



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH A REALIZACE AUDIO ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ D ŘÍZENÉHO MIKROKONTROLÉREM

DESIGN AND REALIZATION OF D CLASS AUDIO AMPLIFIER CONTROLLED BY
MICROCONTROLLER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ALEŠ DOBESCH

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. FILIP ADAMEC

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Aleš Dobesch

ID: 115509

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a realizace audio zesilovače ve třídě D řízeného mikrokontrolérem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte možnosti sestavení výkonového zesilovače ve třídě D a předzesilovače audio signálu.

Navrhněte a realizujte hardware zesilovače a provedte jeho oživení.

Vytvořte ovládací software pro řídicí mikrokontrolér a měřením ověřte parametry zesilovače jako zkreslení, šum atd.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Texas Instruments, Audio Selection and Solution Guides [online]. 2010 - [cit. 31 května 2010].

Dostupné na www: [http://focus.ti.com/apps/docs/appcategory.tsp?appld=1&DCMP=](http://focus.ti.com/apps/docs/appcategory.tsp?appld=1&DCMP=TIHomeTracking&HQS=Other+OT+home_a_audio)

[TIHomeTracking&HQS=Other+OT+home_a_audio](http://focus.ti.com/apps/docs/appcategory.tsp?appld=1&DCMP=TIHomeTracking&HQS=Other+OT+home_a_audio)

[2] MAXIM , MAX5406 [online]. 2010 - [cit. 31. května 2010]. Dostupné na www:

http://www.maxim-ic.com/quick_view2.cfm/qv_pk/4849

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 27.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Filip Adamec

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je navrhnout a zkonstruovat zesilovač malých rozměrů pracující ve třídě D s využitím moderních integrovaných obvodů. Dále tento zesilovač doplnit o ovládací software a změřit jeho parametry. Práce popisuje princip zesilovačů ve třídě D, výběr komponentů pro konstrukci a samotnou realizaci zařízení. Řídicí jednotku zesilovače tvoří mikrokontrolér AVR ATmega164PA. Zesilovač je doplněn o dálkové ovládání s použitím vysokofrekvenčních modulů a efektní krabičku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zesilovač ve třídě D, PWM, mikrokontrolér AVR, LCD displej, dálkové ovládání, napájecí zdroj, funkce, parametry.

ABSTRACT

The aim of the bachelor's thesis is to design and construct D Class power amplifier of small proportions using modern integrated circuits. Implement a control software and measure parameters. Thesis describes principle of D Class power amplifiers, choosing suitable components and complete hardware device solution. Control unit is provided by microcontroller AVR ATmega164PA. This power amplifier is extended with radio remote control and effective box.

KEYWORDS

D Class power amplifier, PWM, microcontroller AVR, LCD display, remote kontrol, power supply, function, parameters.

DOBESCH, A. *Návrh a realizace audio zesilovače ve třídě D řízeného mikrokontrolérem..*
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
Ústav radioelektroniky, 2011. 55 s. Semestrální práce. Vedoucí práce: ing. Filip Adamec.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma Návrh a realizace zesilovače ve třídě D řízeného mikrokontrolérem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální 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. Filipu Adamcovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Obsah

1. Pracovní třída D	6
1.1.Obecně k pracovní třídě D	6
1.2.Popis funkce pracovní třídy D	7
2. Integrované obvody a klíčové prvky použité v konstrukci	9
2.1.Nf předzesilovač s MAX5406	9
2.2.Výkonový zesilovač MAX9707	9
2.3.Mikrokontrolér ATmega164PA	10
2.4.LCD displej	11
2.5.Rotační enkodér	12
2.6.Vf moduly	13
3. Návrh zapojení	16
3.1.Předzesilovač a koncové stupně	16
3.2.Řídicí a zobrazovací jednotka	16
3.3.Dálkové ovládání	19
3.4.Zdroj napájení	20
4. Konstrukce a návrh desky plošných spojů	23
4.1.Návrh v editoru DPS EAGLE	23
4.2.Konstrukce	24
4.3.Oživení	25
5. Řídicí software	26
5.1.Hlavní program	26
5.2.Program vysílače dálkového ovládání	30
6. Parametry audiozesilovače	32
6.1.Výstupní výkon audiozesilovače	33
6.2.Modulová kmitočtová charakteristika	35
6.3.Vstupní odpor zesilovače	38
6.4.Výstupní odpor zesilovače	38
6.5.Činitel tlumení a vnitřní odpor	39
6.6.Celkové harmonické zkreslení THD+N	39
7. Krabička audiozesilovače	40
8. Závěr	42

