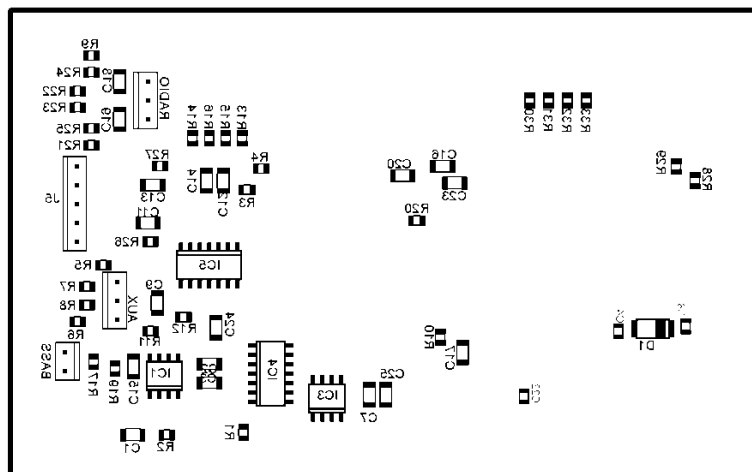
označení	počet	hodnota	pouzdro	popis
R23, R26	2	100R	R0805	rezistor
R5, R8, R9, R15, R22, R24, R31, R35, R36	9	100k	R0805	rezistor
R1, R2, R3, R11, R27	5	10k	R0805	rezistor
R6, R7, R10, R19, R21, R25, R37, R38, R39, R40	10	1k	R0805	rezistor
R18, R34	2	2,7k	R0805	rezistor
R12, R28	2	20k	R0805	rezistor
R4, R20	2	47k	R0805	rezistor
R17, R33	2	75k	R0805	rezistor
R16, R32	2	91k	R0805	rezistor
R14, R30	2	10/2W	0411/12	rezistor
R13, R29	2	2,7/2W	0411/12	rezistor
C3, C14	2	1000u	E5-13	elektrolytický kondenzátor
C28	1	1000u	E5-13	elektrolytický kondenzátor
C24, C27, C39, C40	4	100n	C1206	keramický kondenzátor
C1, C5, C8, C12, C18, C25	6	100n	C1206	keramický kondenzátor
C4, C17	2	10u	E2,5-6	elektrolytický kondenzátor
C11, C34	2	10u	E2,5-5	elektrolytický kondenzátor
C15, C19, C20, C23, C29, C30, C31, C32, C35, C41, C42	11	1u	C1206	keramický kondenzátor
C9, C26	2	1u	C1206	keramický kondenzátor
C10, C33	2	220p	C1206	keramický kondenzátor
C2, C13	2	33u	E2,5-6	elektrolytický kondenzátor
C36, C37, C38	3	4700u	E7,5-16	elektrolytický kondenzátor
C7, C22	2	4700u	EB35D	elektrolytický kondenzátor

seznam součástek výkonové jednotky- pokračování

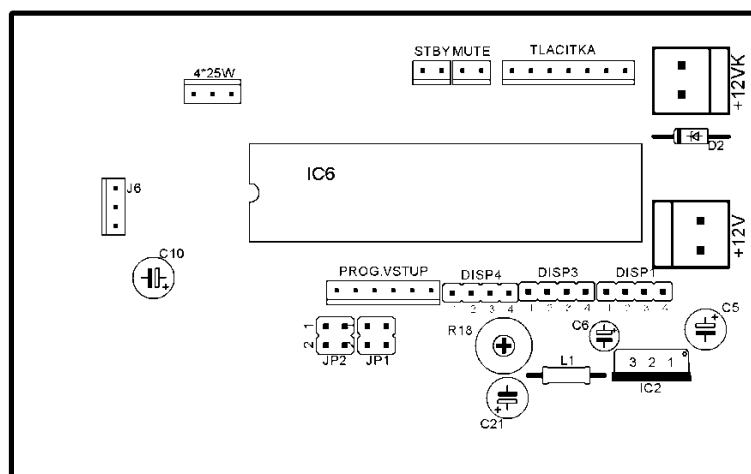
označení	počet	hodnota	pouzdro	popis
C16	1	47u	SMC_C	elektrolytický kondenzátor
C6, C21	2	50p	C0603	keramický kondenzátor
L2, L3	2	0,7u	TFI0510	tlumivka
L1	1	100u/5A	TJ7-U1	tlumivka
Q1, Q2	2	BC546A	TO92-EBC	tranzistor
Q3	1	IRF4905	TO220BV	MOS-FET
T1, T2, T3, T4	4	BC846	SOT23	tranzistor
IC1, IC2	2	LM3886		zesilovač
IC5	1	TDA7388	FLEXIWATT25	zesilovač
+VBAT1, +VBAT2, +VBATIN, -VBAT1, -VBAT2, -VBATIN, FUSE1, FUSE2	8	6,3 x 0,8 mm	faston- vidlice	do DPS
STBY, SWI1, SWI2, MUTE	4	2piny	MTA02-100	konektor se zámkem
SWO1, SWO2	2	2piny	MTA02-156	konektor se zámkem
STEREO	1	3piny	MTA03-100	konektor se zámkem
OUT_L, OUT_R	2	4piny	MTA04-156	konektor se zámkem

