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

AUDIO ZESILOVAČ 2.1 VE TŘÍDĚ D PRO LABORATORNÍ VÝUKU
CLASS D 2.1 AUDIO AMPLIFIER FOR LABORATORY MEASUREMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Klára Kolečková**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Studentka: Klára Kolečková ***ID:*** 164305
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Audio zesilovač 2.1 ve třídě D pro laboratorní výuku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce navrhněte blokovou a obvodovou strukturu integrovaného audio zesilovače v konfiguraci 2.1 ve třídě D, který by integroval vstupní analogové obvody, budič spínaných tranzistorů a koncový stupeň ve třídě D (výkon hlavních kanálů do cca 20 W / 4 nebo 8 ohmů) a frekvenční dělení signálu. Zadáním je požadován návrh audio zesilovače pro měření v laboratorní výuce předmětu Nízkofrekvenční a audio elektronika. Zvažte integraci stabilizátoru napětí pro napájení zesilovače. Při návrhu zohledněte nejmodernější součástkovou základnu.

V praktické části práce vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek, atd.). Navržený audio zesilovač realizujte formou funkčního prototypu a experimentálním měřením v laboratoři nízkofrekvenční elektroniky ověřte jeho činnost. Výsledky měření zpracujte formou standardního protokolu a vytvořte kompletní podklady pro laboratorní úlohu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WIRSUM, S. Abeceda nf techniky. Praha: BEN - technická literatura, 2003.

[2] ŠŤÁL, P. Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D. BEN - technická literatura, Praha, 2008.

Termín zadání: 8.2.2016 ***Termín odevzdání:*** 26.5.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, 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

Práce se zabývá návrhem zapojení a konstrukcí audio zesilovače ve třídě D s pulsně šířkovou modulací. Výsledné zapojení je tvořeno ochranou napájení, aktivní výhybkou a samotným koncovým zesilovacím stupněm. Zesilovač je vytvořen v konfiguraci 2.1, středovýškový zesilovač má výstupní výkon 2 × 30 W na zátěži 8 Ω, subwoofer 1 × 100 W na zátěži 2 Ω. Řídicím centrem celého zapojení je integrovaný obvod TPA3116D2 od firmy Texas Instruments. Výsledný audio zesilovač bude využit jako přípravek pro laboratorní měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Audio zesilovač, konfigurace 2.1, třída D, pulsně šířková modulace, PWM, laboratorní měření.

ABSTRACT

This semestral thesis deals with a draft and construction of the design of an class D audio amplifier with pulse width modulation. The resulting design consists of a supply protection, an active crossover and the output power stage itself. The amplifier is made in 2.1 configuration, the amplifier for mid/high audio frequency drives 2 × 30 W output into a 8 Ω load, subwoofer drives 1 × 100 W into a 2 Ω load. The control centre of the whole application is an integrated circuit TPA3116D2 by Texas Instruments company. The resulting audio amplifier will be used as a device for laboratory measurements.

KEYWORDS

Audio amplifier, 2.1 cofiguration, class D, pulse width modulation, PWM, laboratory measurements.

KOLEČKOVÁ, K. Audio zesilovač 2.1 ve třídě D pro laboratorní výuku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 48 s., 19 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Audio zesilovač 2.1 ve třídě D pro laboratorní výuku jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 semestrálního projektu jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma 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 doc. Ing. Tomáši Kratochvílovi, Ph.D. za odbornou pomoc při zpracování mé bakalářské práce.

Faculty of Electrical Engineering
and Communication

Brno University of Technology
Technicka 12, CZ-61600 Brno, Czech Republic

http://www.six.feec.vutbr.cz

Experimentální část této bakalářské práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072
Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Úvod **1**

1 ZESILOVAČ TŘÍDY D **2**

1.1 Vstupní obvody ... 2

1.2 Modulátor ... 3

1.3 Koncový stupeň ... 4

1.4 Výstupní filtr ... 4

2 NÁVRH AUDIO ZESILOVAČE **5**

2.1 Blokové schéma ... 5

2.2 Koncový zesilovací stupeň ... 6

2.2.1 Základní parametry koncového zesilovacího stupně ... 6

2.2.2 Výběr konkrétní varianty integrovaného obvodu ... 7

2.2.3 Funkce integrovaného obvodu ... 7

2.2.4 Ochrana koncového stupně ... 8

2.2.5 Mono konfigurace ... 9

2.2.6 Chlazení koncového stupně ... 10

2.2.7 Výstupní LC filtr ... 11

2.3 Aktivní výhybka ... 12

2.3.1 Popis funkce výhybky ... 12

2.3.2 Simulace výhybky ... 12

2.4 Napájení audio zesilovače ... 15

3 Měření audio zesilovače **16**

3.1 Měření výhybky ... 16

3.1.1 Měření pravého kanálu výhybky ... 16

3.1.2 Měření levého kanálu výhybky ... 19

3.1.3 Měření subwooferu ... 21

3.2 Měření laboratorního přípravku ... 24

3.3 Podklady pro laboratorní úlohu ... 36

Závěr **46**

Literatura **47**

Seznam symbolů, veličin a zkratek **48**

A Návrh AUDIO ZESILOVAČE **49**

A.1 Obvodové zapojení napájecí desky ... 49
A.2 Deska plošného spoje napájecí desky – bottom (strana spojů) ... 49
A.3 Osazovací plán napájecí desky ... 50
A.4 Obvodové zapojení výhybky ... 51
A.5 Deska plošného spoje výhybky – top (strana součástek) ... 52
A.6 Deska plošného spoje výhybky – bottom (strana spojů) ... 53
A.7 Osazovací plán výhybky ... 54
A.8 Obvodové zapojení středovýškových kanálů ... 55
A.9 Deska plošného spoje středovýškových kanálů – top (strana součástek) 56
A.10 Deska plošného spoje středovýškových kanálů – bottom (strana spojů) 57
A.11 Osazovací plán středovýškových kanálů ... 58
A.12 Obvodové zapojení subwooferu ... 59
A.13 Deska plošného spoje subwooferu – top (strana součástek) ... 60
A.14 Deska plošného spoje subwooferu – bottom (strana spojů) ... 60
A.15 Osazovací plán subwooferu ... 61

B Seznam součástek **62**
C Konstrukce audio zesilovače **66**

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Blokové schéma zesilovače třídy D s PWM modulátorem. 2
Obr. 1.2 Průběhy napětí na vstupech (nahoře) a na výstupu (dole) komparátoru. 3
Obr. 1.3. Zapojení do plného mostu (nahoře) a do poloviční mostu (dole)..... 4
Obr. 1.4. Blokové schéma audio zesilovače ve třídě D. 5
Obr. 2.5 Zapojení obvodu TPA3116D2 v mono zapojení. 9
Obr. 2.6 Chladič koncového stupně. 10
Obr. 2.7 Zapojení LC filtru na výstupu integrovaného obvodu TPA31xxD2. 11
Obr. 2.8 Zapojení pro simulaci pravého/levého kanálu výhybky. 12
Obr. 2.9 AC analýza pravého/levého kanálu výhybky. 13
Obr. 2.10 Zapojení pro simulaci kanálu pro subwoofer. 14
Obr. 2.11 AC analýza kanálu pro subwoofer. 14
Obr. 3.12 Měření modulové kmitočtové charakteristiky pravého kanálu výhybky. 17
Obr. 3.13 Měření modulové kmitočtové charakteristiky pravého kanálu výhybky v programu HOLMImpulse. 17
Obr. 3.14 Celkové harmonické zkreslení pravého kanálu výhybky. 18
Obr. 3.15 Šum pravého kanálu výhybky. 18
Obr. 3.16 Měření modulové kmitočtové charakteristiky levého kanálu výhybky. 19
Obr. 3.17 Měření modulové kmitočtové charakteristiky levého kanálu výhybky v programu HOLMImpulse. 19
Obr. 3.18 Celkové harmonické zkreslení levého kanálu výhybky. 20
Obr. 3.19 Šum levého kanálu výhybky. 20
Obr. 3.20 Měření modulové kmitočtové charakteristiky subwooferu. 21
Obr. 3.21 Měření modulové kmitočtové charakteristiky subwooferu v programu HOLMImpulse. 22
Obr. 3.22 Celkové harmonické zkreslení subwooferu. 22
Obr. 3.23 Šum kanálu pro subwoofer. 23

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Přehled nejdůležitějších parametrů integrovaného obvodu TPA31xxD2 6

ÚVOD

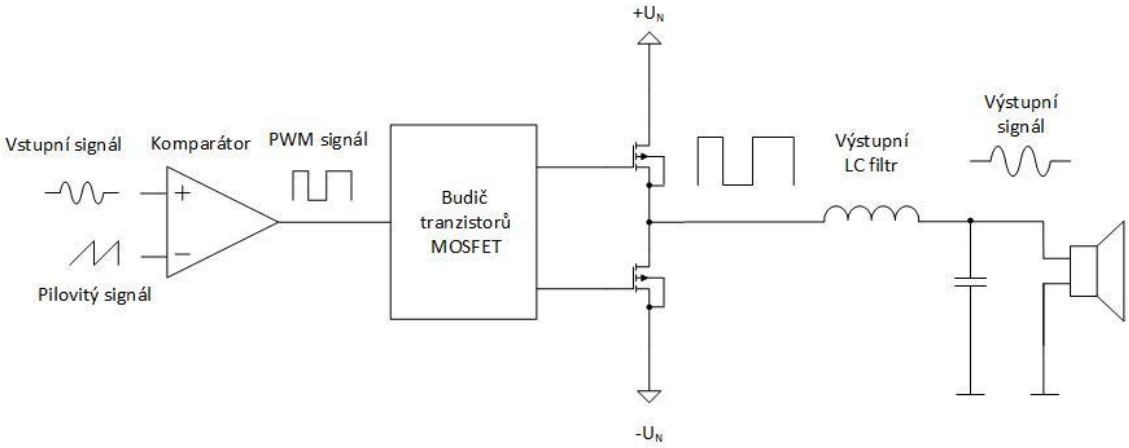
Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí audio zesilovače třídy D v konfiguraci 2.1. Výsledný zesilovač tedy má dva středovýškové kanály a jeden kanál pro subwoofer. Práce svým tématem spadá do oblasti nízkofrekvenční a audio techniky, proto také bude hotový zesilovač sloužit jako přípravek pro laboratorní měření v předmětu Nízkofrekvenční a audio elektronika, který garantuje Ústav radioelektroniky na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně.

Cílem bakalářské práce je návrh blokové a obvodové struktury integrovaného audio zesilovače ve třídě D, který by zajišťoval integraci vstupního analogového signálu, buzení spínaných tranzistorů a koncového výkonového stupně ve třídě D, jeho následná konstrukce a proměření parametrů. Velikost výstupního výkonu hlavních kanálů je požadována do přibližně 20 W na zátěži 4 Ω nebo 8 Ω. Bude zvážena potřeba implementace stabilizátoru napětí pro napájení zesilovače. Při návrhu zesilovače bude brán zřetel na nejmodernější součástkovou základnu. Pro účely laboratorního měření budou vytvořeny kompletní podklady pro laboratorní úlohu.

Bakalářská práce je rozdělena do tří hlavních kapitol. V první kapitole je v krátkosti popsána struktura obecného audio zesilovače ve třídě D a posléze jsou podrobněji zpracovány principy činnosti jeho jednotlivých bloků. Druhá kapitola se zabývá teoretickým návrhem konkrétního audio zesilovače ve třídě D dle požadavků zadání. Postup návrhu dodržuje logickou návaznost jednotlivých částí danou obecným blokovým schématem audio zesilovače ve třídě D popsaným v první kapitole. Druhá kapitola rovněž obsahuje návrh a simulaci výhybky a zabývá se také řešením napájení celého audio zesilovače. Třetí kapitola obsahuje výsledky měření hotového audio zesilovače i výhybky a kompletní podklady pro laboratorní úlohu.

1 ZESILOVAČ TŘÍDY D

Zesilovače třídy D se od všech ostatních tříd zesilovačů liší provozováním výstupních výkonových tranzistorů ve spínaném režimu, tedy v oblasti saturace. Díky tomu na nich vzniká minimální úbytek napětí, a tudíž vykazují minimální ztrátový výkon. Z tohoto důvodu mají zesilovače třídy D účinnost až 95 %, na rozdíl od dříve hojně používané pracovní třídy AB, jejíž teoretická účinnost činí pouze 50 %, reálná samozřejmě ještě méně. Nízký ztrátový výkon umožňuje vytvoření audio zesilovače bez rozměrově a hmotnostně náročných přídavných chladičů, což je u zesilovačů třídy AB nemyslitelné. Za zmínku stojí rovněž nižší harmonické zkreslení při stejné amplitudě signálu.



Obr. 1.1 Blokové schéma zesilovače třídy D s PWM modulátorem.

V praxi lze návrh zesilovače ve třídě D provést dvěma základními způsoby, a to pomocí diskrétních součástek, nebo pomocí integrovaného obvodu. Realizace s diskrétními součástkami je poměrně náročná, mimo jiné proto, že se autor musí striktně držet pravidel a principů elektromagnetické kompatibility. Návrh zesilovače ve třídě D se tedy výrazně zjednoduší při použití integrovaného obvodu, který spoustu problémů vyřeší za nás [1]. Tento postup bude také využit při návrhu zesilovače v této práci. Oba způsoby návrhu však vychází ze stejného principu fungování zesilovačů ve třídě D (blokové schéma viz obr. 1.1, převzato a upraveno z [2]).

1.1 Vstupní obvody

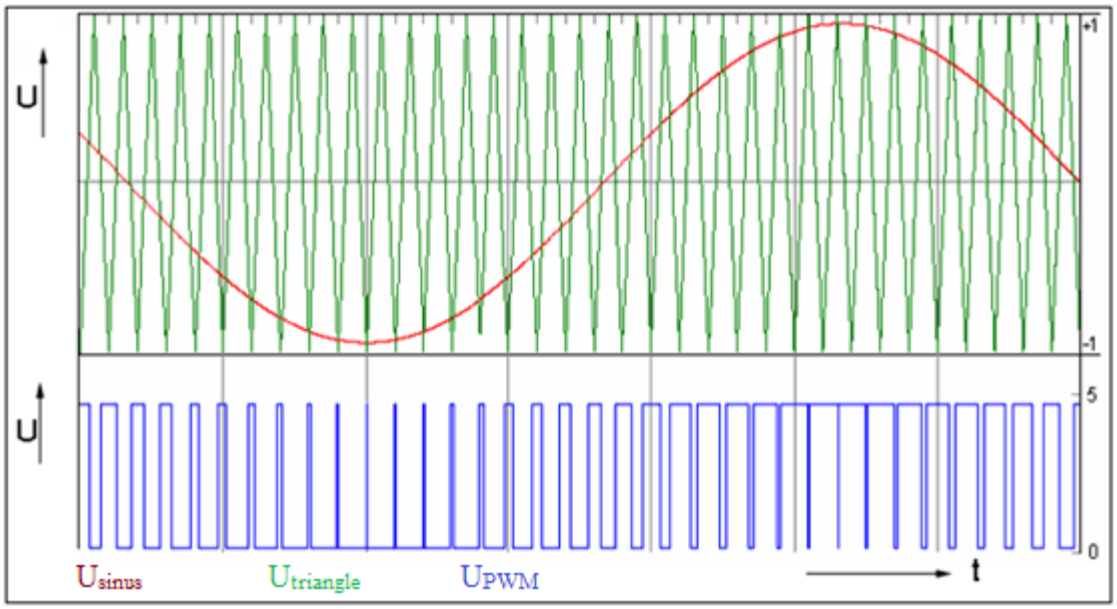
Zesilovače třídy D mohou mít dva typy vstupních obvodů, a to s analogovým vstupem, nebo digitálním. V případě analogového vstupu je blok tvořen analogovým předzesilovačem, jehož úkolem je pouze napěťové zesílení vstupního signálu a jeho impedanční přizpůsobení. Typ zesilovače s digitálním vstupem obsahuje ve vstupním

bloku číslicové obvody a celý zesilovač lze považovat za plně digitální [1]. V této práci bude navržen zesilovač s analogovým vstupem.

1.2 Modulátor

Nejdůležitější komponentou zesilovače ve třídě D je modulátor, který převádí vstupní signál na modulaci vhodnou pro spínání koncových tranzistorů. Tou může být například sigma-delta modulace nebo pulsně šířková modulace (PWM – Pulse Width Modulation), kterou bude využívat i zesilovač navržený v této práci.

Modulátor PWM je v blokovém schématu na obrázku 1 pro zjednodušení znázorněn komparátorem. Ten zpracovává (komparuje) vstupní signál s pilovitým nebo trojúhelníkovým signálem, jehož frekvence musí být řádově vyšší než největší frekvence vstupního napětí. Úroveň vstupního signálu je nejprve vyšší než úroveň pilovitého průběhu, a proto je na výstupu komparátoru logická nula. Do logické jedničky se překlopí v okamžiku, kdy je naopak úroveň pilovitého napětí vyšší než úroveň vstupního signálu. Na výstupu komparátoru je tím dosaženo pulsně šířkového modulovaného napětí (viz obr. 1.2, převzato z [1]), které spíná výstupní výkonové tranzistory (zpravidla typu MOSFET) [1].

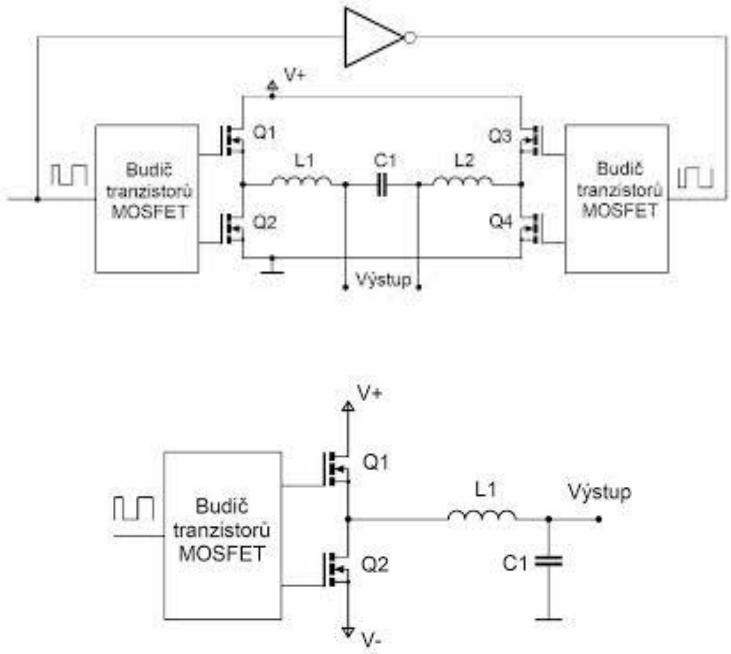


Obr. 1.2 Průběhy napětí na vstupech (nahoře) a na výstupu (dole) komparátoru.

1.3 Koncový stupeň

Výkonový koncový stupeň lze zapojit do tzv. polovičního mostu, nebo do tzv. plného mostu (viz obr. 1.3, převzato z [3]). Při výběru koncových tranzistorů je lépe sáhnout po tranzistorech MOSFET s indukovaným kanálem typu N, které mají pro tyto účely lepší vlastnosti díky větší pohyblivosti elektronů než děr.

Při zapojení do polovičního mostu je potřeba vyvarovat se současného sepnutí obou tranzistorů, důsledkem by byl zkrat napájecího napětí. Řešením tohoto nežádoucího jevu je tzv. dead time, časová prodleva, během níž není sepnut ani jeden z tranzistorů. Podobně je třeba zajistit, aby nedošlo k dlouhodobému sepnutí některého z tranzistorů, jelikož by mohlo dojít ke zničení připojeného reproduktoru vlivem výstupní stejnosměrné složky [1].



Obr. 1.3. Zapojení do plného mostu (nahoře) a do polovičního mostu (dole).

1.4 Výstupní filtr

Zesilovač třídy D je ve většině případů na výstupu opatřen pasivním LC filtrem typu dolní propust druhého řádu. Ten je implementován především pro potlačení nežádoucích vysokofrekvenčních spektrálních složek na výstupu zesilovače [2]. Pasivní LC filtry jsou rozměrově a hmotnostně výrazně větší než integrovaný obvod použitý pro realizaci samotného koncového stupně. Z tohoto důvodu výrobci již několik let nabízejí také tzv. filterless zesilovače, u kterých externí výstupní filtr není potřebný. Pak je ale nutné, aby byl reproduktor připojen co možná nejblíže k zesilovači a v případě potřeby provést jejich propojení stíněnými kabely [1].

2 NÁVRH AUDIO ZESILOVAČE

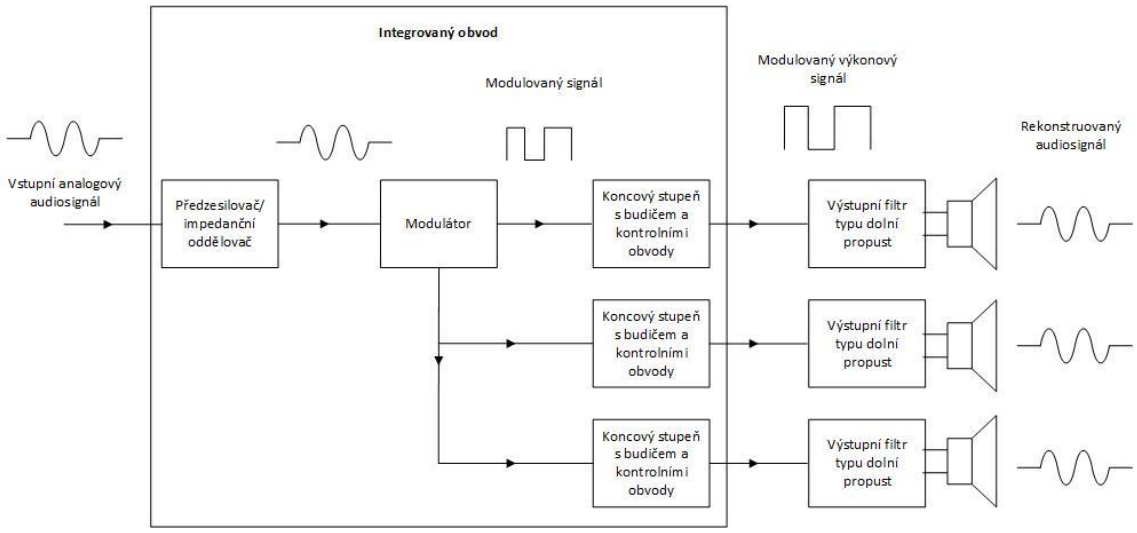
2.1 Blokové schéma

V praxi se často setkáme s implementací celého výkonového audio zesilovače ve třídě D do jediného integrovaného obvodu, na výstup je nutné doplnit pouze LC filtr typu dolní propust. Integrovaný obvod TPA3116D2 od firmy Texas Instruments použitý v této práci je jedním z nich. Stručný popis jednotlivých částí blokového schématu (viz obr. 1.4, převzato a upraveno z [2]) je následující.

V prvním bloku, předzesilovači, se vstupní analogový signál zesílí na požadovanou hodnotu. Tento blok také zajišťuje impedanční oddělení výkonového audio zesilovače od zdroje audiosignálu.