Seznam obrázků

1.1.	Účinnost pracovní třídy D	6
1.2.	Pulzně šířková modulace	7
1.3.	Obecné schéma zapojení zesilovače pracující ve třídě D	8
2.1.	Pouzdro TQFP ATmegy 164PA	10
2.2.	Jednotlivé vývody LCD displeje	11
2.3.	Ukázka 4 bitové komunikace[10]	12
2.4.	Průběhy signálů enkodéru	13
2.5.	Ukázka FSK modualce	14
2.6.	Vysílací modul	14
2.7.	Přijímací modul	15
3.1.	Blokové schéma zesilovače	16
3.2.	Časování impulsů pro předzesilovač	17
3.3.	Příklad zobrazení displeje	17
3.4.	Ovládaní podsvícení	18
3.5.	Hlídaní teploty koncových stupňů	18
3.6.	Schéma zapojení a DPS	19
3.7.	Zdroj napájení	21
4.1.	Schématické značky a jejich pouzdra v EAGLE	23
4.2.	Ukázka SMD součástek a jejich velikostí	24
4.3.	Ukázka pájení pouzder TSSOP a TQFN	25
5.1.	Blokové schéma dálkového ovládaní a zesilovače	26
5.2.	Vývojový diagram hlavního programu	27
5.3.	Zobrazování LCD displeje: a, b, c, d, e	28
5.4.	Deklarace struktury a její naplnění	28
5.5.	Ukázka funkce kontroly přijatého znaku	29
5.6.	Vývojový diagram programu vysílače dálkového ovládaní	30
5.7.	Ukázka kódu v jazdyci C vysílaného symbolu jednotkou USART	31
6.1.	Schéma zapojení a fotka výstupního LC filtru	32
6.2.	Přenosová charakteristka filtru simulovaná v programu TINA	32
6.3.	Graf závislosti výkonu zesilovače na frekvenci vstupního signálu	34
6.4.	Graf modulové kmitočtové charakteristiky zesilovače	36
6.5.	Graf modulové kmitočtové charakteristiky subwooferu	37
6.6.	Modulová kmitočtová charakteristika měřená audio analyzátoem pro levý a pravý kanál	38
7.1.	3D model krabičky a finální verze krabičky	40
7.2.	Rozmístění elektroniky v krabičce	41
8.1.	Schéma zapojení	48
8.2.	Vrchní strana DPS zesilovače	49
8.3.	Spodní strana DPS zesilovače	49
8.4.	Osazení vrchní strany DPS zesilovače	50
8.5.	Osazení spodní strany DPS zesilovače	50
8.6.	DPS napájecího zdroje	51
8.7.	Osazená DPS napájecího zdroje	51
8.8.	DPS enkodéru	52
8.9.	Osazení DPS enkodéru	52

8.10. Fotka z vývoje zesilovače	53
8.11. Fotky z výroby krabičky	53
8.12. Pohled dovnitř krabičky	54
8.13. Spodní a horní část krabičky zesilovače	54
8.14. Přední pohled na zesilovač	55