D.2 Osazovací plán a seznam součástek řídicí jednotky

strana BOTTOM



strana TOP



seznam součástek řídicí jednotky

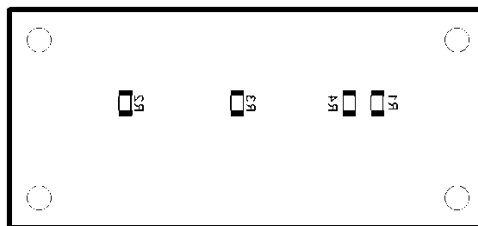
označení	počet	hodnota	pouzdro	popis
R7, R8, R10, R15, R16, R19, R22, R23	8	100R	R0805	rezistor
R13, R14, R17, R20, R26, R27	6	10k	R0805	rezistor
R18	1	10k	RTRIM3339P	trimmer
R11, R12, R28, R29, R30, R31, R32, R33	8	1k	R0805	rezistor
R3, R4	2	22k	R0805	rezistor
R5, R6	2	3k3	R0805	rezistor
R9, R21	2	470R	R0805	rezistor
R24, R25	2	4k7	R0805	rezistor
R1, R2	2	5k6	R0805	rezistor
C4, C8, C22	3	100n	C0805K	keramický kondenzátor
C2, C3, C7, C9, C16, C17, C20, C24, C25	9	100n	C1206	keramický kondenzátor
C5, C10, C21	3	100u	E2,5-6	elektrolytické kondenzátor
C23	1	10n	C1206	keramický kondenzátor
C6	1	10u	E1,8-4	elektrolytické kondenzátor
C11, C12, C13, C14, C15, C18, C19	7	1u	C1206	keramický kondenzátor

seznam součástek řídicí jednotky- pokračování

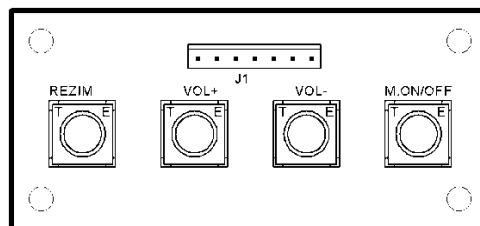
označení	počet	hodnota	pouzdro	popis
C1	1	47n	C1206	keramický kondenzátor
L1	1	220u	L0207/10	tlumivka
IC2	1	7805TV	TO220V	stabilizátor napětí 5V
IC4, IC5	2	AD8402	SO14	digitální potenciometr 50 kΩ
IC6	1	MEGA16-P	DIL40	mikroprocesor
IC1, IC3	2	NE5532D	SO08	bipolární OZ
LCD1	1		TUXGR_16X2_R2	LCD displej 16x2
D1	1	1N4148	DO-214AC	dioda
D2	1	4,7V/0,5W	DO35Z10	Zenerova dioda
JP1, JP2	2	2	pinová lišta	oboustranný kolík
DISP1, DISP3, DISP4	3	4	pinová lišta	oboustranný kolík
BASS, MUTE, STBY	3	2piny	MTA02-100	konektor se zámkem
+12V, +12VK	2	2piny	MTA02-156	konektor se zámkem
4*25W, AUX, J6, RADIO	4	3piny	MTA03-100	konektor se zámkem
J5	1	5pinů	MTA05-100	konektor se zámkem
PROG.VSTUP	1	6pinů	MTA06-100	konektor se zámkem
TLACITKA	1	7pinů	MTA07-100	konektor se zámkem