Modulátor převede vstupní analogový signál na takovou modulaci, která je použitelná pro řízení výkonových spínačů (v tomto případě na pulsně šířkovou modulaci).

V bloku koncového stupně je zesílen modulovaný signál z výstupu modulátoru. V tomto bloku jsou také implementovány obvody zabraňující výkonovému a teplotnímu přetížení koncových spínacích tranzistorů (kontrolní obvody). Z výstupních svorek integrovaného obvodu audio zesilovače je dále signál veden skrze blok výstupního LC filtru typu dolní propust. Ten zde slouží jako ochrana proti průniku nežádoucích rušivých vysokofrekvenčních složek signálu do okolí zesilovače [2]. Lze si povšimnout, že toto blokové schéma odpovídá obecné struktuře audio zesilovače ve třídě D, popsané v kapitole 1.



Obr. 1.4. Blokové schéma audio zesilovače ve třídě D.

2.2 Koncový zesilovací stupeň

Jak již bylo zmíněno výše, tato práce se zabývá návrhem audio zesilovače ve třídě D pomocí integrovaného obvodu. Ten je u návrhu tohoto typu klíčový, proto musí být jeho výběru věnována patřičná pozornost. V této práci bude použit integrovaný obvod TPA3116D2 od firmy Texas Instruments.

2.2.1 Základní parametry koncového zesilovacího stupně

V zájmu větší přehlednosti a koherence celého návrhu bude integrovaný obvod TPA3116D2 implementován jak pro zesilování středovýškové sekce ve stereo zapojení, tak pro subwoofer v mono konfiguraci. Tento čip je vyráběn ve třech variantách, a to 2 × 50 W do 4 Ω zátěže nebo 1 × 100 W do 2 Ω zátěže (označení integrovaného obvodu TPA3116D2), 2 × 30 W do 8 Ω zátěže (označení TPA3118D2) a 2 × 15 W do 8 Ω zátěže (označení TPA3130D2).

Všechny vyjmenované integrované obvody mají shodná 32-pinová pouzdra DAP HTSSOP (Pad Down), TPA3116D2 je nabízen i ve variantě DAD HTSSOP (Pad Up). Rozměry pouzdra jsou 11 × 6,2 mm [4]. Pro přehled nejdůležitějších parametrů zmíněných integrovaných obvodů viz tabulku 1 [4].

Tabulka 1 Přehled nejdůležitějších parametrů integrovaného obvodu TPA31xxD2

Parametr		**Hodnota**	**Jednotka**
P_{OUT} ze dvou kanálů	TPA3116D2, R_L = 4Ω, U_{CC} = 21 V TPA3118D2, R_L = 8Ω, U_{CC} = 24V TPA3130D2, R_L = 8Ω, U_{CC} = 15V	50 30 15	W
η	účinnost	> 90	%
THD+N	P_{OUT}, f = 1 kHz, U_{CC} = 21V P_{OUT}/2, f = 1 kHz, U_{CC} = 21V	10 0,1	%
přeslech	U_{OUT} = 1 V U_{ef}, zisk = 20 dB, f = 1 kHz	-100	dB
SNR	Signal-to-Noise-Ratio, poměr signálu k šumu	102	dB
rozsah pracovních teplot		-40 - 85	°C
f_{PWM}	výstupní frekvence PWM modulátoru	400 - 1200	kHz

2.2.2 Výběr konkrétní varianty integrovaného obvodu

Na základě parametrů z tabulky 1 byl proveden výběr konkrétních konfigurací daného integrovaného obvodu. Pro středovýškové satelity bude použita varianta čipu TPA3118D2, jehož výstupní výkon může být až 30 W na kanál, ovšem za cenu desetiprocentního celkového harmonického zkreslení. Proto bude tento integrovaný obvod použit pouze pro dosažení poloviny jeho maximálního výstupního výkonu (tedy cca 15 W dle požadavku zadání) a celkové harmonické zkreslení bude pouze 0,1 %, což je mnohem příznivější hodnota.

Pro subwoofer bude použita varianta TPA3116D2, avšak v mono konfiguraci. Na zátěži 2 Ω by tedy teoretická hodnota výstupního výkonu dosahovala až 100 W, ovšem pro účely laboratorních měření je takový výkon zbytečně vysoký a nebude se do takovýchto mezních hodnot využívat, proto ani jeho celkové harmonické zkreslení v praxi nikdy nedosáhne 10 %.

2.2.3 Funkce integrovaného obvodu

Integrovaný obvod TPA31xxD2 je audio zesilovač třídy D s vysokou účinností a implementovanými tranzistory MOSFET, které umožňují výstupní proud až 7,5 A. Zařízení může být využito jako master nebo slave podle zapojení pinu SYNC [4]. Zjednodušené funkční blokové schéma obvodu TPA31xxD2 je na obrázku 2.2 (převzato a upraveno z [4]).

Zisk integrovaného obvodu se nastavuje napěťovým děličem připojeným k pinu GAIN/SLV. Režim master/slave je rovněž řízen tímto pinem. Vnitřní AD převodník je schopen detekovat osm různých stavů na vstupu. První čtyři nastavují GAIN do módu master se ziskem 20, 26, 32 nebo 36 dB, zbylé čtyři stavy nastavují GAIN do módu slave rovněž se stejnými zisky jako v prvním případě. Nastavení zisku proběhne při zapnutí a nemůže být měněno v průběhu fungování zařízení.

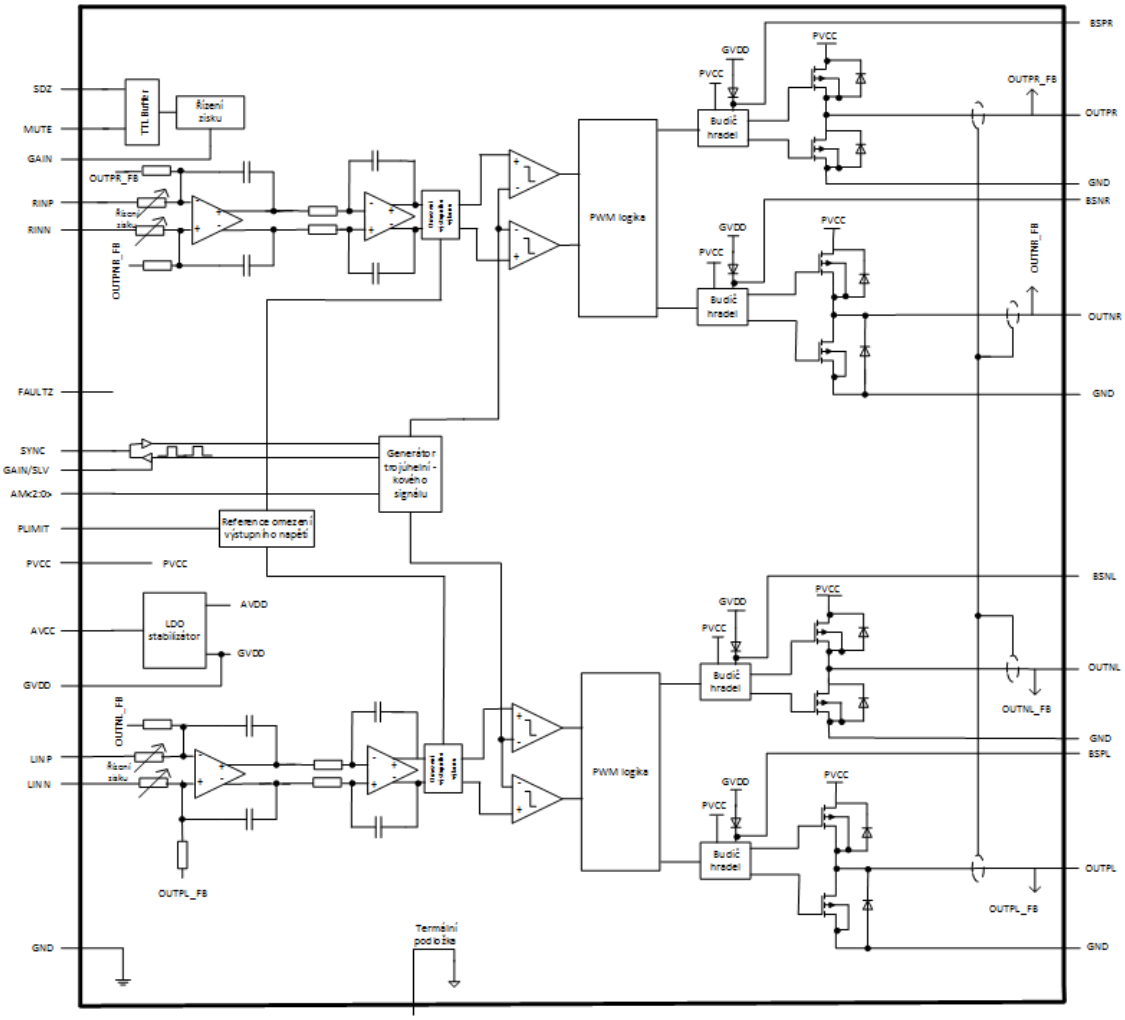
Podle nastavení zisku se mění vstupní impedance obvodu od 9 kΩ pro 36 dB zisku po 60 kΩ pro 20 dB zisku. Diferenční vstupy obvodu musí obsahovat kondenzátory pro střídavou vazbu, aby se potlačila stejnosměrná složka na výstupu. Vstupní vazební kapacita spolu se vstupní impedancí tvoří filtr typu horní propust s mezní frekvencí danou následujícím vztahem [4]:

$$f = \frac{1}{2\pi C_{in} Z_{in}} \tag{2.1}$$

Zesilovač navrhnutý v této práci má zisk 26 dB, jeho vstupní impedance Z_{in} bude tedy 30 kΩ a tomu odpovídající vstupní kapacita C_{in} je podle katalogového listu 3,3 µF [4]. Mezní frekvence filtru tedy bude:

$$f = \frac{1}{2\pi C_{in} Z_{in}} = \frac{1}{2\pi \cdot 3{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 10^{3}} = 1{,}6 \text{ Hz}$$

Vstupní kapacitor by měl být kvalitní, s nízkými ztrátami, elektrolytický, tantalový nebo keramický [4].



Obr. 2.2 Funkční blokové schéma integrovaného obvodu TPA31xxD2.

2.2.4 Ochrana koncového stupně

Integrovaný obvod TPA31xxD2 je vybaven několika ochrannými obvody, které mají ochránit čip proti jakémukoliv trvalému poškození. Všechny chybové signály zaznamenává pin FAULTZ. Jako opatření proti poškození nastaví v případě detekce některé z chyb výstup do stavu vysoké impedance.

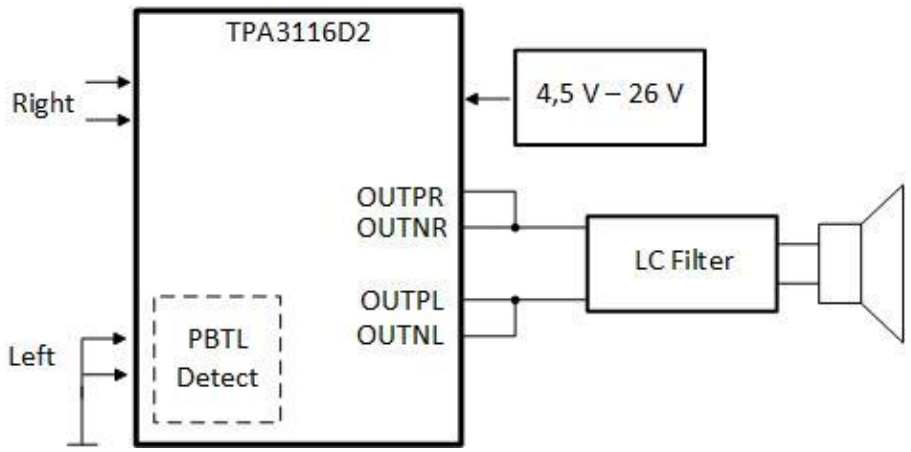
Chybovým stavem je příliš vysoký proud protékající obvodem, který vzniká vlivem zkratu výstupu nebo zkratem vůči napájení či zemi. Ochrana proti přehřátí se aktivuje

při vnitřní teplotě čipu nad 150 °C. Chybou je rovněž zaznamenání příliš vysoké stejnosměrné složky signálu na výstupu. Přepětí je detekováno při napájecím napětí nad 27 V a naopak nedostačující napájení je definováno jako nižší než 4,5 V [4].

2.2.5 Mono konfigurace

Integrovaný obvod TPA3116D2 je primárně koncipován jako stereo audio zesilovač, avšak jak již bylo zmíněno výše, v obvodovém návrhu bude pro subwoofer použito mono zapojení, čímž se původní výstupní výkon 2 × 50 W na 4 Ω zátěži změní na výkon 1 × 100 W na 2 Ω zátěži. Katalogový list má pro tuto variantu zapojení následující doporučení.

Piny INPL a INNL (vstupní signálové piny levého kanálu) jsou připojeny přímo k zemi, bez propojení s kondenzátory. Toto zapojení zajistí mono režim při zapnutí zařízení. Dále se piny OUTPR a OUTNR (výstupní signálové piny pravého kanálu) spojí dohromady a přivedou na kladný vstup reproduktoru, piny OUTNL a OUTPL (výstupní signálové piny levého kanálu) se rovněž propojí a přivedou na záporný vstup reproduktoru. Analogový vstupní signál se přivádí piny INPR a INNR (vstupní signálové piny pravého kanálu) [4]. Pro zjednodušené zapojení zesilovače v mono konfiguraci viz obrázek 2.5 (převzato a upraveno z [4]).

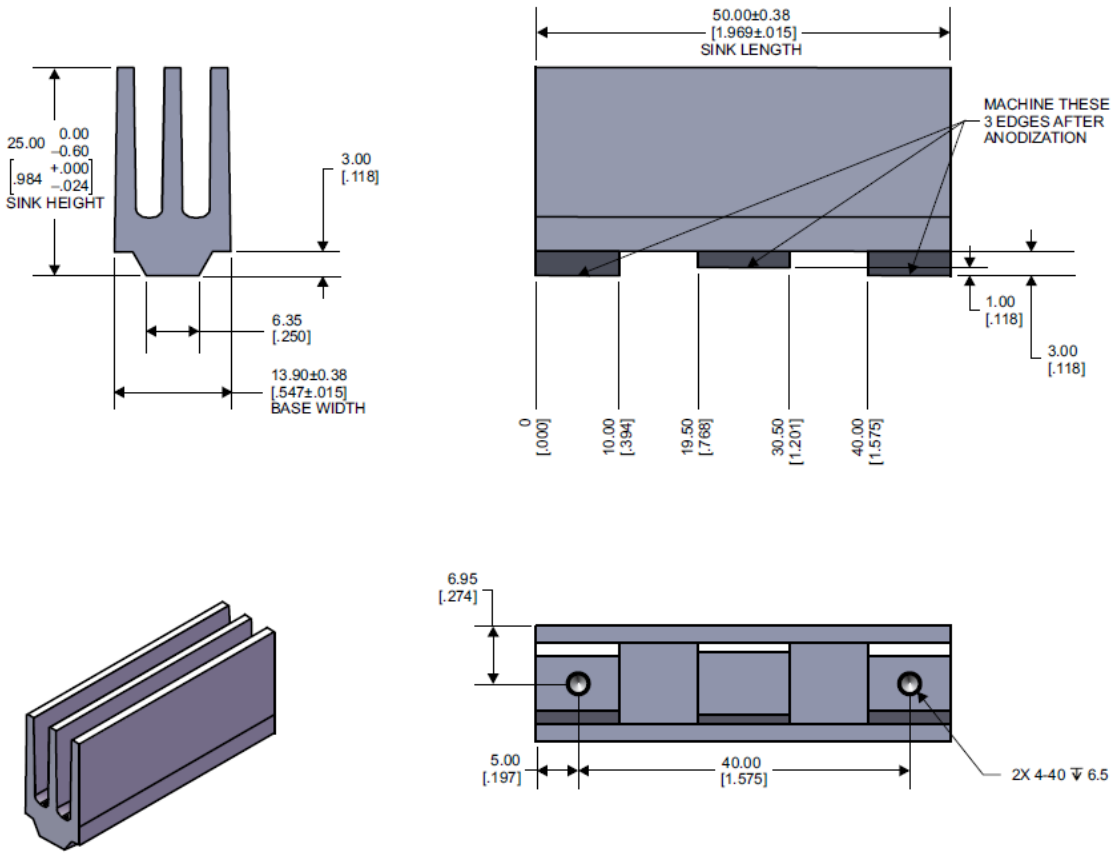


Obr. 2.5 Zapojení obvodu TPA3116D2 v mono zapojení.

2.2.6 Chlazení koncového stupně

Podle údajů katalogového listu lze integrovaný obvod TPA3118D2, jehož výstupní výkon je 2 × 30 W na zátěži 8 Ω a který je v práci použit pro zesilování středovýškových frekvencí, implementovat do zapojení bez přídavného chladiče. Zda tomu tak skutečně je, ukáže až praxe.

Varianta integrovaného obvodu TPA3116D2 však již přídavný chladič vyžaduje. Tento čip je v práci použit jako subwoofer, jeho výstupní výkon činí 1 × 100 W na zátěži 2 Ω. V katalogovém listu je pro tuto variantu integrovaného obvodu doporučen chladič s označením ATS-TI 10 OP-521-C1-R1. Jedná se o hliníkový chladič s rozměry 14 × 25 × 50 mm (viz obr. 2.6, převzato z [4]). Výrobce uvádí, že tento chladič se ukázal být dostatečným i při dlouhodobém zatížení. Pokud je během používání tohoto integrovaného obvodu zajištěna přirozená cirkulace vzduchu v jeho okolí, je možné použít dokonce ještě menší typ chladiče [4].



Obr. 2.6 Chladič koncového stupně.

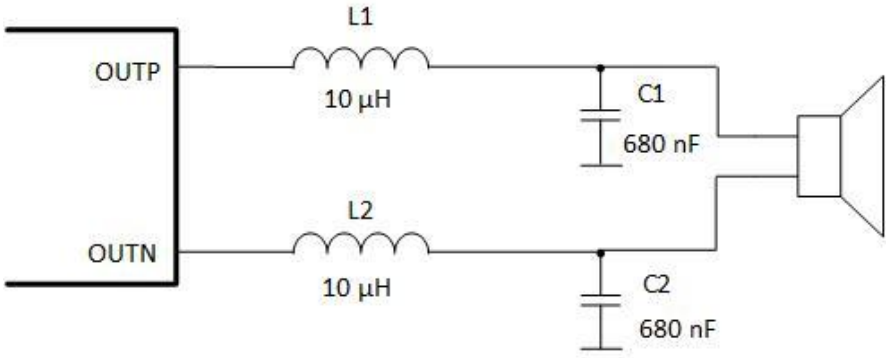
2.2.7 Výstupní LC filtr

Motivací pro implementaci LC filtru typu dolní propust na výstup audio zesilovače pracujícího ve třídě D je převážně potlačení nežádoucích vysokofrekvenčních spektrálních složek na výstupu zesilovače [2].

Dalším důvodem, proč zesilovače s PWM modulací pracující ve třídě D potřebují výstupní filtr je ten, že proměnný charakter pulsně šířkového modulovaného signálu má za následek vysoké hodnoty proudu. Ty způsobují větší ztráty na zátěži a zároveň tím snižují účinnost.

Režim modulace integrovaného obvodu TPA3116D2 má bez přítomnosti filtru malé ztráty na zátěži, protože pulzy jsou krátké a změny napětí jsou pouze v rozsahu napájecího napětí, ne jeho dvojnásobku. Jak výstupní výkon roste, pulzy jsou širší a střídavý proud se zvětšuje. Tento proud by mohl být vyfiltrován LC filtrem, čímž by se zvýšila účinnost, avšak pro většinu aplikací není filtr nutný.

LC filtr s mezní frekvencí nižší než je spínací frekvence umožňuje spínacímu proudu téci skrz filtr místo skrze zátěž. Na spínací frekvenci má filtr nižší odpor, ale vyšší impedanci než reproduktor, což má za následek nižší výkonové ztráty, a tudíž i vyšší účinnost. [4] Pro zapojení LC filtru k výstupu integrovaného obvodu TPA31xxD2 viz obrázek 2.7 (převzato a upraveno z [4]).



Obr. 2.7 Zapojení LC filtru na výstupu integrovaného obvodu TPA31xxD2.

Základními požadavky na cívku ve výstupním LC filtru jsou nezávislost indukčnosti na proudu protékajícím obvodem, co nejnižší kmitočtová závislost indukčnosti, schopnost akumulace požadovaného objemu energie, co nejnižší ztráty na pracovním kmitočtu, linearita magnetovací křivky a malé rozměry [2].

Pro kapacitu ve výstupním LC filtru je ideální použít velmi kvalitní keramický kondenzátor s nízkou hodnotou *ESR* a příznivou napěťovou a teplotní charakteristikou [4].

Zesilovač navržený v této práci má zapojen výstupní LC filtr dle obrázku 8. Za ním má ještě implementován obvod tlumící elektromagnetické rušení složený z kondenzátorů hodnot 1nF a 10 nF a z odporů hodnoty 3,3 Ω.

2.3 Aktivní výhybka

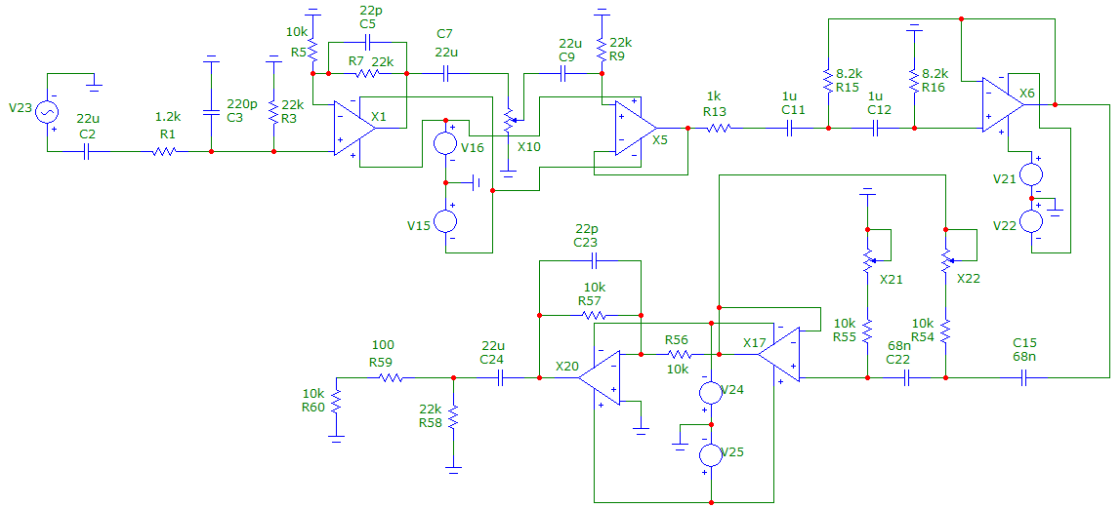
2.3.1 Popis funkce výhybky

Zapojení aktivní výhybky (převzato a upraveno z [5]) má symetrické napájecí napětí +/-12 V. Obsahuje dva typy přeladitelných filtrů. Filtry typu horní propust jsou dva, pro každý kanál jeden. Filtr typu dolní propust je jeden a před ním je slučovač kanálů, tudíž jsou signály z pravého a levého kanálu sloučeny do jednoho signálu. Přeladitelnost filtrů je v rozsahu od 30 do 300 Hz a jejich strmost 12 dB/oktávu. V subbasové části se nachází obvod, kterým je možné otočit výstupní fázi o 180°. Vstupní impedance výhybky je cca 22 kΩ, výstupní impedance 100 Ω [5].