Seznam tabulek

1.	Parametry předzesilovačů	9
2.	Popis jednotlivých vývodů LCD displeje	12
3.	Nastavení rozsahů teplot	19
4.	Tabulka naměřených hodnot výkonů L+P kanálu audiozesilovače	33
5.	Tabulka naměřených hodnot výkonů subwooferu audiozesilovače	34
6.	Modulová kmitočtová charakteristika zesilovače	35
7.	Modulová kmitočtová charakteristika subwooferu	36
8.	Tabulka naměřených hodnot celkového harmonického zkreslení	39

Úvod

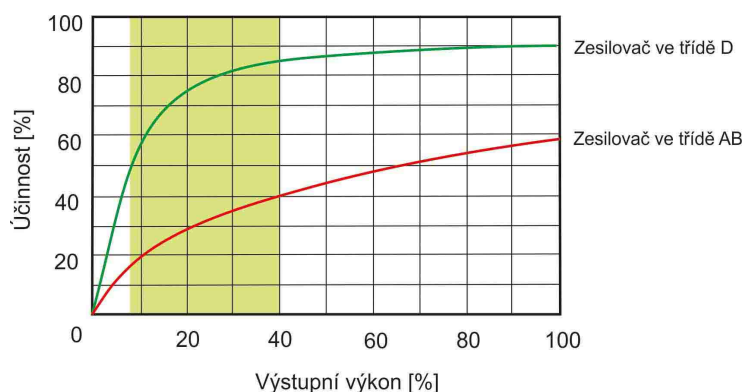
Nízkofrekvenční výkonové zesilovače jsou zařízení sloužící k zesílení audio signálu na požadovanou výstupní úroveň pro následnou reprodukci. Každý takový zesilovač se skládá z bloků vstupního předzesilovače, který může být doplněn o korekční úpravu signálu a koncového stupně, jehož úlohou je hudební signál dostatečně zesílit. Samozřejmostí je propracované uživatelské rozhraní ovládání, případně vhodné vnější designérské zpracování u zesilovačů pro domácí použití. Podle toho, jak zesilovače zpracovávají a zesilují vstupní signál, je možné je rozdělit do několika základních pracovních tříd, a to A, AB, C, které patří mezi nejpoužívanější. V současné době, ale zesilovačům vévodí jednoznačně třída D s různými dalšími mutacemi, označována jako digitální, mezi jejíž hlavní výhody patří především vysoká účinnost a malé rozměry.

Úkolem této Bakalářské práce bylo navrhnout a zkonstruovat audio zesilovač velmi malých rozměrů pracující ve třídě D, řízený mikrokontrolérem s možností bezdrátového ovládání, jednoduché obsluhy a základních funkcí jako jsou korekce, kontrola teploty koncových stupňů, MUTE a další. Základními kameny celého zesilovače jsou integrované obvody firmy MAXIM MAX5406 ve funkci korekčního předzesilovače a MAX9709, což je miniaturní blok koncového stupně dosahující výkonu až 50W rms., je-li zapojen do můstku. Zesilovač bude v provedení 2+1. To představuje dva satelity a subwoofer. Celý tento audiozesilovač je řízený mikrokontrolérem ATmega 164PA firmy Atmel.

1. Pracovní třída D

1.1. Obecně k pracovní třídě D

Zesilovače v této třídě, jak už bylo zmíněno, vynikají především svou vysokou účinností, a to až 80-90%. Z toho plyne, že tepelné ztráty se pohybují okolo 10%, což je v porovnání třeba se třídou AB, u které se ztráty pohybují okolo 40-50%, nesrovnatelné. Rozdíly účinností obou tříd jsou zřejmé z následujícího obrázku 1.1. Díky vysoké účinnosti je také možné ožehat masivní chlazení i u výkonů pohybujících se v desítkách wattů, u třídy AB nemožné. To spěje k neuvěřitelné miniaturizaci takovýchto integrovaných zesilovačů, kterým k funkci postačuje jen několik málo externích součástek, jako jsou především filtrační a blokové kondenzátory a další pomocné prvky.