D.3 Osazovací plán a seznam součástek tlačítek

strana BOTTOM



strana TOP

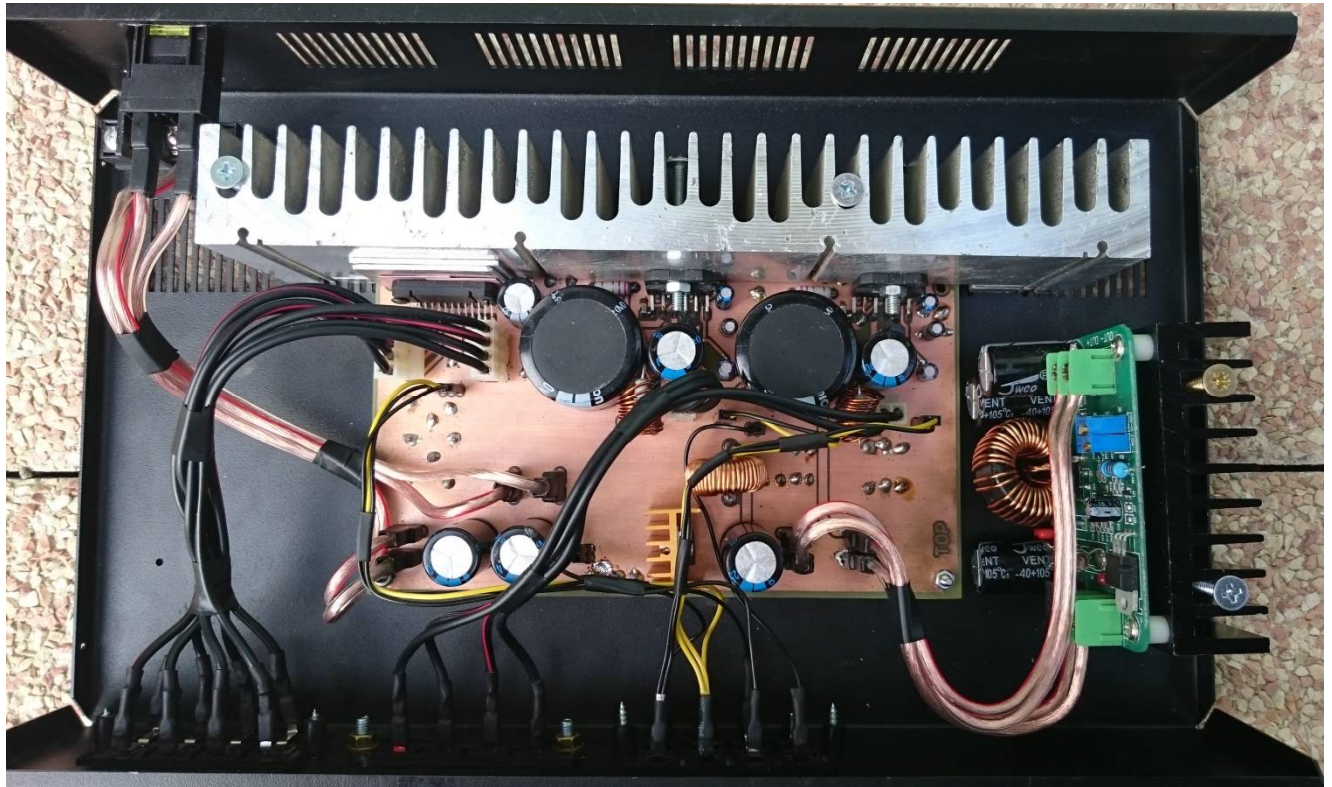


seznam součástek tlačítek

označení	počet	hodnota	pouzdro	popis
J1	1	7pinů	10X07MTA	KONPC
R1, R2, R3, R4	4	270	R1206	rezistor
M.ON/OFF, REZIM, VOL+, VOL-	4	-	-	tlačítkový spínač/podsvíceny

E FOTODOKUMENTACE

E.1 Přístrojová skříň výkonové jednotky



E.2 Přístrojová skříň řídicí jednotky

vnitřní část přístrojové skříně



přední panel