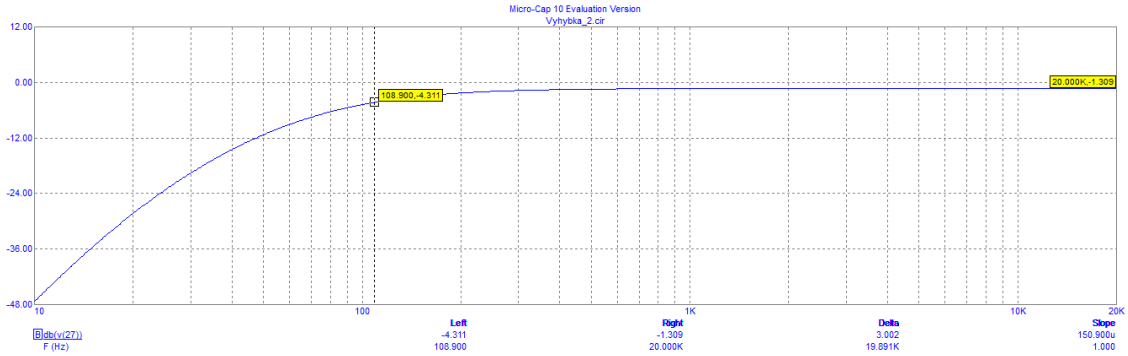
2.3.2 Simulace výhybky

Pro ověření správné funkce výhybky před jejím vlastním zhotovením byla funkčnost zapojení předem ověřena v programu Micro-Cap 10 Evaluation pro každý kanál zvlášť.

Z výsledku simulace pravého/levého kanálu (zapojení pro simulaci viz obr. 2.8, výsledek AC analýzy viz obr. 2.9) je patrné, že tyto kanály mají charakter horní propusti s mezní frekvencí cca 109 Hz.



Obr. 2.8 Zapojení pro simulaci pravého/levého kanálu výhybky.



Obr. 2.9 AC analýza pravého/levého kanálu výhybky.

Hodnotu odečtenou ze simulace je možné získat i teoretickým výpočtem. Mezní frekvence se spočítá podle vzorce [6]

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} \tag{2.2}$$

Velikost odporu *R* odpovídá sériové kombinaci rezistoru o velikosti 10 kΩ (ve schématu z obrázku 2.8 odpor R54) a hodnotě nastavené na potenciometru X18. Dohromady velikost odporu *R* odpovídá hodnotě 35 kΩ. Hodnota *C* odpovídá v obrázku 2.8 kapacitoru C22, její velikost tedy činí 68 nF. Po dosazení vychází teoretická hodnota mezní frekvence

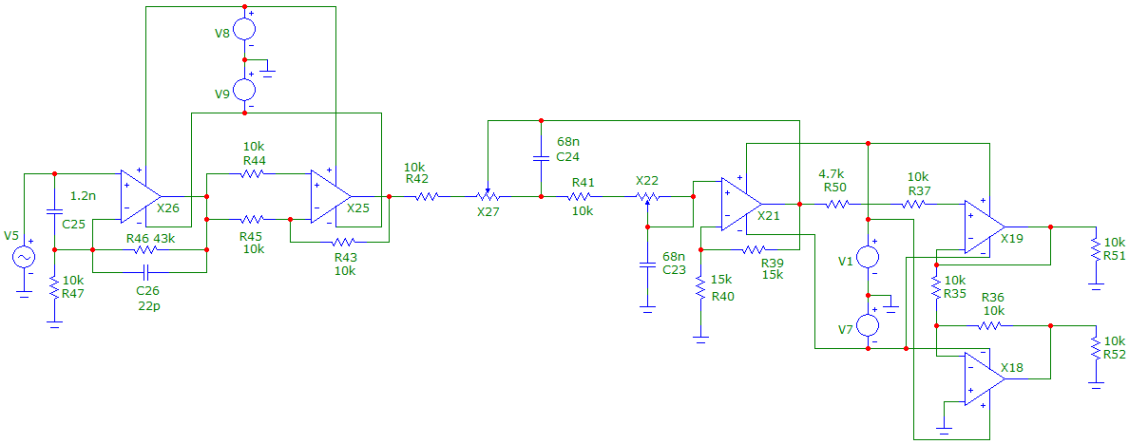
$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 35 \cdot 10^3 \cdot 68 \cdot 10^{-9}} = 66{,}87 \text{ Hz}$$

Výsledek AC analýzy kanálu pro subwoofer (schéma zapojení viz obr. 2.10, výsledek simulace viz obr. 2.11) ukázal, že tento kanál má charakter dolní propusti s mezní frekvencí přibližně 106 Hz.

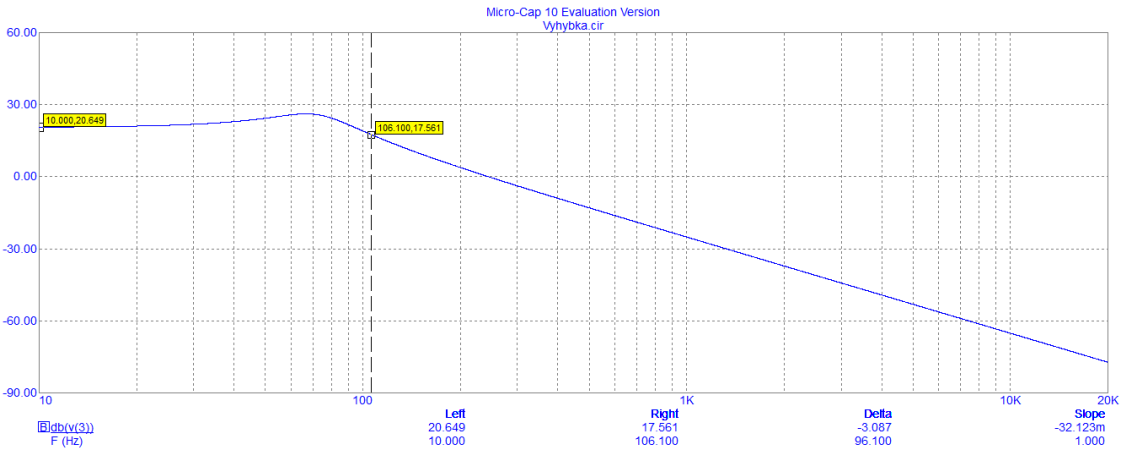
Tuto hodnotu lze opět ověřit teoretickým výpočtem pomocí vztahu 2.2. Velikost odporu *R* bude v tomto případě odpovídat součtu odporu R41 o hodnotě 10 kΩ a hodnotě nastavené pomocí potenciometru X22 v obrázku 2.10. Dohromady tato hodnota činí 17,5 kΩ. Velikost *C* odpovídá kondenzátoru C23, tedy hodnotě 68 nF. Po dosazení vychází hodnota

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 17{,}5 \cdot 10^3 \cdot 68 \cdot 10^{-9}} = 133{,}74 \text{ Hz}$$

Je patrné, že hodnoty mezní frekvence ze simulace a z teoretického výpočtu se poměrně značně liší, a to zřejmě z důvodu vysoké tolerance kondenzátorů. Dá se předpokládat, že reálné chování výhybky bude odpovídat spíše simulovaným hodnotám, to však ukáže až praxe.



Obr. 2.10 Zapojení pro simulaci kanálu pro subwoofer.



Obr. 2.11 AC analýza kanálu pro subwoofer.

2.4 Napájení audio zesilovače

Napájení navrhovaného audio zesilovače ve třídě D bude realizováno z laboratorního zdroje. Pro přípravek bude použito symetrické napájení +/-24 V.

Napájecí napětí koncového zesilovače je dáno napětím potřebným pro správnou funkci středovýškových kanálů, podle katalogového listu integrovaného obvodu TPA3118D2 činí toto napětí 24 V [4]. Koncový stupeň tedy bude připojen na kladnou část napájecího napětí laboratorního zdroje.

Výhybka vyžaduje pro svou činnost symetrické napájení +/-12 V. Kladná část napětí z laboratorního zdroje tedy bude snížena lineárním stabilizátorem (klasickým LM7812) z 24 V na 12 V a podobně i záporná část napájecího napětí bude lineárním stabilizátorem LM7912 omezena z hodnoty -24 V na -12 V.

Ochrana proti přepětí bude řešena v hlavní napájecí větvi tavnými pojistkami umístěnými v pojistkovém pouzdře na vnější straně přípravku pro jejich snadnou výměnu. Přepěťovou ochranu dále představují transily pro obě polarity napájecího napětí. Tímto opatřením bude zároveň zajištěna ochrana přípravku proti přepólování.

3 MĚŘENÍ AUDIO ZESILOVAČE

3.1 Měření výhybky

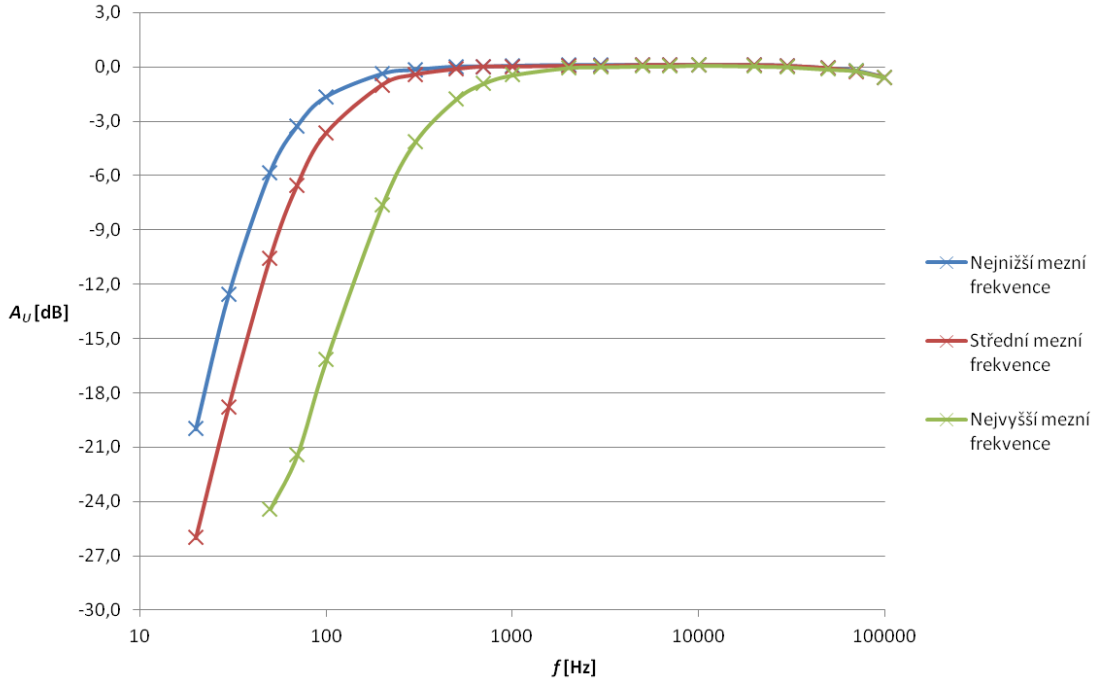
Ověření správnosti zapojení a funkce výhybky a proměření jejích parametrů bylo provedeno dvěma způsoby.

První metodou bylo klasické měření pomocí přístrojů v laboratoři nízkofrekvenční techniky. Pro měření byl použit laboratorní napájecí zdroj Diametral HC-D230-4G, generátor Agilent 33220A, čtyřkanálový osciloskop Tektronix TDS 2014 a nízkofrekvenční milivoltmetr MV 100 Grundig digimess. Byla proměřena modulová kmitočtová charakteristika všech tří kanálů výhybky, a to vždy pro tři různé mezní kmitočty (potenciometr měnící mezní frekvenci jednotlivých filtrů byl tedy vždy nastaven nejprve do nejnižší krajní polohy, poté do střední a nakonec do nejvyšší krajní polohy).

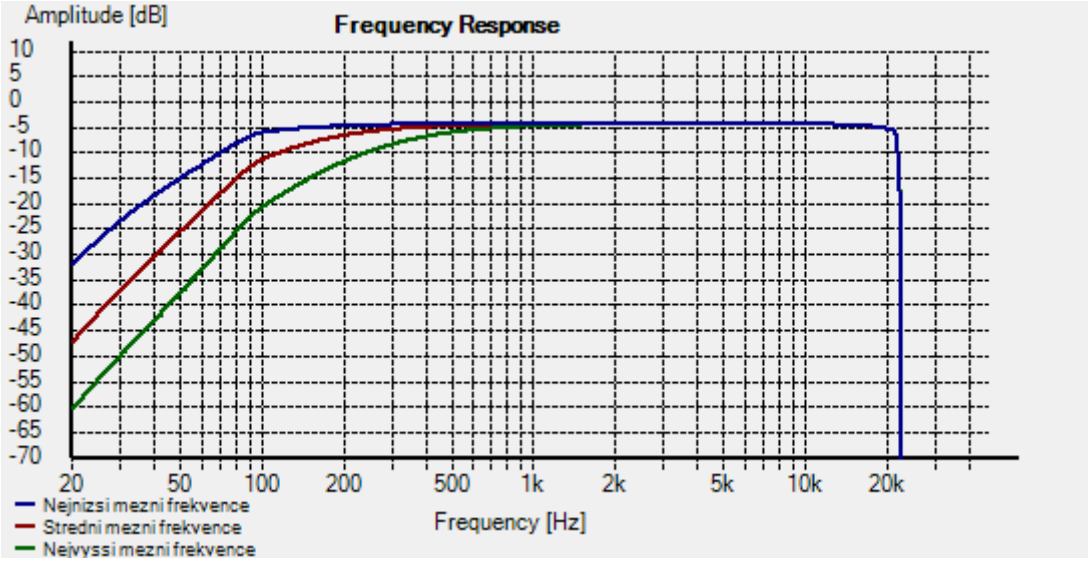
Druhá, přesnější metoda měření spočívala v propojení výhybky s počítačem pomocí zvukové karty Lexicon ALPHA. Vykreslení požadovaných charakteristik zajistil program HOLMImpulse, který je na Internetu volně ke stažení. Pomocí tohoto programu byly rovněž změřeny modulové kmitočtové charakteristiky všech kanálů výhybky, a to opět pro tři různé mezní kmitočty, stejně jako u předchozího způsobu měření. V tomto programu bylo měření provedeno pouze v automaticky nastaveném akustickém pásmu 20 Hz – 20 kHz, ačkoliv měření pomocí klasických přístrojů ukázalo, že výhybka přenáší i kmitočty do 100 kHz. Tento program dále umožnil změření celkového harmonického zkreslení (parametr *THD*) a šumu jednotlivých kanálů.

3.1.1 Měření pravého kanálu výhybky

Na generátoru bylo nastaveno vstupní napětí 200 mV a úroveň výstupního signálu nastavena tak, aby byl na frekvenci 1 kHz jednotkový přenos. Měření bylo provedeno v kmitočtovém pásmu 20 Hz - 100 000 kHz. Pro modulovou kmitočtovou charakteristiku změřenou v laboratoři viz obr. 3.12. Pro modulovou kmitočtovou charakteristiku změřenou pomocí programu HOLMImpulse viz obr. 3.13.

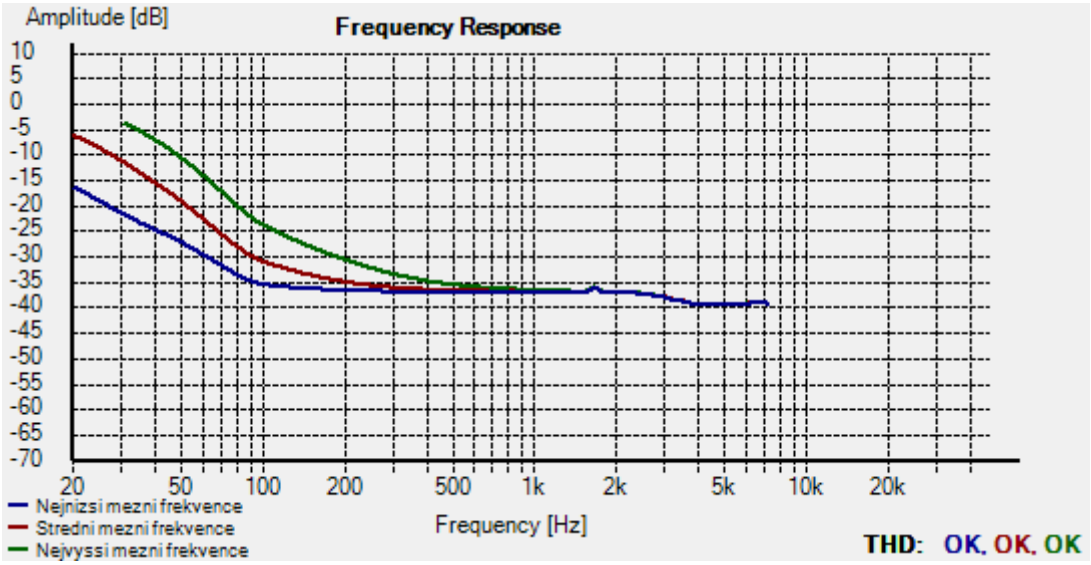


Obr. 3.12 Měření modulové kmitočtové charakteristiky pravého kanálu výhybky.

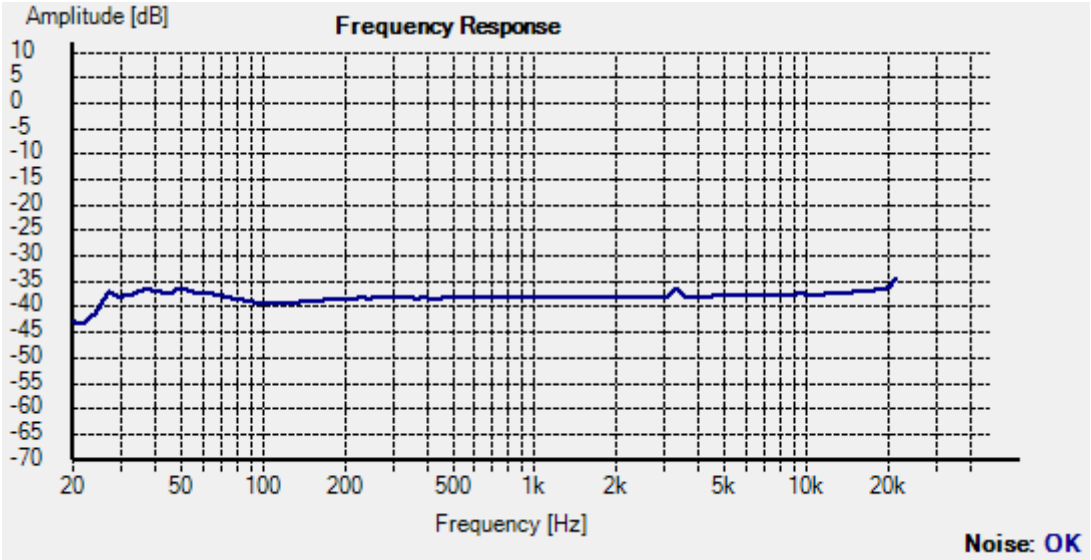


Obr. 3.13 Měření modulové kmitočtové charakteristiky pravého kanálu výhybky v programu HOLMImpulse.

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, program HOLMImpulse umožňuje také měření celkového harmonického zkreslení *THD* a šumu. Charakteristiky těchto parametrů viz obrázky 3.14 a 3.15. Měření šumu bylo pravděpodobně ovlivněno šumem samotné zvukové karty, dá se tedy předpokládat, že skutečná úroveň šumu výhybky je ještě nižší.



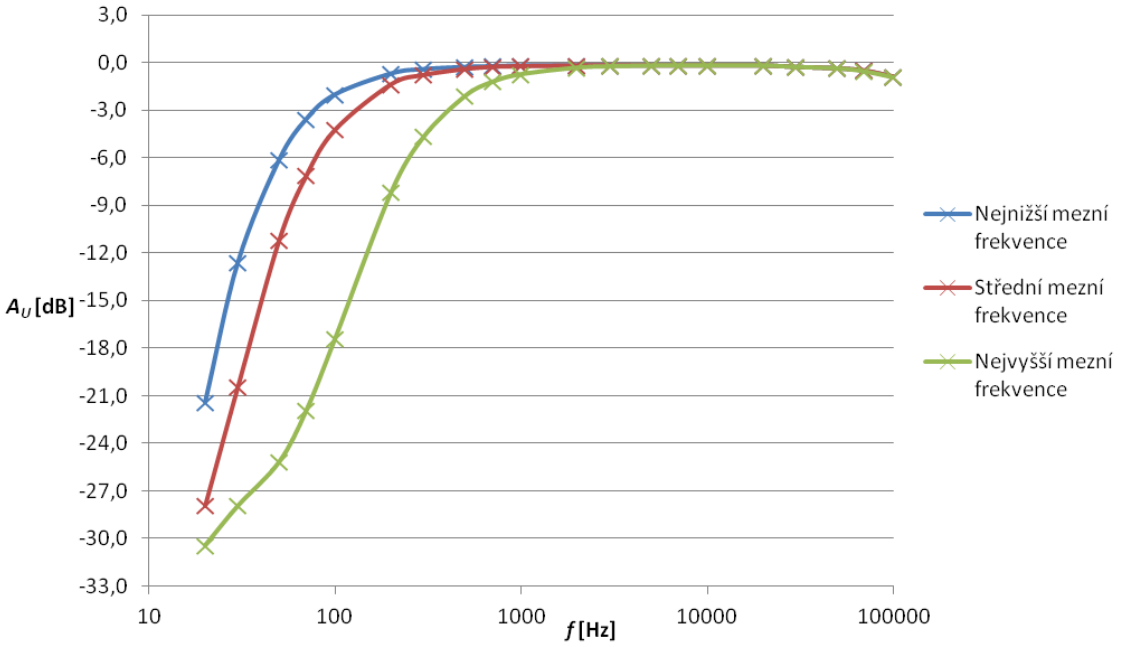
Obr. 3.14 Celkové harmonické zkreslení pravého kanálu výhybky.



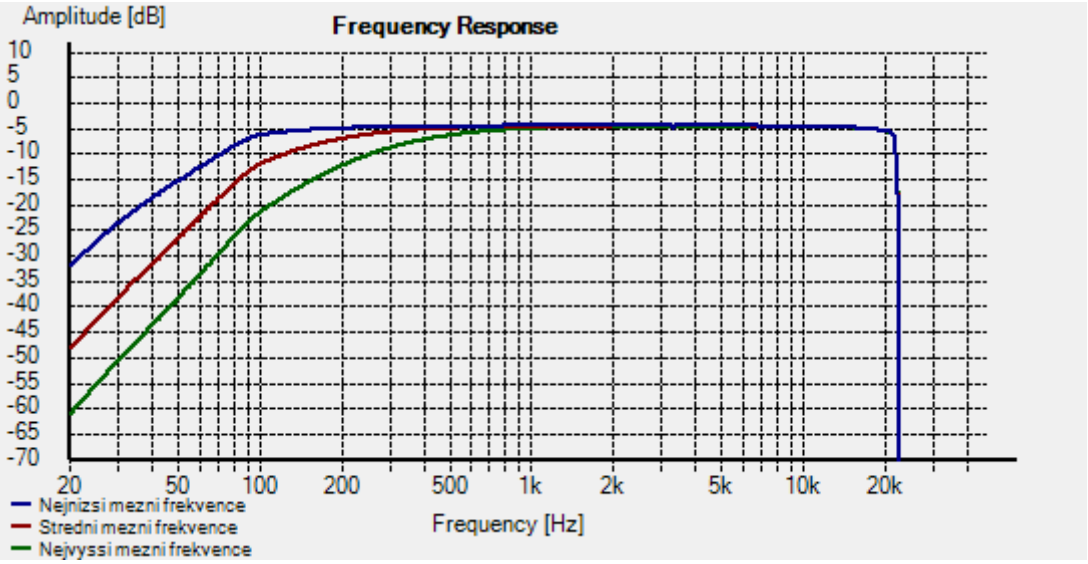
Obr. 3.15 Šum pravého kanálu výhybky.

3.1.2 Měření levého kanálu výhybky

Na generátoru bylo opět nastaveno vstupní napětí o velikosti 200 mV a zesílení zvoleno takové, aby na frekvenci 1 kHz byl jednotkový přenos. Pro výsledek měření modulové kmitočtové charakteristiky viz obrázek 3.16. Pro výsledek měření pomocí programu HOLMImpulse viz obrázek 3.17.

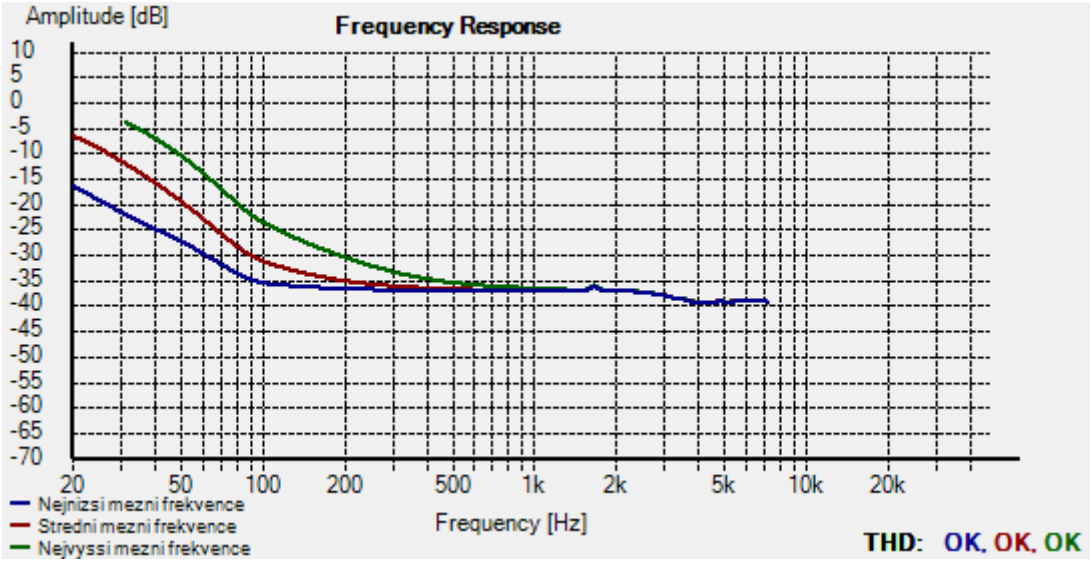


Obr. 3.16 Měření modulové kmitočtové charakteristiky levého kanálu výhybky.

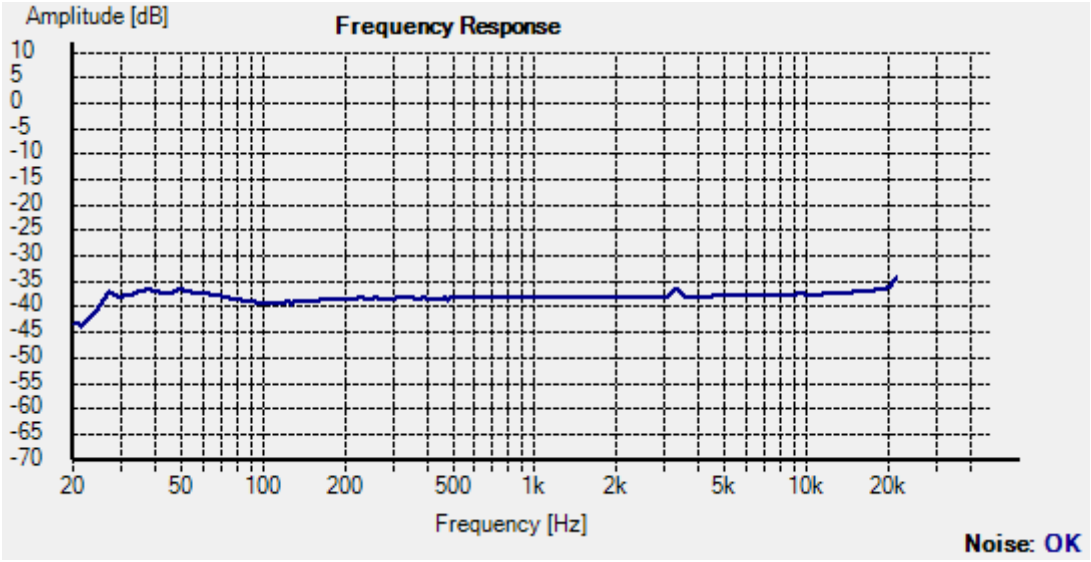


Obr. 3.17 Měření modulové kmitočtové charakteristiky levého kanálu výhybky v programu HOLMImpulse.

Rovněž pro levý kanál výhybky byl proměřen průběh celkového harmonického zkreslení (viz obr. 3.18) a šumu (viz obr. 3.19).



Obr. 3.18 Celkové harmonické zkreslení levého kanálu výhybky.



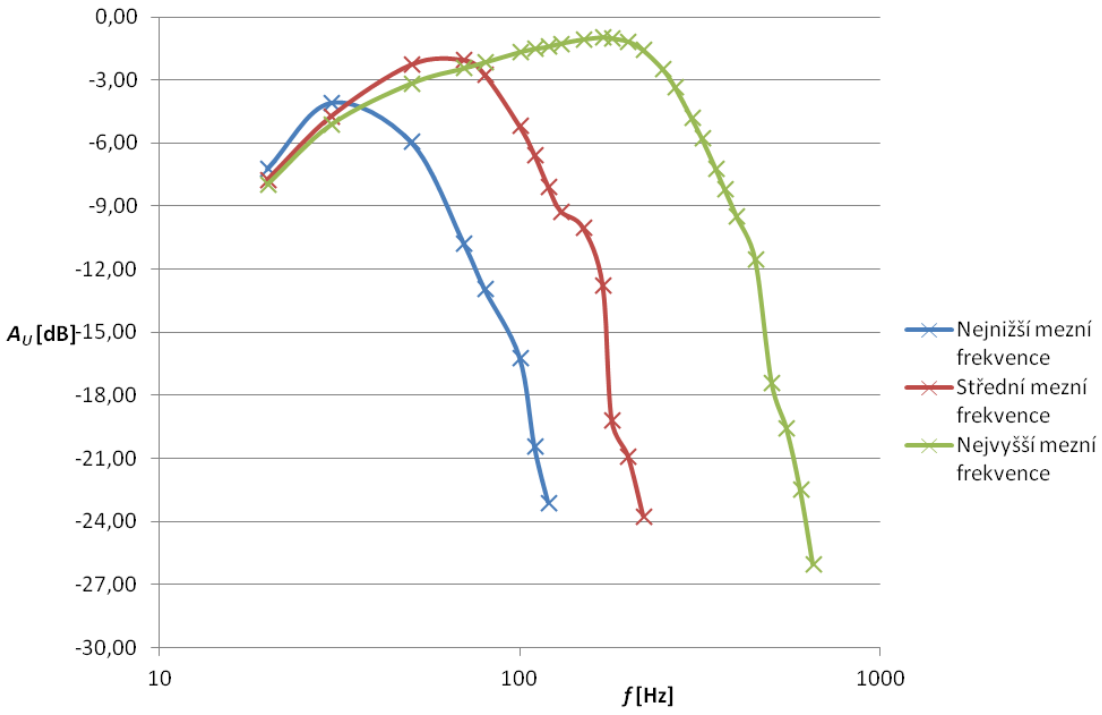
Obr. 3.19 Šum levého kanálu výhybky.

Z naměřených průběhů vyplývá, že charakteristiky jednotlivých kanálů se téměř neliší, a tudíž je pravý i levý kanál výhybky dobře navržen. Kmitočtové modulové charakteristiky mají charakter horní propusti s přeladitelnou mezní frekvencí v pásmu přibližně 70 – 400 Hz. Oba kanály vykazují vyrovnaný přenos až do kmitočtu 100 kHz, tedy daleko za horní hranicí akustického pásma.

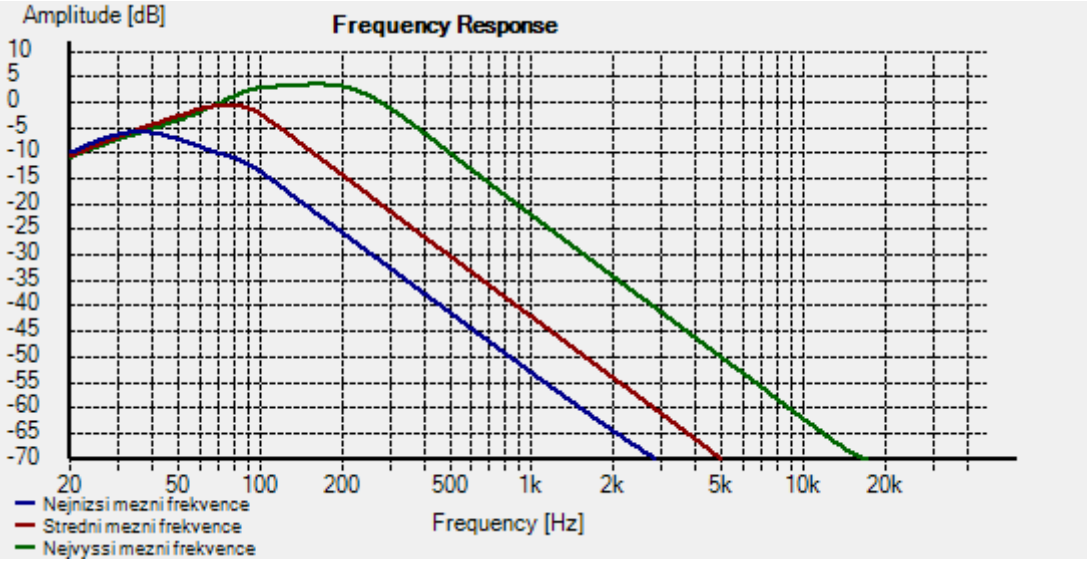
Celkové harmonické zkreslení se v přenosovém pásmu u obou kanálů pohybuje kolem příznivé hodnoty -35 dB. Úroveň šumu činí přibližně -40 dB, avšak jak již bylo řečeno, tato hodnota může být ovlivněna vlastním šumem použité zvukové karty, a tudíž může být šum samotné výhybky ještě nižší.

3.1.3 Měření subwooferu

Měření kanálu pro subwoofer bylo provedeno stejným způsobem jako měření pravého a levého kanálu výhybky. Jako vstupní napětí na generátoru byla opět nastavena hodnota 200 mV. Pro výsledek měření modulové kmitočtové charakteristiky viz obrázek 3.20. Tatáž charakteristika naměřená v programu HOLMImpulse viz obrázek 3.21.

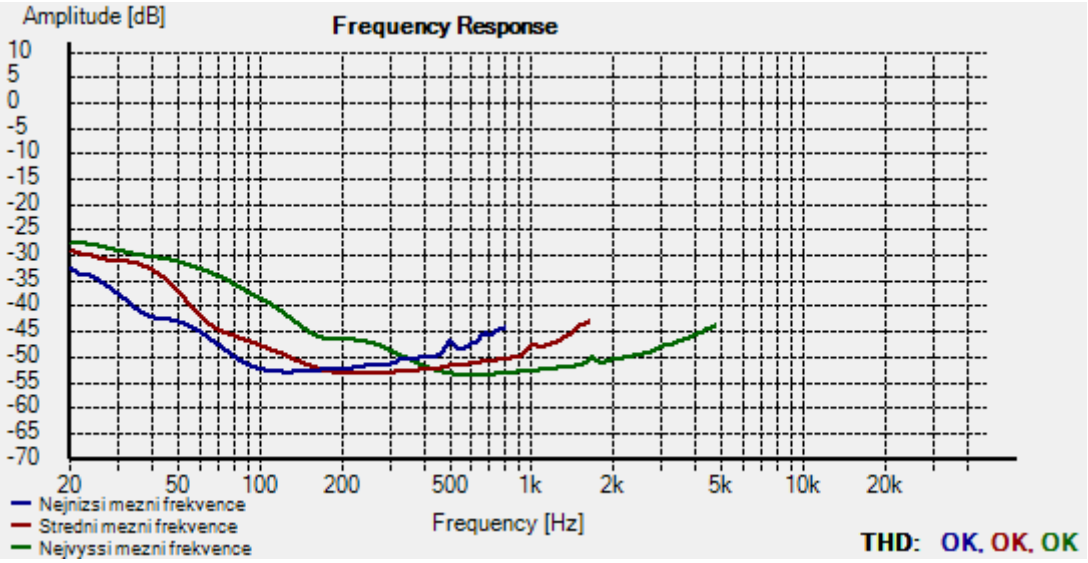


Obr. 3.20 Měření modulové kmitočtové charakteristiky subwooferu.

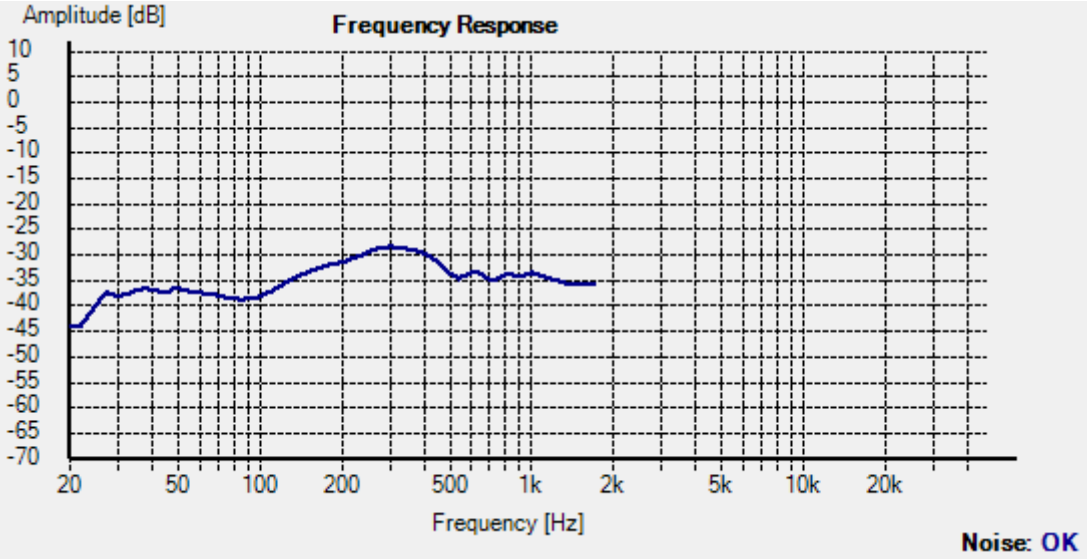


Obr. 3.21 Měření modulové kmitočtové charakteristiky subwooferu v programu HOLMImpulse.

Rovněž pro subwoofer byla v programu HOLMImpulse změřena charakteristika celkového harmonického zkreslení (viz obr. 3.22) a šumu (viz obr. 3.23). Hodnota *THD* se v přenosovém pásmu pohybuje mezi -30 a -45 dB, od kmitočtu okolo 200 Hz jeho hodnota klesá až téměř na -55 dB. Úroveň šumu se v přenosovém pásmu pohybuje pod hodnotou -35 dB, na vyšších frekvencích mírně roste k hodnotě okolo -30 dB.



Obr. 3.22 Celkové harmonické zkreslení subwooferu.



Obr. 3.23 Šum kanálu pro subwoofer.

Kanál výhybky pro subwoofer má charakter dolní propusti. V závislosti na poloze potenciometru je jeho mezní frekvence přeladitelná v rozsahu přibližně 100 – 700 Hz.

3.2 Měření laboratorního přípravku

Měření na přípravku je poněkud zkomplikováno skutečností, že koncový stupeň má diferenční výstupy a nesymetrické napájení. Z toho plynou dvě opatření nezbytná pro správné měření. Výstup zesilovače je potřeba měřit buď přes galvanicky oddělený osciloskop, nebo připojit výstup zesilovače ke dvěma kanálům osciloskopu a pomocí jeho vnitřních funkcí od sebe tyto dva kanály odečíst. Tento způsob byl použit při následujícím měření zesilovače. Ze stejného důvodu je rovněž nutné připojit k přípravku nízkofrekvenční milivoltmetr MV 100 přes oddělovací transformátor.

Vzhledem k vysokým výkonům na výstupu zesilovače je přípravek opatřen dvěma vypínači, pomocí kterých je možno odpojit napájení zesilovače pro středovýškové kanály nebo subwooferu od zdroje. Během měření je vhodné mít vypnutý ten kanál, který není aktuálně měřen. Předchází se tak jeho výkonovému namáhání.

Podklady pro laboratorní úlohu byly vytvořeny podle vzoru ostatních úloh předmětu BNFE (Nízkofrekvenční a audio elektronika), především pak podle úlohy číslo 3.

Nízkofrekvenční a audio elektronika (BNFE, KNFE)

Laboratorní úloha č. 3 (teoretická část)

Audio zesilovač 2.1 ve třídě D

Cílem úlohy je seznámit studenty s principem a základními parametry audio zesilovače třídy D, jehož výkonový koncový stupeň je součástí měřeného přípravku. Během měření získají studenti představu o vlastnostech této třídy zesilovačů v kmitočtové oblasti, o výkonových úrovních a harmonickém zkreslení.

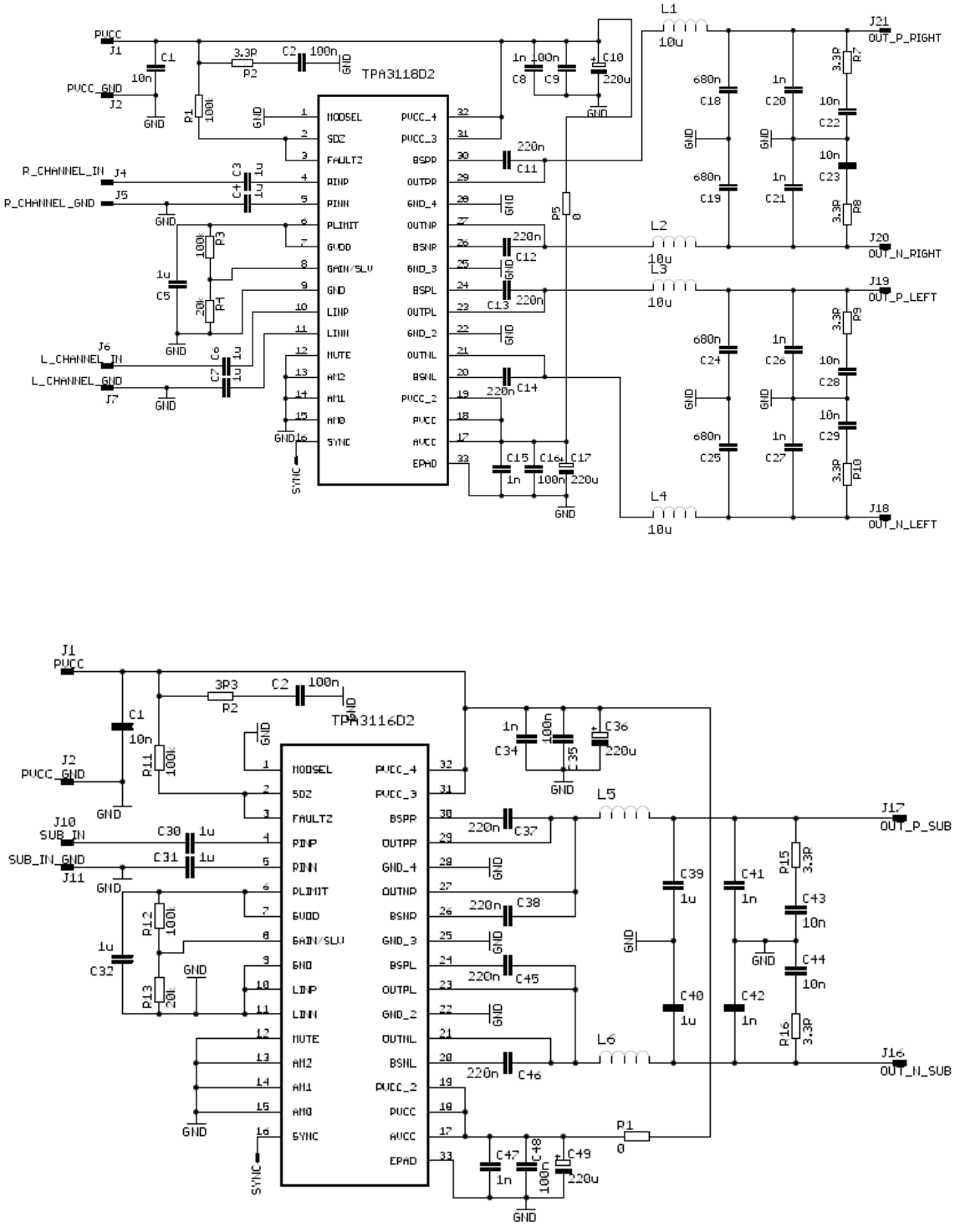
ÚVOD

Přípravek se skládá ze tří částí – ochrany napájení, aktivní výhybky a samotného výkonového koncového stupně ve třídě D.

Přípravek je napájen symetrickým napětím +/-24 V. Pro ochranu koncového stupně před napěťovými špičkami většími než 27 V slouží transily pro obě polarity napájecího napětí. Jako primární ochrana proti přepětí jsou na krabičce umístěny tavné pojistky v pouzdře pro jejich snadnou výměnu v případě potřeby. Pro napájení výhybky je napájecí napětí sníženo na hodnotu +/-12 V pomocí lineárních stabilizátorů LM7812 a LM7912.

Výhybka slouží k rozdělení vstupního signálu pomocí přeladitelných filtrů na dva kanály pro středovýškové frekvence (pravý a levý, mají charakter horní propusti) a jeden kanál pro subwoofer (má charakter dolní propusti). Mezní frekvence všech tří filtrů je nastavitelná pomocí potenciometrů umístěných na předním panelu přípravku. Zde jsou rovněž umístěny další dva potenciometry pro volbu zesílení středovýškových kanálů nebo kanálu pro subwoofer.

Samotný výkonový koncový stupeň ve třídě D je realizován pomocí dvou integrovaných obvodů od firmy Texas Instruments - TPA3118D2 pro pravý a levý kanál a TPA3116D2 pro kanál subwooferu. Středovýškové kanály dodávají maximální výkon 2×30 W do zátěže 8 Ω a subwoofer 100 W do zátěže 2 Ω. Schémata obou částí koncového stupně jsou na obrázku 1. Napěťový dělič připojený mezi vstupní piny 6 až 9 slouží k nastavení zisku a módu Master nebo Slave. V tomto případě fungují oba integrované obvody jako Master, jelikož je každý na samostatné desce. Zisk je nastaven na 26 dB. Čipy obsahují modulátory PWM (Pulse Width Modulation, pulzně šířková modulace). Výstupní signál z integrovaných obvodů je převáděn zpět do analogové podoby pomocí LC filtrů typu dolní propust druhého řádu. RC filtr na výstupu koncového stupně slouží pro zmírnění vlivu elektromagnetických interferencí v okolí zesilovače.



Obr. 1 Schéma zapojení koncového stupně - středovýškové kanály (nahoře), subwoofer (dole)

Nízkofrekvenční a audio elektronika (BNFE, KNFE)

Laboratorní úloha č. 3 (protokol)

Audio zesilovač 2.1 ve třídě D

Jméno a příjmení: .....Studijní skupina: .....

Datum a čas měření: .....Hodnocení vyučujícího: .....

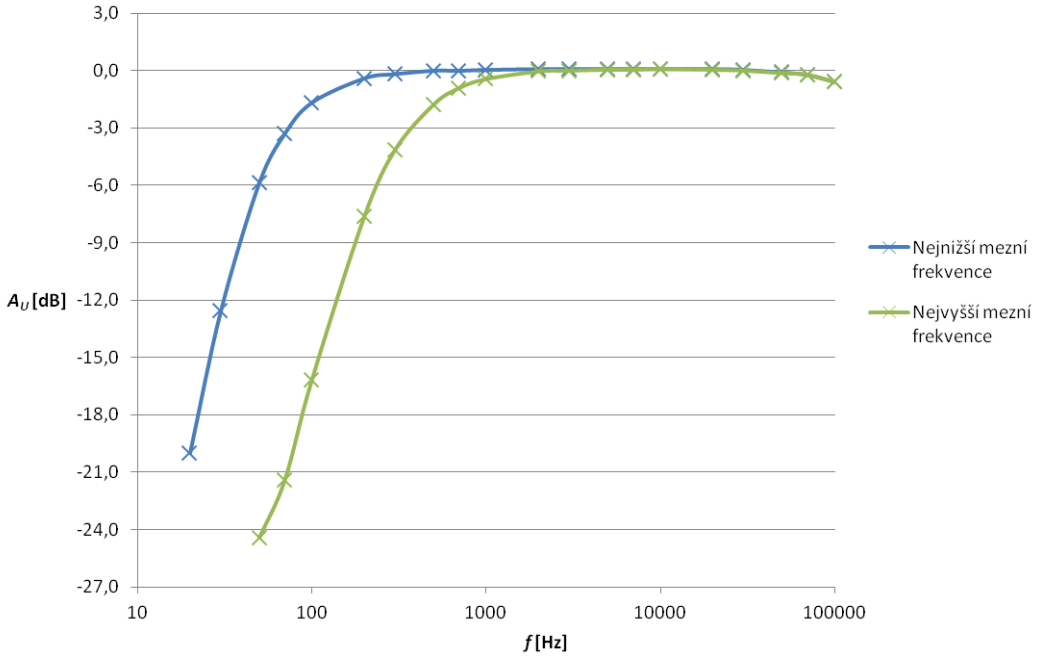
ZADÁNÍ A POZNÁMKY K MĚŘENÍ A VYPRACOVÁNÍ PROTOKOLU

1. Měření pásma přeladitelnosti středovýškového kanálu výhybky. Změřte modulovou kmitočtovou charakteristiku pravého nebo levého kanálu při U_1 = 200 mV. Zesílení nastavte pomocí osciloskopu tak, aby byl při frekvenci 1 kHz zajištěn jednotkový přenos. Měření proveďte pro minimální a maximální nastavitelnou mezní frekvenci daného kanálu (pro minimální a maximální otočení příslušného potenciometru). Zaznamenávejte výstupní napětí a podle rovnice (1) vypočítejte přenos A_U [dB]. Obě křivky zakreslete do společného grafu a odečtěte hodnoty mezní frekvence.

Tabulka 1 Modulová kmitočtová charakteristika pravého kanálu výhybky

Potenciometr na minimu			**Potenciometr na maximu**		
***f* [Hz]**	**U_2 [mV]**	**A_U [dB]**	***f* [Hz]**	**U_2 [mV]**	**A_U [dB]**
20	20	-20,00	20	-	-
30	47	-12,58	30	-	-
50	102	-5,85	50	12	-24,44
70	137	-3,29	70	17	-21,41
100	165	-1,67	100	31	-16,19
200	191	-0,40	200	83	-7,64
300	196	-0,18	300	124	-4,15
500	200	0,00	500	163	-1,78
700	200	0,00	700	180	-0,92
1000	201	0,04	1000	190	-0,45
2000	202	0,09	2000	199	-0,04
3000	202	0,09	3000	200	0,00
5000	202	0,09	5000	201	0,04
7000	202	0,09	7000	201	0,04
10 000	202	0,09	10 000	202	0,09
20 000	202	0,09	20 000	201	0,04
30 000	201	0,04	30 000	200	0,00
50 000	198	-0,09	50 000	197	-0,13
70 000	195	0,22	70 000	195	-0,22
100 000	187	-0,58	100 000	187	-0,58

$$A_U = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) \qquad (1)$$



Graf 1 Modulová kmitočtová charakteristika pravého kanálu výhybky

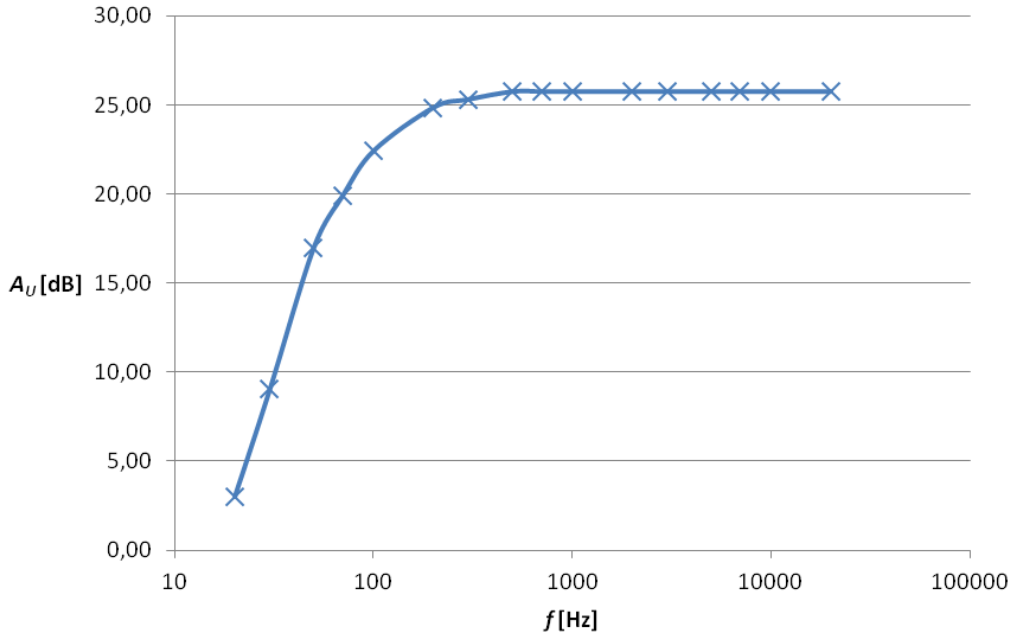
Nejnižší mezní frekvence: 70 Hz

Nejvyšší mezní frekvence: 400 Hz

2. Měření modulové kmitočtové charakteristiky pravého/levého kanálu zesilovače. Vzhledem k diferenčnímu výstupu zesilovače je nutné připojit výstup ke dvěma kanálům osciloskopu. Pro správné zobrazení výstupního signálu poté zvolte „Math“, operaci odčítání a dva kanály, jejichž signál má být od sebe odčítán. Dbejte na to, aby oba kanály měly stejné napěťové rozlišení (počet voltů na dílek). **Takto postupujte při každém měření výstupu zesilovače!** Vzhledem k vysokým výkonovým úrovním na výstupu zesilovače rovněž zapínejte (pomocí vypínačů na přípravku) vždy pouze ten kanál, který je právě měřen. Předejdete tak výkonovému namáhání ostatních kanálů. Potenciometr ladící mezní frekvenci nastavte přibližně do poloviny jeho rozsahu. Zesílení zvolte takové, aby na frekvenci 1 kHz byl jednotkový přenos. Měření provádějte pro U_1 = 300 mV. Amplitudu výstupního napětí U_{2max} odečítejte pomocí kruzorů, poté dopočítejte efektivní hodnotu výstupního napětí U_2, podle vztahu (1) dopočítejte přenos A_U a jeho průběh zakreslete do grafu. Určete mezní frekvenci.

Tabulka 2 Modulová kmitočtová charakteristika středovýškového kanálu zesilovače

f [Hz]	U_{2max} [mV]	U_2 [mV]	A_U [dB]
20	0,6	0,42	3,01
30	1,2	0,85	9,03
50	3,0	2,12	16,99
70	4,2	2,97	19,91
100	5,6	3,96	22,41
200	7,4	5,23	24,83
300	7,8	5,52	25,29
500	8,2	5,80	25,72
700	8,2	5,80	25,72
1000	8,2	5,80	25,72
2000	8,2	5,80	25,72
3000	8,2	5,80	25,72
5000	8,2	5,80	25,72
7000	8,2	5,80	25,72
10 000	8,2	5,80	25,72
20 000	8,2	5,80	25,72



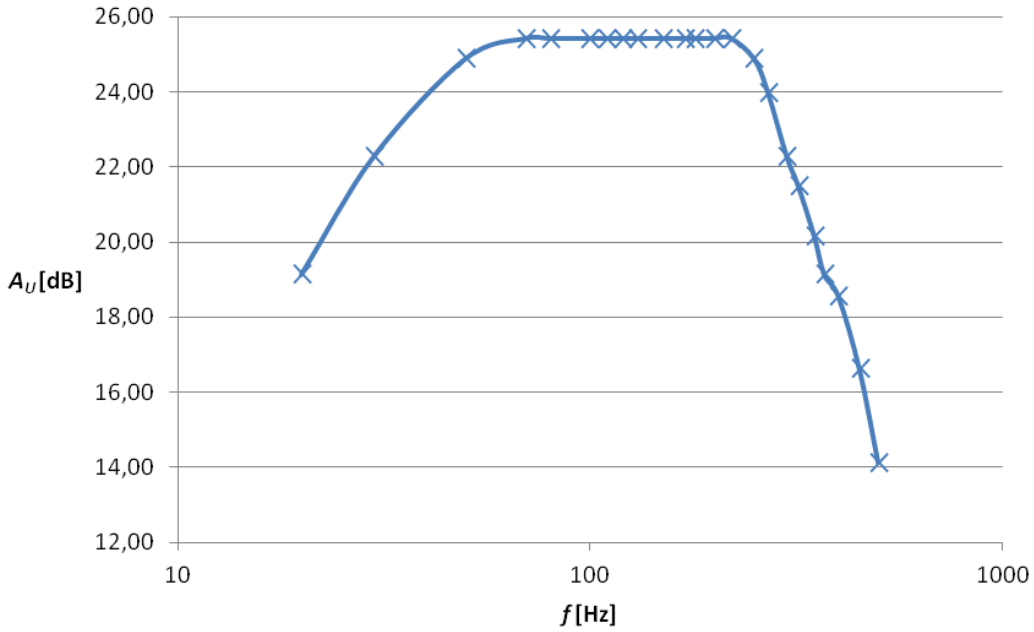
Graf 2 Modulová kmitočtová charakteristika středovýškového kanálu zesilovače

Mezní frekvence f_m = 100 Hz

3. Měření modulové kmitočtové charakteristiky subwooferu. Potenciometr ladící mezní frekvenci subwooferu nastavte přibližně do poloviny jeho rozsahu. Zesílení nastavte tak, aby na frekvenci 70 Hz byl zajištěn jednotkový přenos. Měření provádějte pro U_1 = 100 mV. Amplitudu výstupního napětí U_{2max} odečítejte pomocí kruzorů, poté dopočítejte efektivní hodnotu výstupního napětí U_2, podle vztahu (1) dopočítejte přenos A_U a jeho průběh zakreslete do grafu. Určete mezní frekvenci filtru.

Tabulka 3 Měření modulové kmitočtové charakteristiky subwooferu

f [Hz]	U_{2max} [V]	U_2 [V]	A_U [dB]
20	1,28	0,91	19,13
30	1,84	1,30	22,29
50	2,48	1,75	24,88
70	2,64	1,87	25,42
80	2,64	1,87	25,42
100	2,64	1,87	25,42
110	2,64	1,87	25,42
120	2,64	1,87	25,42
130	2,64	1,87	25,42
150	2,64	1,87	25,42
170	2,64	1,87	25,42
180	2,64	1,87	25,42
200	2,64	1,87	25,42
220	2,64	1,87	25,42
250	2,48	1,75	24,88
270	2,24	1,58	23,99
300	1,84	1,30	22,29
320	1,68	1,19	21,50
350	1,44	1,02	20,16
370	1,28	0,91	19,13
400	1,20	0,85	18,57
450	0,96	0,68	16,64
500	0,72	0,51	14,14



Graf 3 Modulová kmitočtová charakteristika subwooferu

Mezní frekvence f_m = 300 Hz

4. Měření maximálního výstupního výkonu zesilovače pro limitaci. Generátor připojte přímo na vstup zesilovače a na kmitočtu 1 kHz postupně zvyšujte vstupní napětí a pozorujte průběh výstupního signálu pravého nebo levého kanálu na osciloskopu. V okamžiku, kdy zpozorujete zkreslení signálu (limitaci, ořezání části signálu, zákmity atd.) odečtěte výstupní napětí $U_{výst}$. Poté vstupní napětí opět snižte, abyste předešli výkonovému namáhání koncového stupně. Maximální výkon pro limitaci vypočítejte ze vzorce (2).

$$P = \frac{{U_{výst}}^2}{R_Z}, \qquad (2)$$

kde R_Z = 8 Ω.

$U_{výst}$ = 16,4 V

$$P = \frac{{U_{výst}}^2}{R_Z} = \frac{16{,}4^2}{8} = 33{,}62 \text{ W}$$

5. Měření účinnosti zesilovače. Účinnost koncového stupně určete ze vzorce (3), tedy jako podíl maximálního výstupního výkonu a příkonu zesilovače.

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{P}{U_N \cdot I_N}, \tag{3}$$

kde U_N a I_N odečtete přímo z napájecího zdroje.

U_N = 24 V I_N = 1,74 A

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{P}{U_N \cdot I_N} = \frac{33{,}62}{24 \cdot 1{,}74} = 0{,}81$$

6. Měření přeslechu signálu mezi kanály výhybky. Pomocí generátoru nastavte na jednom kanálu výhybky (např. pravém) napětí 500 mV. Změřte výstupní napětí na druhém kanálu (levém). Poté podobným způsobem vybuďte druhý kanál a změřte výstupní napětí na prvním kanálu. Měření proveďte na frekvencích 1 kHz, 5 kHz a 10 kHz.

Tabulka 4 Měření přeslechu mezi kanály výhybky

	Přeslech P->L			**Přeslech L->P**		
***f* [kHz]**	***U*_{*výstP*} [V]**	***U*_{*výstL*} [V]**	**Přeslech [dB]**	***U*_{*výstL*} [V]**	***U*_{*výstP*} [V]**	**Přeslech [dB]**
1	1,34	0,0020	56,6	1,37	0,004	50,7
5	1,34	0,0044	49,7	1,37	0,007	45,8
10	1,34	0,0080	44,5	1,37	0,010	42,7

7. Měření celkového harmonického zkreslení a šumu zesilovače. Měření pro středovýškové kanály proveďte pro vstupní napětí U_1 = 200 mV a frekvenci 1 kHz. Měření pro subwoofer proveďte pro vstupní napětí U_1 = 70 mV a frekvenci 250 Hz. Výstup přípravku měřte nízkofrekvenčním milivoltmetrem. Nastavte na něm měření harmonického zkreslení „*THD+N*“, potvrďte tlačítkem „Enter/Loc“ a zadejte požadovanou frekvenci.

Tabulka 5 Měření celkového harmonického zkreslení a šumu zesilovače

Kanál	***THD+N* [%]**
Pravý	1,823
Levý	1,576
Subwoofer	0,153

POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

GEN nízkofrekvenční funkční generátor Agilent 33220A
NMV nízkofrekvenční milivoltmetr Grundig MV100
OSC digitální osciloskop Tektronix TDS 2014
NZ napájecí zdroj Diametral HC-D230-4G (napájení přípravku +/-24 V)
oddělovací transformátor Tesla
měřený přípravek „Audio zesilovač 2.1 ve třídě D“
propojovací vodiče 6 × BNC – „banánek“, 2 × BNC – BNC
1 × rozbočovací T-člen

ZÁVĚR

První bod měření na přípravku „Audio zesilovač 2.1 ve třídě D“ ukázal, že filtr pravého kanálu výhybky je přeladitelný v pásmu 70 – 400 Hz. Ve druhém bodě měření byl zjištěn zisk pravého kanálu zesilovače 26 dB, což odpovídá údajům výrobce pro použité hodnoty součástek zapojené k pinu GAIN/SLV integrovaného obvodu. Stejné hodnoty součástek byly použity rovněž u subwooferu, a tudíž i zde byl měřením zjištěn zisk téměř 26 dB.

Ve čtvrtém bodě měření bylo zkreslení výstupního signálu pozorováno při vstupním napětí U_1 = 900 mV, odpovídající výstupní napětí mělo hodnotu 16,4 V. Na použité zátěži 8 Ω tomuto napětí odpovídá výkon 33,62 W. Pomocí této hodnoty byla určena účinnost zesilovače 81 %. Tato hodnota neodpovídá údajům výrobce, který udával dosažitelnou účinnost větší než 90 %.

Hodnoty přeslechů mezi kanály výhybky se pohybovaly okolo 50 dB, což není příliš příznivá hodnota, kvalitní zařízení mají tento parametr až dvojnásobný. Uspokojivých hodnot dosahuje celkové harmonické zkreslení a šum zesilovače, kde u středovýškových kanálů prokázalo měření hodnoty okolo 1,5 % a u subwooferu dokonce jen 0,153 %.

3.3 Podklady pro laboratorní úlohu

Nízkofrekvenční a audio elektronika (BNFE, KNFE)

Laboratorní úloha č. 3 (teoretická část)

Audio zesilovač 2.1 ve třídě D

Cílem úlohy je seznámit studenty s principem a základními parametry audio zesilovače třídy D, jehož výkonový koncový stupeň je součástí měřeného přípravku. Během měření získají studenti představu o vlastnostech této třídy zesilovačů v kmitočtové oblasti, o výkonových úrovních a harmonickém zkreslení.

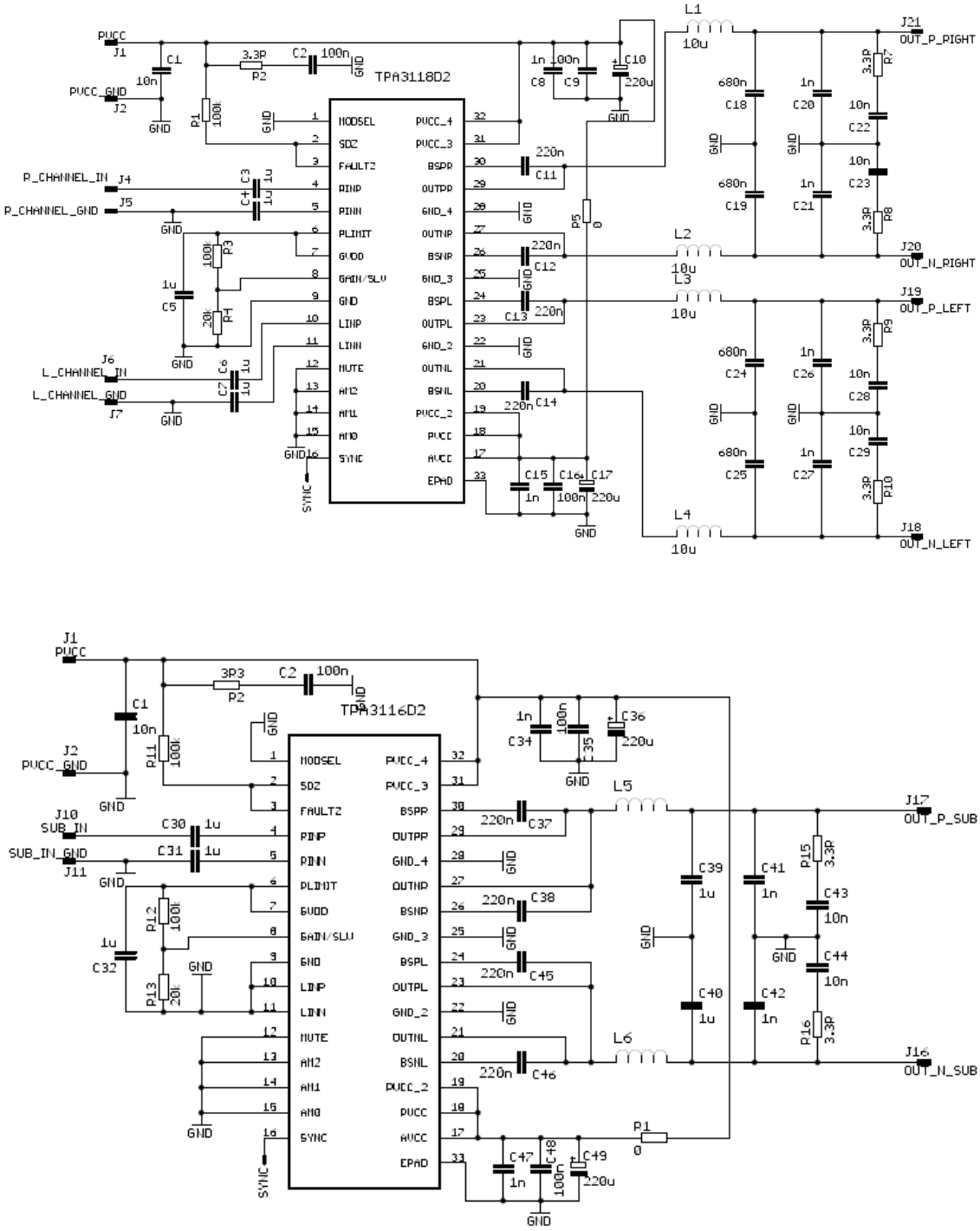
ÚVOD

Přípravek se skládá ze tří částí – ochrany napájení, aktivní výhybky a samotného výkonového koncového stupně ve třídě D.

Přípravek je napájen symetrickým napětím +/-24 V. Pro ochranu koncového stupně před napěťovými špičkami většími než 27 V slouží transily pro obě polarity napájecího napětí. Jako primární ochrana proti přepětí jsou na krabičce umístěny tavné pojistky v pouzdře pro jejich snadnou výměnu v případě potřeby. Pro napájení výhybky je napájecí napětí sníženo na hodnotu +/-12 V pomocí lineárních stabilizátorů LM7812 a LM7912.

Výhybka slouží k rozdělení vstupního signálu pomocí přeladitelných filtrů na dva kanály pro středovýškové frekvence (pravý a levý, mají charakter horní propusti) a jeden kanál pro subwoofer (má charakter dolní propusti). Mezní frekvence všech tří filtrů je nastavitelná pomocí potenciometrů umístěných na předním panelu přípravku. Zde jsou rovněž umístěny další dva potenciometry pro volbu zesílení středovýškových kanálů nebo kanálu pro subwoofer.

Samotný výkonový koncový stupeň ve třídě D je realizován pomocí dvou integrovaných obvodů od firmy Texas Instruments - TPA3118D2 pro pravý a levý kanál a TPA3116D2 pro kanál subwooferu. Středovýškové kanály dodávají maximální výkon 2×30 W do zátěže 8 Ω a subwoofer 100 W do zátěže 2 Ω. Schémata obou částí koncového stupně jsou na obrázku 1. . Napěťový dělič připojený mezi vstupní piny 6 až 9 slouží k nastavení zisku a módu Master nebo Slave. V tomto případě fungují oba integrované obvody jako Master, jelikož je každý na samostatné desce. Zisk je nastaven na 26 dB. Čipy obsahují modulátory PWM (Pulse Width Modulation, pulzně šířková modulace). Výstupní signál z integrovaných obvodů je převáděn zpět do analogové podoby pomocí LC filtrů typu dolní propust druhého řádu. RC filtr na výstupu koncového stupně slouží pro zmírnění vlivu elektromagnetických interferencí v okolí zesilovače.



Obr. 1 Schéma zapojení koncového stupně - středovýškové kanály (nahoře), subwoofer (dole)

Nízkofrekvenční a audio elektronika (BNFE, KNFE)

Laboratorní úloha č. 3 (protokol)

Audio zesilovač 2.1 ve třídě D

Jméno a příjmení: .....Studijní skupina: .....

Datum a čas měření: .....Hodnocení vyučujícího: .....

ZADÁNÍ A POZNÁMKY K MĚŘENÍ A VYPRACOVÁNÍ PROTOKOLU

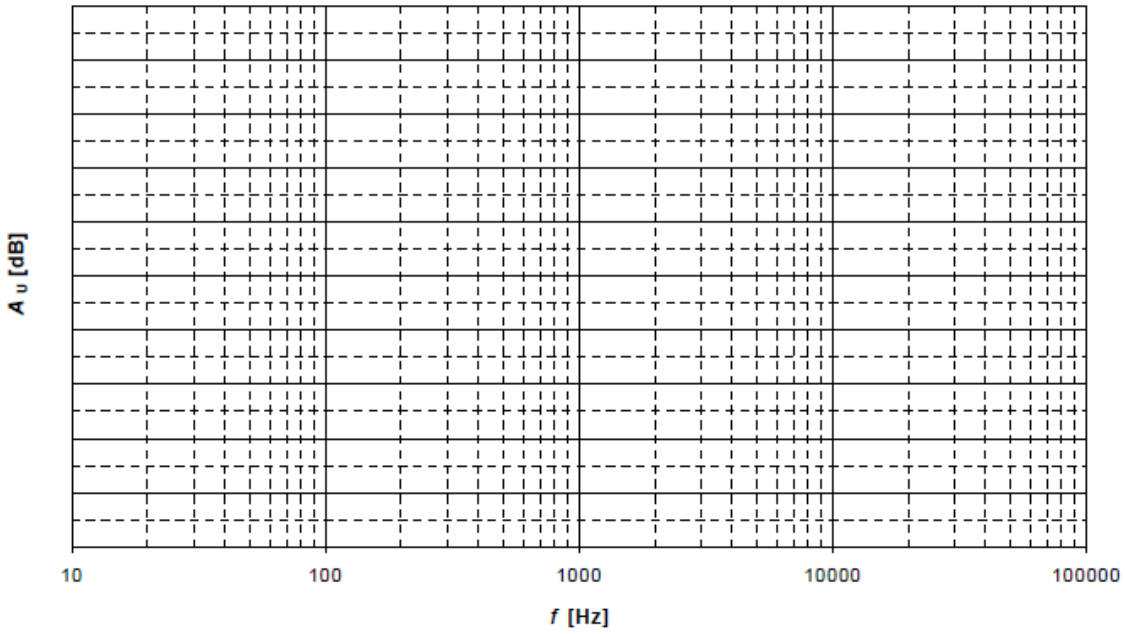
1. Měření pásma přeladitelnosti středovýškového kanálu výhybky. Změřte modulovou kmitočtovou charakteristiku pravého nebo levého kanálu při U_1 = 200 mV. Zesílení nastavte pomocí osciloskopu tak, aby byl při frekvenci 1 kHz zajištěn jednotkový přenos. Měření proveďte pro minimální a maximální nastavitelnou mezní frekvenci daného kanálu (pro minimální a maximální otočení příslušného potenciometru). Zaznamenávejte výstupní napětí a podle rovnice (1) vypočítejte přenos A_U [dB]. Obě křivky zakreslete do společného grafu a odečtěte hodnoty mezní frekvence.

Tabulka 1 Modulová kmitočtová charakteristika pravého/levého kanálu výhybky

Potenciometr na minimu		
f **[Hz]**	U_2 **[mV]**	A_U **[dB]**
20		
30		
50		
70		
100		
200		
300		
500		
700		
1000		
2000		
3000		
5000		
7000		
10 000		
20 000		
30 000		
50 000		
70 000		
100 000		

Potenciometr na maximu		
f **[Hz]**	U_2 **[mV]**	A_U **[dB]**
20		
30		
50		
70		
100		
200		
300		
500		
700		
1000		
2000		
3000		
5000		
7000		
10 000		
20 000		
30 000		
50 000		
70 000		
100 000		

$$A_U = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) \qquad (1)$$



Graf 1 Modulová kmitočtová charakteristika pravého/levého kanálu výhybky

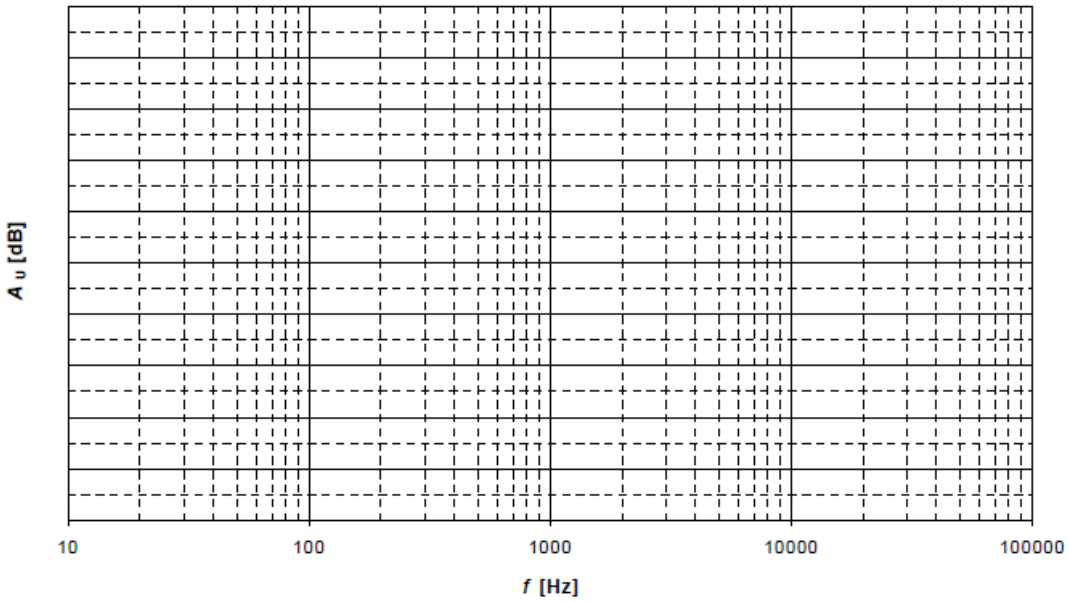
Nejnižší mezní frekvence:

Nejvyšší mezní frekvence:

2. Měření modulové kmitočtové charakteristiky pravého/levého kanálu zesilovače.
Vzhledem k diferenčnímu výstupu zesilovače je nutné připojit výstup ke dvěma kanálům osciloskopu. Pro správné zobrazení výstupního signálu poté zvolte „Math“, operaci odčítání a dva kanály, jejichž signál má být od sebe odčítán. Dbejte na to, aby oba kanály měly stejné napěťové rozlišení (počet voltů na dílek). **Takto postupujte při každém měření výstupu zesilovače!** Vzhledem k vysokým výkonovým úrovním na výstupu zesilovače rovněž zapínejte (pomocí vypínačů na přípravku) vždy pouze ten kanál, který je právě měřen. Předejdete tak výkonovému namáhání ostatních kanálů. Potenciometr ladící mezní frekvenci nastavte přibližně do poloviny jeho rozsahu. Zesílení zvolte takové, aby na frekvenci 1 kHz byl jednotkový přenos. Měření provádějte pro U_1 = 300 mV. Amplitudu výstupního napětí U_{2max} odečítejte pomocí kruzorů, poté dopočítejte efektivní hodnotu výstupního napětí U_2, podle vztahu (1) dopočítejte přenos A_U a jeho průběh zakreslete do grafu. Určete mezní frekvenci.

Tabulka 2 Modulová kmitočtová charakteristika středovýškového kanálu zesilovače

f [Hz]	U_2 [mV]	A_U [dB]
20		
30		
50		
70		
100		
200		
300		
500		
700		
1000		
2000		
3000		
5000		
7000		
10 000		
20 000		



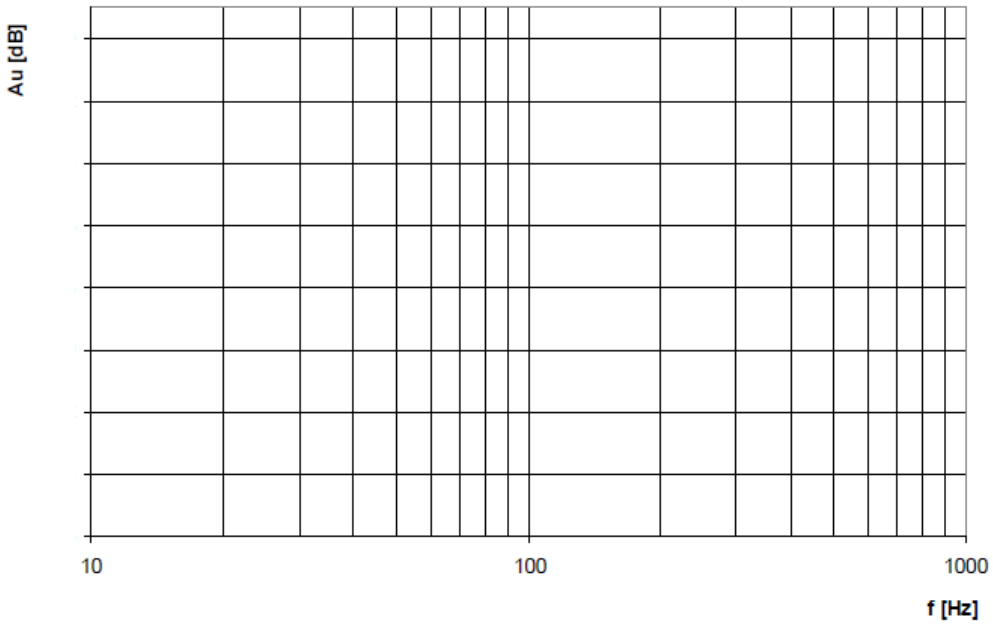
Graf 2 Modulová kmitočtová charakteristika středovýškového kanálu zesilovače

Mezní frekvence f_m =

3. Měření modulové kmitočtové charakteristiky subwooferu. Potenciometr ladící mezní frekvenci subwooferu nastavte přibližně do poloviny jeho rozsahu. Zesílení nastavte tak, aby na frekvenci 70 Hz byl zajištěn jednotkový přenos. Měření provádějte pro U_1 = 100 mV. Amplitudu výstupního napětí U_{2max} odečítejte pomocí kruzorů, poté dopočítejte efektivní hodnotu výstupního napětí U_2, podle vztahu (1) dopočítejte přenos A_U a jeho průběh zakreslete do grafu. Určete mezní frekvenci filtru.

Tabulka 3 Měření modulové kmitočtové charakteristiky subwooferu

f [Hz]	U_{2max} [V]	U_2 [V]	A_U [dB]
20			
30			
50			
70			
80			
100			
110			
120			
130			
150			
170			
180			
200			
220			
250			
270			
300			
320			
350			
370			
400			
450			
500			



Graf 3 Modulová kmitočtová charakteristika subwooferu

Mezní frekvence f_m =

4. Měření maximálního výstupního výkonu zesilovače pro limitaci. Generátor připojte přímo na vstup zesilovače a na kmitočtu 1 kHz postupně zvyšujte vstupní napětí a pozorujte průběh výstupního signálu pravého nebo levého kanálu na osciloskopu. V okamžiku, kdy zpozorujete zkreslení signálu (limitaci, ořezání části signálu, zákmity atd.) odečtěte výstupní napětí $U_{výst}$. Poté vstupní napětí opět snižte, abyste předešli výkonovému namáhání koncového stupně. Maximální výkon pro limitaci vypočítejte ze vzorce (2).

$$P = \frac{U_{výst}{}^2}{R_Z}, \qquad (2)$$

kde R_Z = 8 Ω.

$U_{výst}$ =

P =

5. Měření účinnosti zesilovače. Účinnost koncového stupně určete ze vzorce (3), tedy jako podíl maximálního výstupního výkonu a příkonu zesilovače.

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{P}{U_N \cdot I_N}, \tag{3}$$

kde U_N a I_N odečtete přímo z napájecího zdroje.

U_N = I_N =

η =

6. Měření přeslechu signálu mezi kanály výhybky. Pomocí generátoru nastavte na jednom kanálu výhybky (např. pravém) napětí 500 mV. Změřte výstupní napětí na druhém kanálu (levém). Poté podobným způsobem vybuďte druhý kanál a změřte výstupní napětí na prvním kanálu. Měření proveďte na frekvencích 1 kHz, 5 kHz a 10 kHz.

Tabulka 4 Měření přeslechu mezi kanály výhybky

	Přeslech P->L			**Přeslech L->P**		
***f* [kHz]**	**$U_{výstP}$ [V]**	**$U_{výstL}$ [V]**	**Přeslech [dB]**	**$U_{výstL}$ [V]**	**$U_{výstP}$ [V]**	**Přeslech [dB]**
1						
5						
10						

7. Měření celkového harmonického zkreslení a šumu zesilovače. Měření pro středovýškové kanály proveďte pro vstupní napětí U_1 = 200 mV a frekvenci 1 kHz. Měření pro subwoofer proveďte pro vstupní napětí U_1 = 70 mV a frekvenci 250 Hz. Výstup přípravku měřte nízkofrekvenčním milivoltmetrem. Nastavte na něm měření harmonického zkreslení „*THD+N*“, potvrďte tlačítkem „Enter/Loc“ a zadejte požadovanou frekvenci.

Tabulka 5 Měření celkového harmonického zkreslení a šumu zesilovače

Kanál	***THD+N* [%]**
Pravý	
Levý	
Subwoofer	

POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

GEN nízkofrekvenční funkční generátor Agilent 33220A
NMV nízkofrekvenční milivoltmetr Grundig MV100
OSC digitální osciloskop Tektronix TDS 2014
NZ napájecí zdroj Diametral HC-D230-4G (napájení přípravku +/-24 V)
oddělovací transformátor Tesla
měřený přípravek „Audio zesilovač 2.1 ve třídě D“
propojovací vodiče 6 × BNC – „banánek“, 2 × BNC – BNC
1 × rozbočovací T-člen

ZÁVĚR

(Zde každý student čitelně doplní své individuální hodnocení výsledků měření a potvrdí jej svým podpisem. Je třeba podrobně komentovat každý bod měření, každou měřenou charakteristiku nebo jednotlivý výsledek. Závěr by měl vždy přehledně shrnovat technické parametry měřeného přípravku a jejich vyhodnocení.)

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala teoretickým návrhem blokového a obvodového řešení integrovaného audio zesilovače 2.1 ve třídě D, jeho následnou konstrukcí do podoby laboratorního přípravku, proměřením jeho parametrů a vytvořením kompletních podkladů pro laboratorní úlohu. Výsledný přípravek bude použit pro laboratorní měření v předmětu Nízkofrekvenční a audio elektronika na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně.

Koncový stupeň navrženého audio zesilovače ve třídě D je tvořen integrovaným obvodem TPA3118D2 pro středovýškové satelity, které budou dodávat výkon až 2 × 30 W do zátěže 8 Ω. Pro subwoofer je implementován integrovaný obvod TPA3116D2 v mono konfiguraci, výkon tohoto koncového stupně činí až 100 W na zátěži 2 Ω. Oba zmíněné integrované obvody vyrábí firma Texas Instruments. Rozdělení signálu na středovýškové a subbasové frekvence je zajištěno aktivní výhybkou s přeladitelnými filtry. Napájení přípravku je realizováno z laboratorního zdroje se symetrickým napájením +/-24 V.

Výsledný laboratorní přípravek je tvořen plastovou krabičkou, v níž jsou umístěny čtyři desky plošných spojů - ochrana napájení, aktivní výhybka, zesilovač pro středovýškové frekvence a subwoofer. Všechny tyto části jsou plně funkční.

Měření hotového výrobku prokázalo dobrou funkčnost celého návrhu. Zesilovač vykazuje zisk 26 dB, což odpovídá katalogové hodnotě pro použité zapojení. Pravý i levý kanál koncového stupně vykazují vyrovnaný přenos až do horní hranice audio pásma. Celkové harmonické zkreslení zesilovače dosahuje uspokojivých hodnot okolo 1,5 %. Nebylo ovšem dosaženo udávané účinnosti přes 90 %, při měření bylo dosaženo pouze hodnoty 81 %.

LITERATURA

[1] Portál Elweb.cz [online]. 2015 [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://www.elweb.cz/clanky.php?clanek=109

[2] ŠŤÁL, P. Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D. BEN - technická literatura, Praha, 2008

[3] FIALA, R. Konstrukce audio výkonového zesilovače ve třídě D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 37 s., 21 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

[4] Datasheet: TPA3116D2 15-W, 30-W, 50-W Filter-Free Class-D Stereo Amplifier Family With AM Avoidance [online]. Texas Instruments, 2012 [cit. 2015-11-28]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpa3116d2.pdf

[5] Portál Zosilnovace.eu [online]. 2014 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://zosilnovace.eu/Preladitelna_vyhybka_2_1.htm.

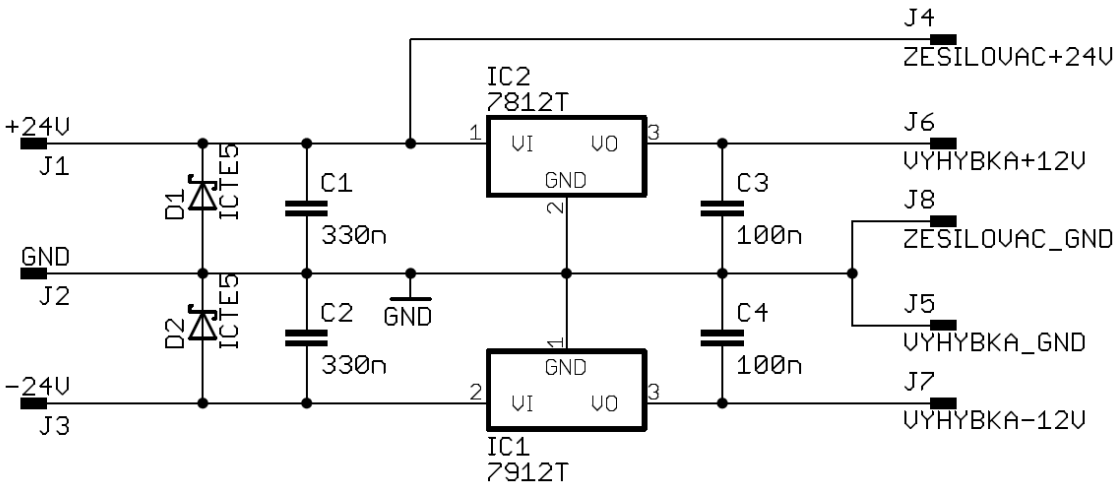
[6] WIRSUM, S. Abeceda nf techniky. BEN – technická literatura, Praha, 2003

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

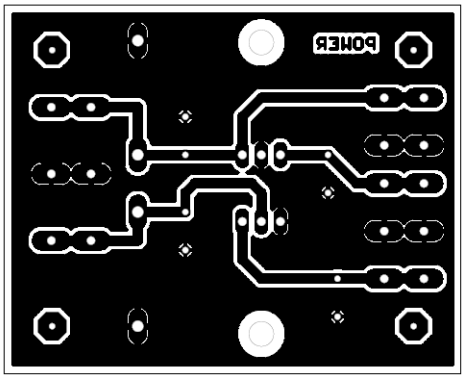
f	Signál v časové oblasti.
P_{OUT}	Výstupní výkon.
R_L	Odpor zátěže.
U_{CC}	Napájecí napětí.
η	Účinnost.
THD+N	Total harmonic distortion plus noise, celkové harmonické zkreslení plus šum.
U_{OUT}	Výstupní napětí.
U_{ef}	Efektivní hodnota napětí.
SNR	Signal-to-noise ratio, poměr signálu k šumu.
f_{PWM}	Výstupní frekvence PWM modulátoru.
TTL	Transistor-transistor logic, tranzistorově-tranzistorová logika
LDO	Low-dropout regulator, stabilizátor schopný stabilizovat napětí blízké napájecímu
AD	Analog-to-digital, analogově digitální.
ESR	Equivalent series resistence, ekvivalentní sériový odpor.
AC	Alternating Current, střídavý proud.
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, polem řízený tranzistor.
HTSSOP	Heatsink Thin Shrink Small Outline Package.

A NÁVRH AUDIO ZESILOVAČE

A.1 Obvodové zapojení napájecí desky

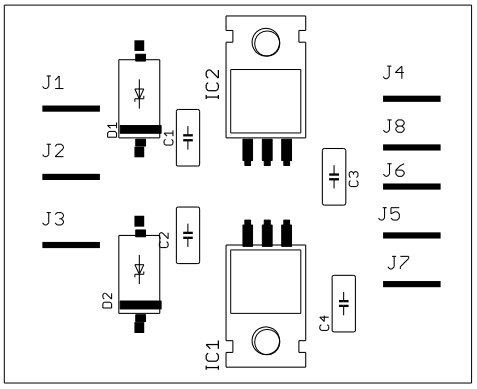


A.2 Deska plošného spoje napájecí desky – bottom (strana spojů)



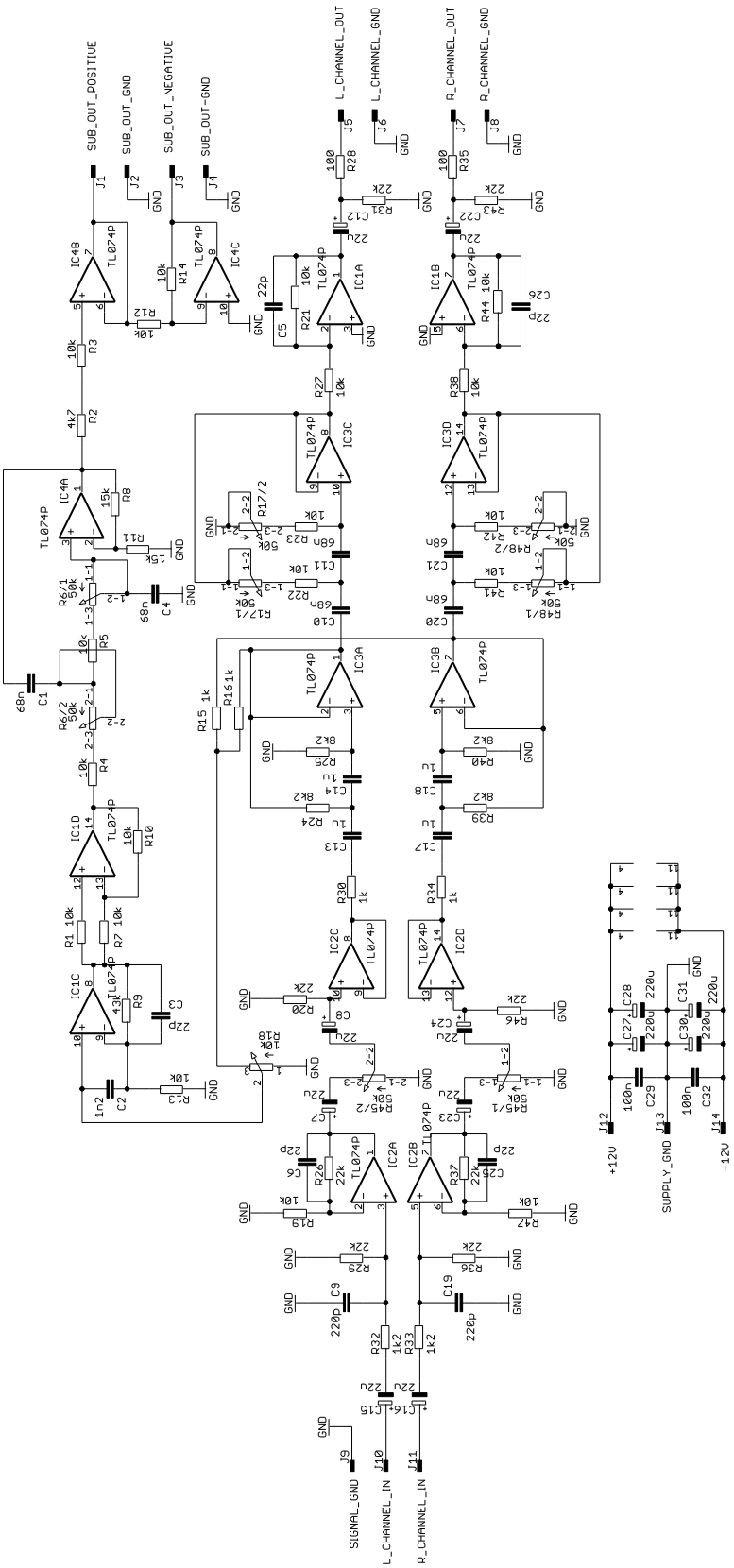
Rozměr desky 61 x 50 [mm], měřítko M1:1

A.3 Osazovací plán napájecí desky

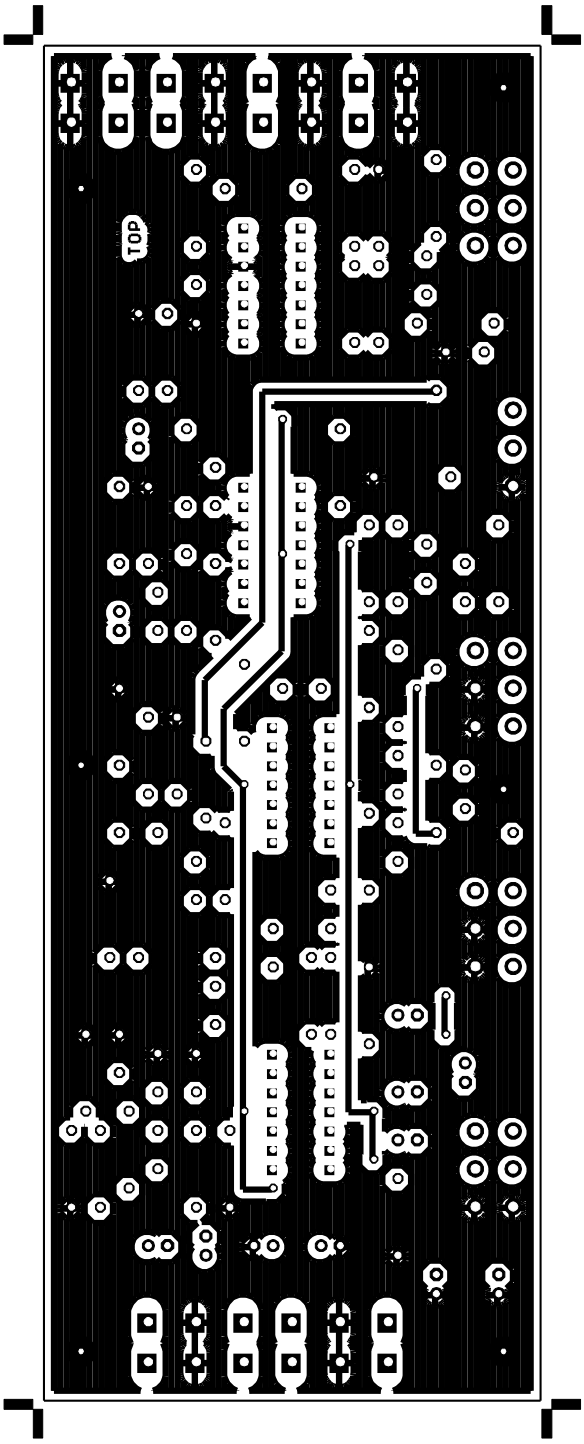


Rozměr desky 61 x 50 [mm], měřítko M1:1

A.4 Obvodové zapojení výhybky

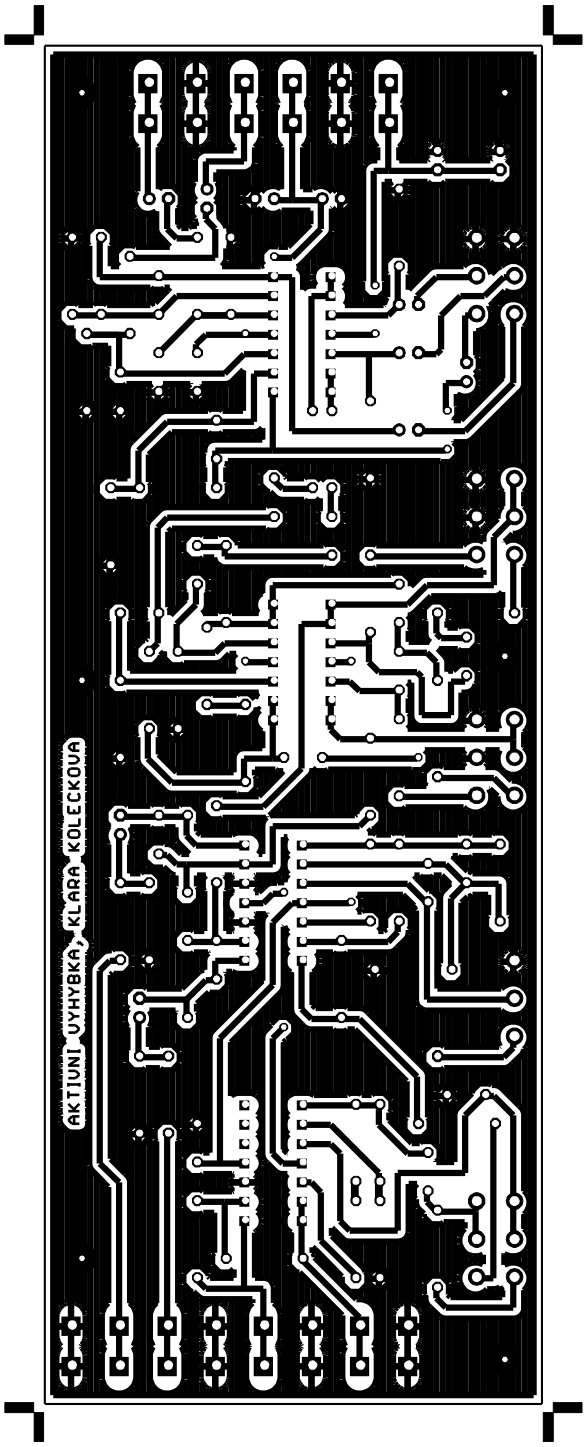


A.5 Deska plošného spoje výhybky – top (strana součástek)



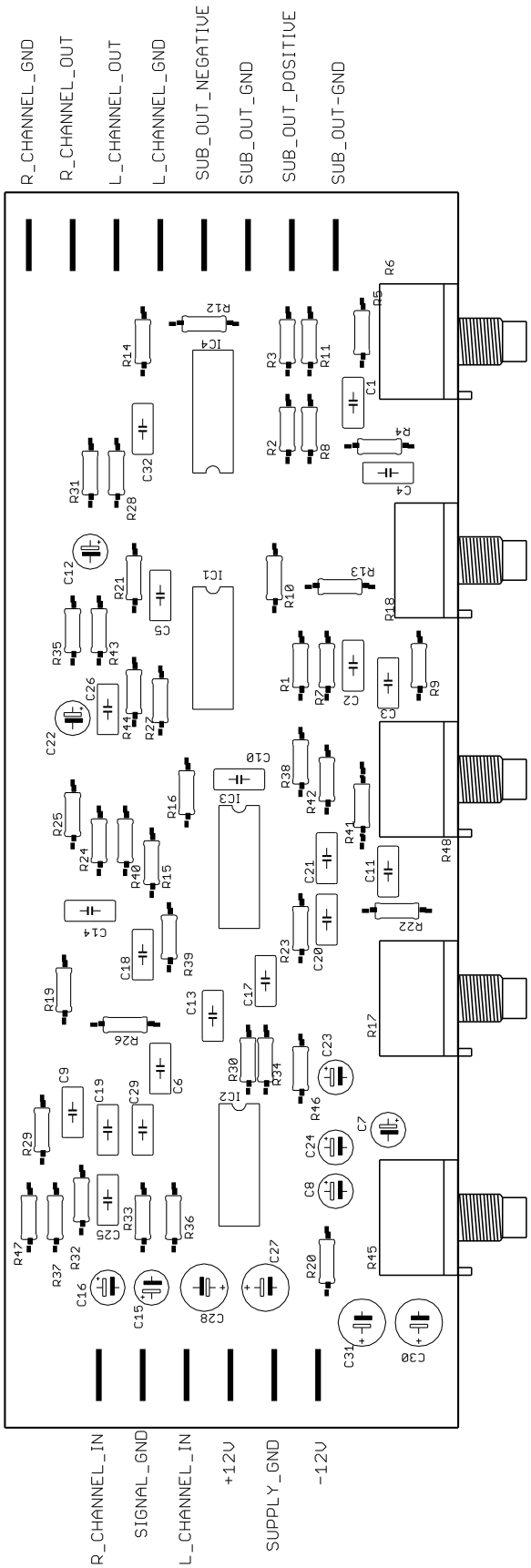
Rozměr desky 179 x 66 [mm], měřítko M1:1

A.6 Deska plošného spoje výhybky – bottom (strana spojů)

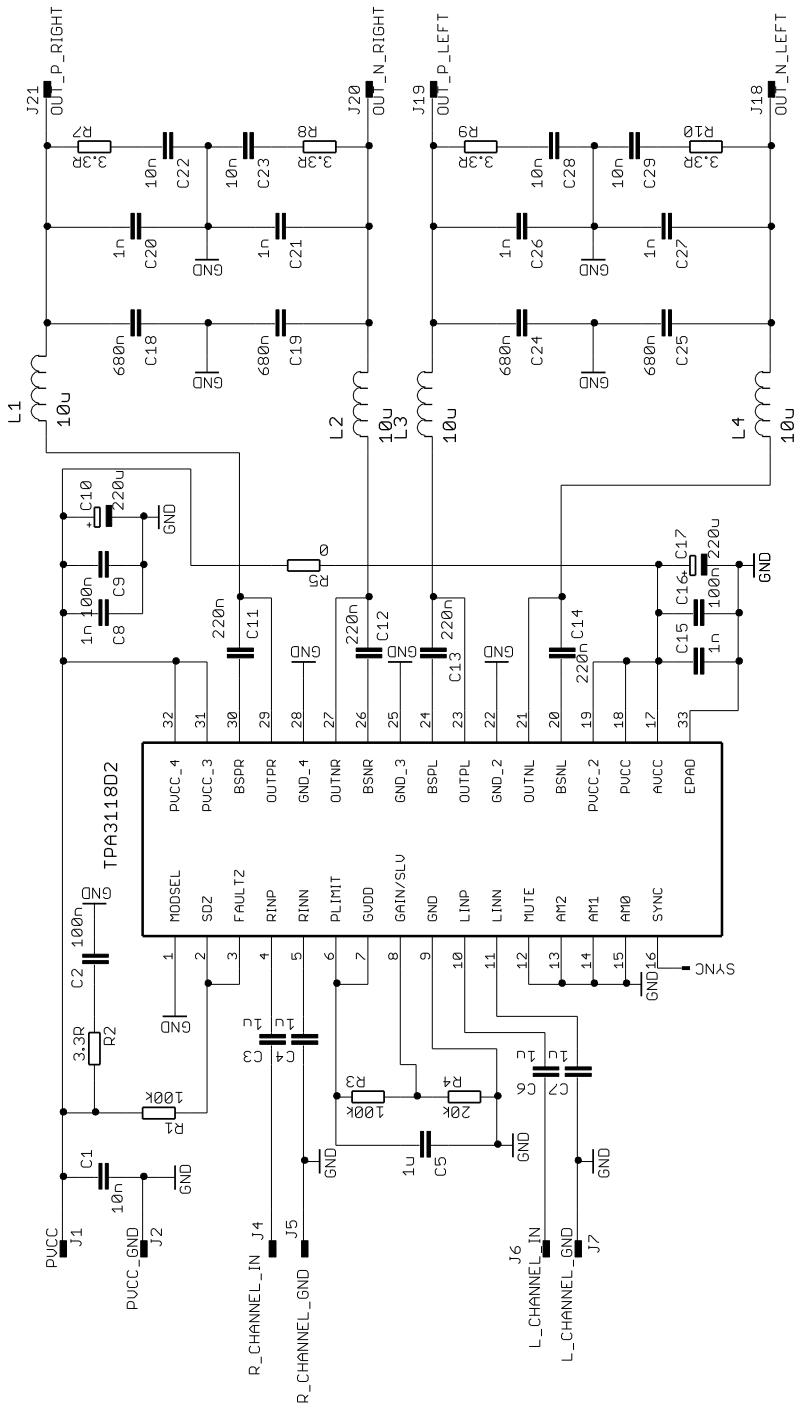


Rozměr desky 179 x 66 [mm], měřítko M1:1

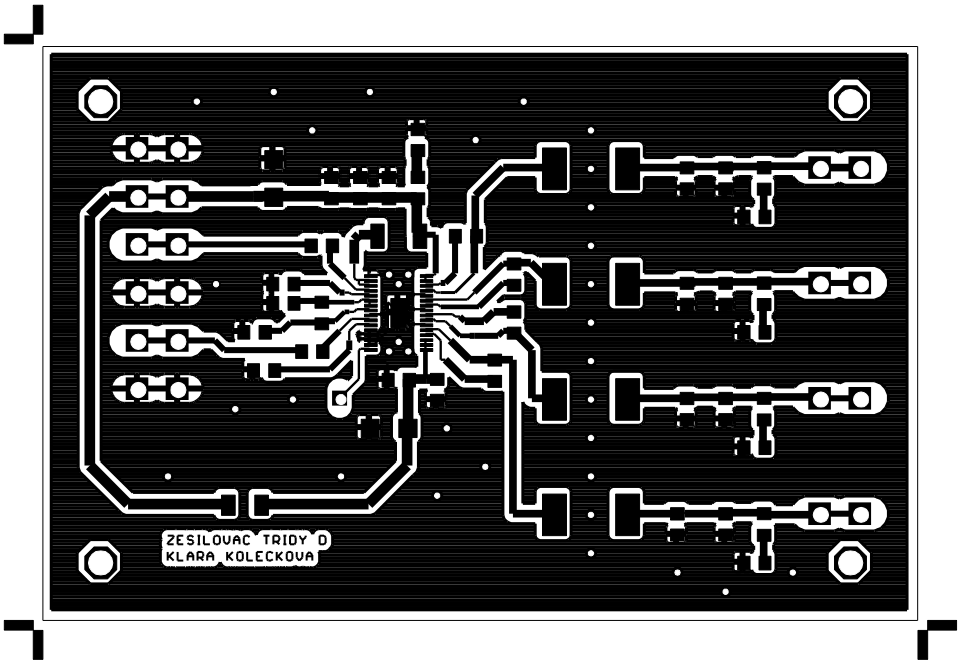
A.7 Osazovací plán výhybky



A.8 Obvodové zapojení středovýškových kanálů

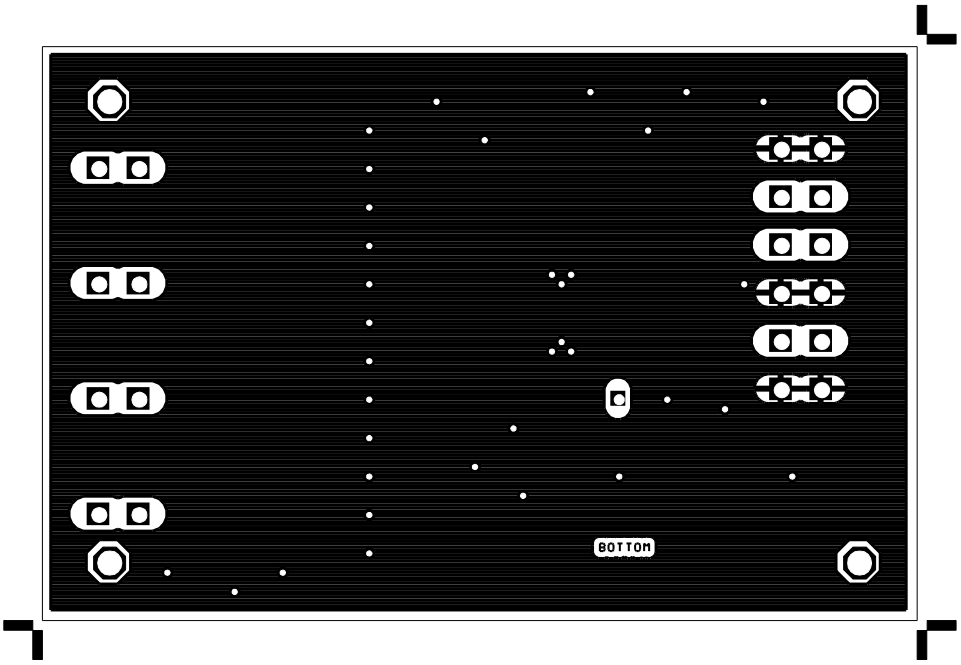


A.9 Deska plošného spoje středovýškových kanálů – top (strana součástek)



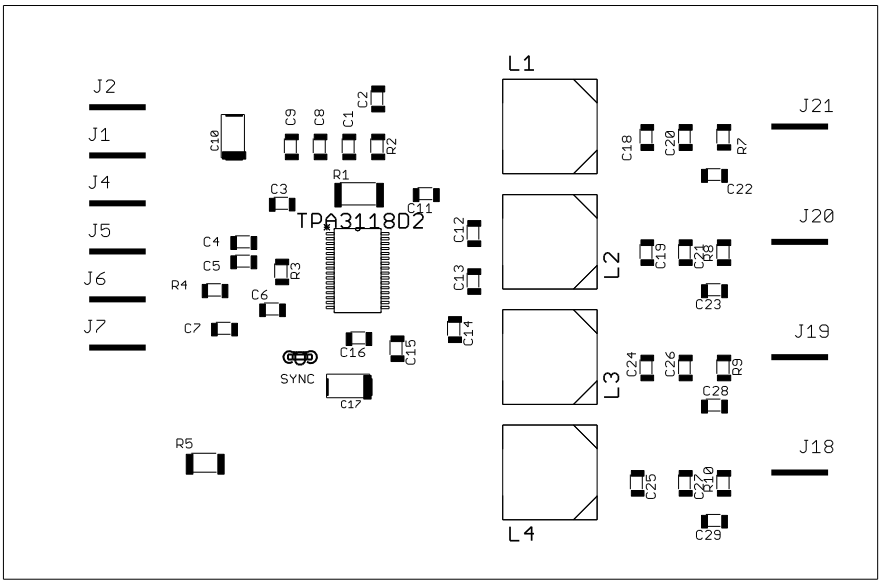
Rozměr desky 116 x 76 [mm], měřítko M1:1

A.10 Deska plošného spoje středovýškových kanálů – bottom (strana spojů)



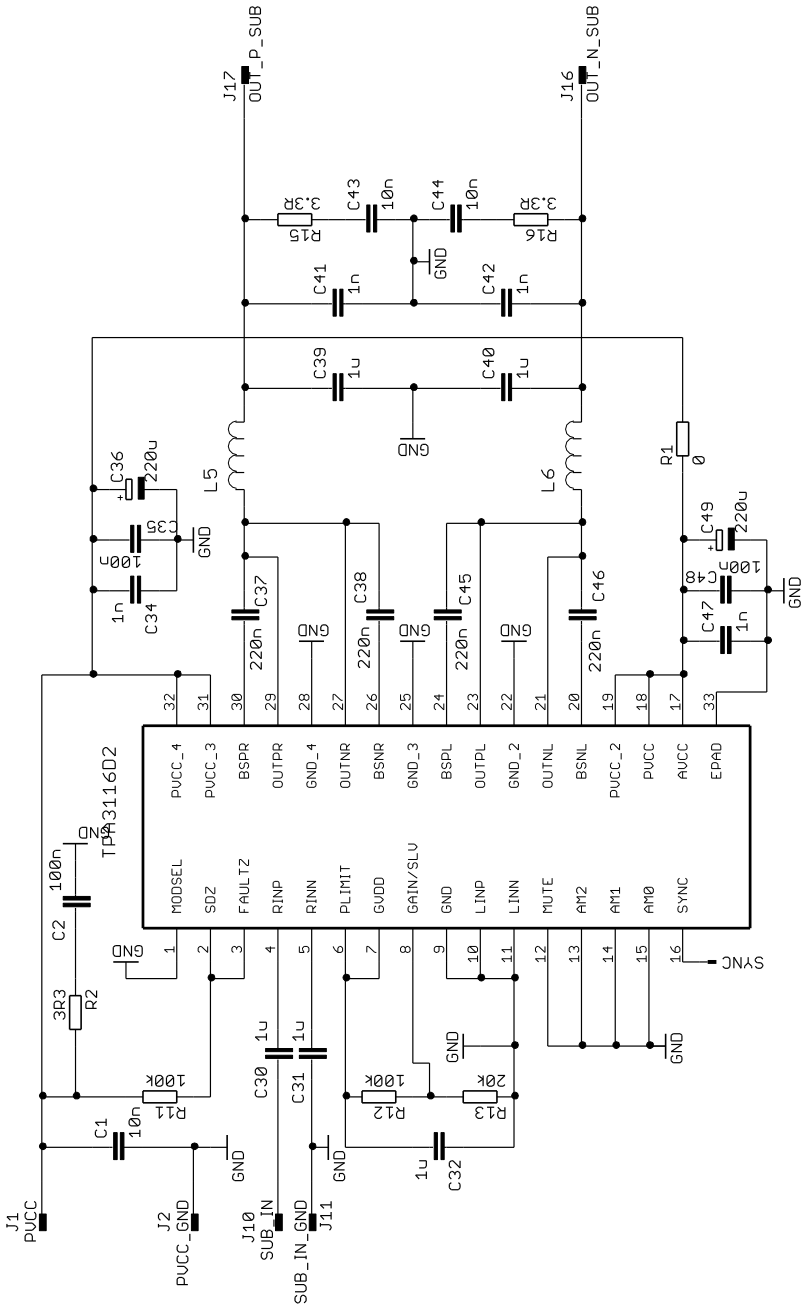
Rozměr desky 116 x 76 [mm], měřítko M1:1

A.11 Osazovací plán středovýškových kanálů

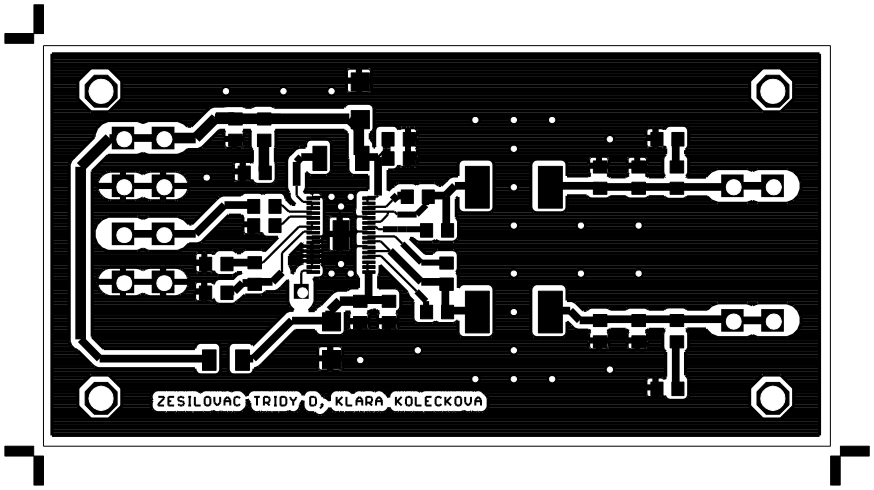


Rozměr desky 116 x 76 [mm], měřítko M1:1

A.12 Obvodové zapojení subwooferu

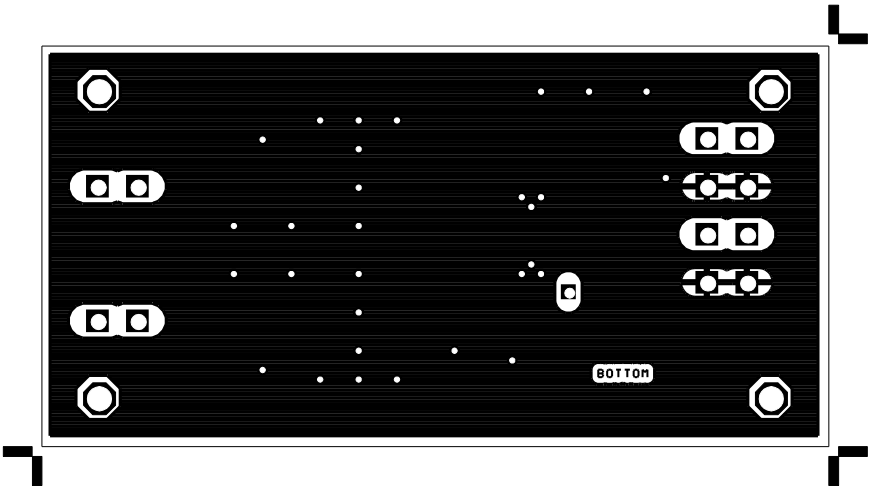


A.13 Deska plošného spoje subwooferu – top (strana součástek)



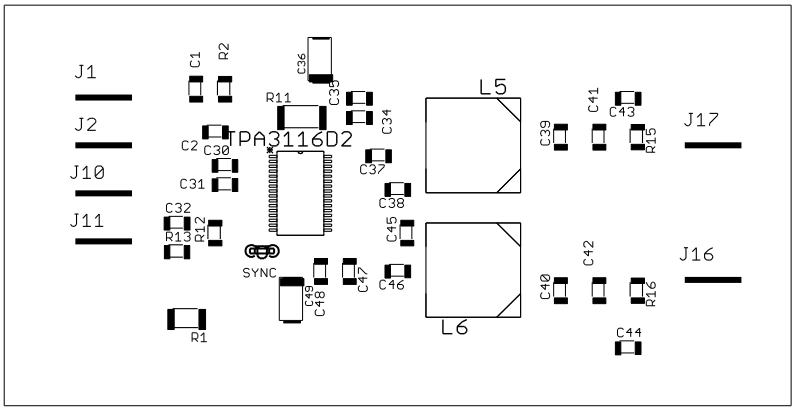
Rozměr desky 104 x 53 [mm], měřítko M1:1

A.14 Deska plošného spoje subwooferu – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 104 x 53 [mm], měřítko M1:1

A.15 Osazovací plán subwooferu



Rozměr desky 104 x 53 [mm], měřítko M1:1

B SEZNAM SOUČÁSTEK

B.1 Seznam součástek napájecí desky

Množství	Hodnota	Pouzdro	Označení	Popis
1	+24V	F061.040	J1	Faston
1	-24V	F061.040	J3	Faston
2	100n	C050-030X075	C3, C4	Keramický kondenzátor
2	330n	C050-030X075	C1, C2	Keramický kondenzátor
1	7812T	TO220H	IC2	Lineární stabilizátor +12 V
1	7912T	TO220H	IC1	Lineární stabilizátor -12 V
1	GND	F061.040	J2	Faston
2	ICTE5	C4111-15	D1, D2	Unipolární transil
1	VYHYBKA+12V	F061.040	J6	Faston
1	VYHYBKA-12V	F061.040	J7	Faston
1	VYHYBKA_GND	F061.040	J5	Faston
1	ZESILOVAC+24V	F061.040	J4	Faston
1	ZESILOVAC_GND	F061.040	J8	Faston

B.2 Seznam součástek výhybky

Množství	Hodnota	Pouzdro	Označení	Popis
2	100	0207/10	R28, R35	Drátový rezistor
2	100n	C050-030X075	C29, C32	Keramický kondenzátor
1	10k	3RP/1610N	R18	Potenciometr mono
18	10k	0207/10	R1, R3, R4, R5, R7, R10, R12, R13, R14, R19, R21, R22, R23, R27, R38, R42, R44, R47	Drátový rezistor
1	10k	0207/12	R41	Drátový rezistor
2	15k	0207/10	R8, R11	Drátový rezistor
4	1k	0207/10	R15, R16, R30, R34	Drátový rezistor

2	1k2	0207/10	R32, R33	Drátový rezistor
1	1n2	C050-030X075	C2	Keramický kondenzátor
4	1u	C050-030X075	C13, C14, C17, C18	Keramický kondenzátor
2	220p	C050-030X075	C9, C19	Keramický kondenzátor
4	220u	E2,5-7	C27, C28, C30, C31	Elektrolytický kondenzátor
8	22k	0207/10	R20, R26, R29, R31, R36, R37, R43, R46	Drátový rezistor
5	22p	C050-030X075	C3, C5, C6, C25, C26	Keramický kondenzátor
8	22u	E2,5-5	C7, C8, C12, C15, C16, C22, C23, C24	Elektrolytický kondenzátor
1	43k	0207/10	R9	Drátový rezistor
1	4k7	0207/10	R2	Drátový rezistor
4	50k	3RP/1610G	R6, R17, R45, R48	Potenciometr stereo
6	68n	C050-030X075	C1, C4, C10, C11, C20, C21	Keramický kondenzátor
4	8k2	0207/10	R24, R25, R39, R40	Drátový rezistor
1	J1	F061.040	SUB_OUT_POSITIVE	Faston
1	J10	F061.040	L_CHANNEL_IN	Faston
1	J11	F061.040	R_CHANNEL_IN	Faston
1	J12	F061.040	+12V	Faston
1	J13	F061.040	SUPPLY_GND	Faston
1	J14	F061.040	-12V	Faston
1	J2	F061.040	SUB_OUT_GND	Faston
1	J3	F061.040	SUB_OUT_NEGATIVE	Faston
1	J4	F061.040	SUB_OUT-GND	Faston
1	J5	F061.040	L_CHANNEL_OUT	Faston
1	J6	F061.040	L_CHANNEL_GND	Faston
1	J7	F061.040	R_CHANNEL_OUT	Faston
1	J8	F061.040	R_CHANNEL_GND	Faston
1	J9	F061.040	SIGNAL_GND	Faston
4	TL074P	DIL14	IC1, IC2, IC3, IC4	Operační zesilovač

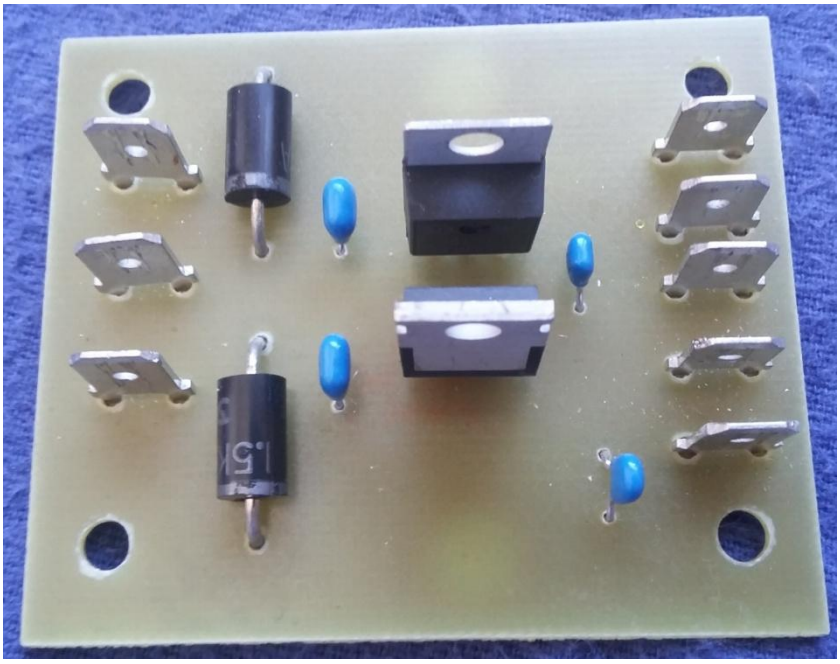
B. 3 Seznam součástek desky středovýškových kanálů

Množství	Hodnota	Pouzdro	Označení	Popis
1		ST2,8	SYNC	Faston
1		SOP65P810X120-33N	TPA3118D2	Zesilovač třídy D
1	0	R2010	R5	SMD rezistor
1	100k	R1206	R3	SMD rezistor
1	100k	R2512	R1	SMD rezistor
3	100n	C1206	C2, C9, C16	Keramický kondenzátor SMD
5	10n	C1206	C1, C22, C23, C28, C29	Keramický kondenzátor SMD
4	10u	INDM125125X800N	L1, L2, L3, L4	Výkonová cívka
6	1n	C1206	C8, C15, C20, C21, C26, C27	Keramický kondenzátor SMD
5	1u	C1206	C3, C4, C5, C6, C7	Keramický kondenzátor SMD
1	20k	R1206	R4	SMD rezistor
4	220n	C1206	C11, C12, C13, C14	Keramický kondenzátor SMD
2	220u	SMC_C	C10, C17	Elektrolytický kondenzátor
5	3.3R	R1206	R2, R7, R8, R9, R10	SMD rezistor
4	680n	C1206	C18, C19, C24, C25	Keramický kondenzátor SMD
1	L_CHANNEL_GND	F061.040	J7	Faston
1	L_CHANNEL_IN	F061.040	J6	Faston
1	OUT_N_LEFT	F061.040	J18	Faston
1	OUT_N_RIGHT	F061.040	J20	Faston
1	OUT_P_LEFT	F061.040	J19	Faston
1	OUT_P_RIGHT	F061.040	J21	Faston
1	PVCC	F061.040	J1	Faston
1	PVCC_GND	F061.040	J2	Faston
1	R_CHANNEL_GND	F061.040	J5	Faston
1	R_CHANNEL_IN	F061.040	J4	Faston

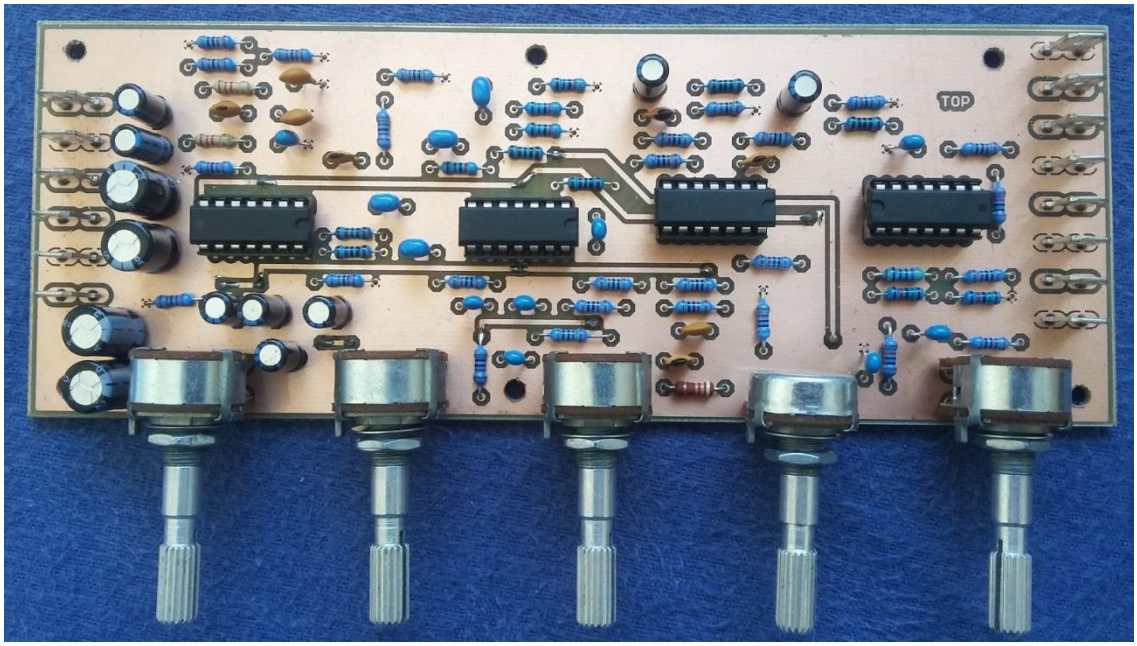
B.4 Seznam součástek subwooferu

Množství	Hodnota	Pouzdro	Označení	Popis
2	10u	INDM125125X800N	L5, L6	Výkonová cívka
1		ST2,8	SYNC	Faston
1		SOP65P810X120-33N	TPA3116D2	Zesilovač třídy D
1	0	R2010	R1	SMD rezistor
1	100k	R1206	R12	SMD rezistor
1	100k	R2512	R11	SMD rezistor
3	100n	C1206	C2, C35, C48	Keramický kondenzátor SMD
3	10n	C1206	C1, C43, C44	Keramický kondenzátor SMD
4	1n	C1206	C34, C41, C42, C47	Keramický kondenzátor SMD
5	1u	C1206	C30, C31, C32, C39, C40	Keramický kondenzátor SMD
1	20k	R1206	R13	SMD rezistor
4	220n	C1206	C37, C38, C45, C46	Keramický kondenzátor SMD
2	220u	SMC_C	C36, C49	Elektrolytický kondenzátor
3	3R3	R1206	R2, R15, R16	SMD rezistor
1	OUT_N_SUB	F061.040	J16	Faston
1	OUT_P_SUB	F061.040	J17	Faston
1	PVCC	F061.040	J1	Faston
1	PVCC_GND	F061.040	J2	Faston
1	SUB_IN	F061.040	J10	Faston
1	SUB_IN_GND	F061.040	J11	Faston

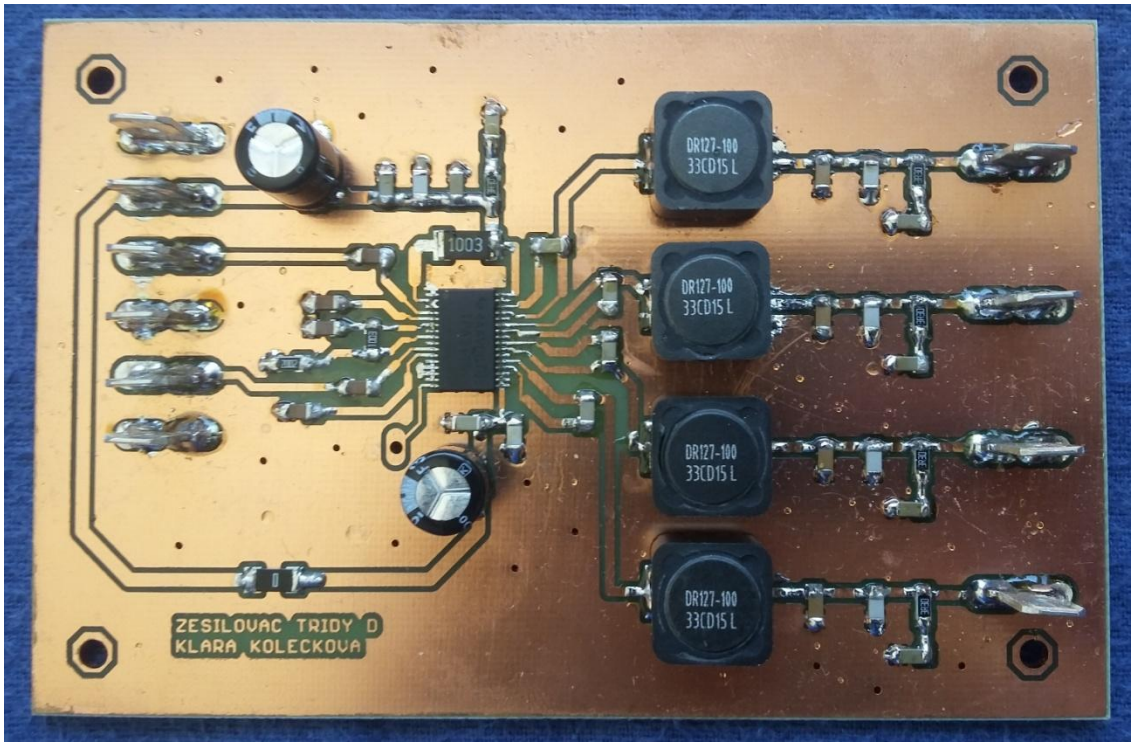
C KONSTRUKCE AUDIO ZESILOVAČE



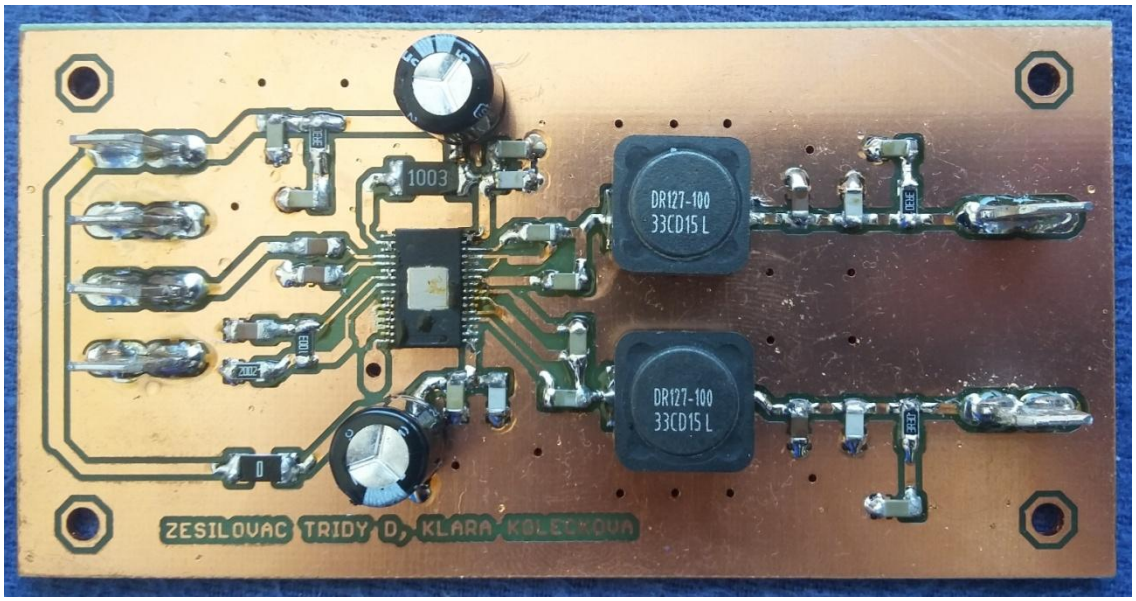
Deska ochrany napájení



Aktivní výhybka



Zesilovač pro středovýškové frekvence



Subwoofer