Obrázek 1.1: Účinnost pracovní třídy D

Ve spojení s povrchovou montáží SMT je tak výsledkem velmi malé kompaktní zařízení, které je možno snadno zabudovat téměř kdekoliv. Samozřejmě je brána v potaz i finanční stránka, která je taktéž velice zajímavá a otvírá budoucnost takovým zesilovačům ve světě elektroniky, hlavně co se týče spotřební a automobilové audiotechniky. Někdo může podotknout, že tyto zesilovače skýtají nevýhody v oblasti parametrů, stability, či potřeby LC filtrů. To je ovšem v současné době minulost, jelikož moderní koncepty integrovaných obvodů pracujících ve třídě D nabízejí špičkové parametry, přinejmenším srovnatelné se třídou AB, bez potřeby výstupních LC filtrů při splnění určitých podmínek. Jednou z nich je délka vodičů k reproduktorům. S její rostoucí délkou dochází k většímu elektromagnetickému vyzařování vysokých frekvencí, což je nežádoucí. Proto by tato délka měla být co nejkratší, případně vyzařování omezit stíněním těchto vodičů, či zmiňovanými LC filtry. Tendence je ale LC filtry úplně odstranit za pomoci nových technologií, například rozproštěním modulačního spektra.

U konstrukce zesilovačů v třídě D z diskrétních součástek je obtížné dosáhnout kvalitních parametrů, kde nastanou velké problémy se stabilitou zesilovače, šířkou přenášeného pásma atd. Další důležité hledisko je návrh desky plošných spojů, kde je nutno dbát pravidel v

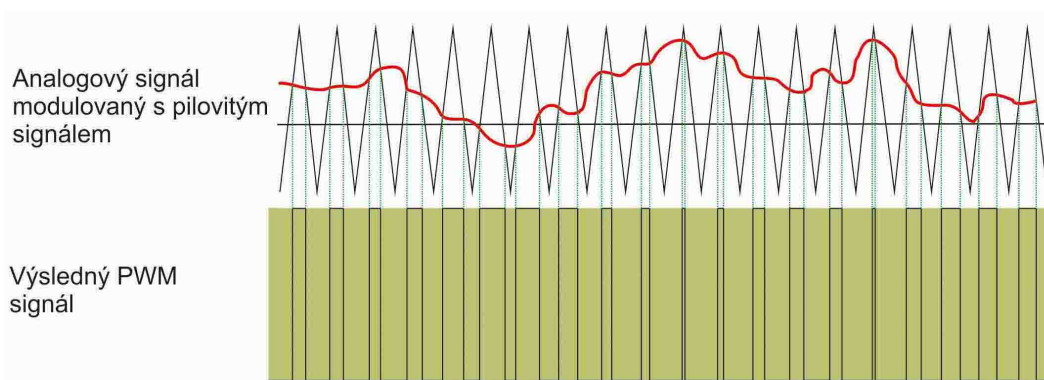
návrhu.

Integrované obvody velkých firem v sobě skrývají již propracované konstrukční a programové “know-how”, což značně usnadňuje celou konstrukci audio zesilovače a konstruktér se tak vyhne nechtěným problémům. Nevýhoda snad může být jen v řešení pouzdra integrovaného obvodu, které je zpravidla co nejmenší a zde může nastat problém v amatérském prostředí.

Asi největším průkopníkem zesilovačů ve třídě D byla firma Tripath, která pro své produkty dokonce zavedla svůj vlastní název třídy, třídu T. To je značně vylepšená třída D dosahující výkonů v jednotkách kW. Bohužel už tato firma zkrachovala navzdory kvalitě svých výrobků. V současnosti mezi firmy zabývající se digitálními zesilovači patří Texas Instruments, Analog Devices, STMicroelectronics nebo Maxim.[1, 2]

1.2. Popis funkce pracovní třídy D

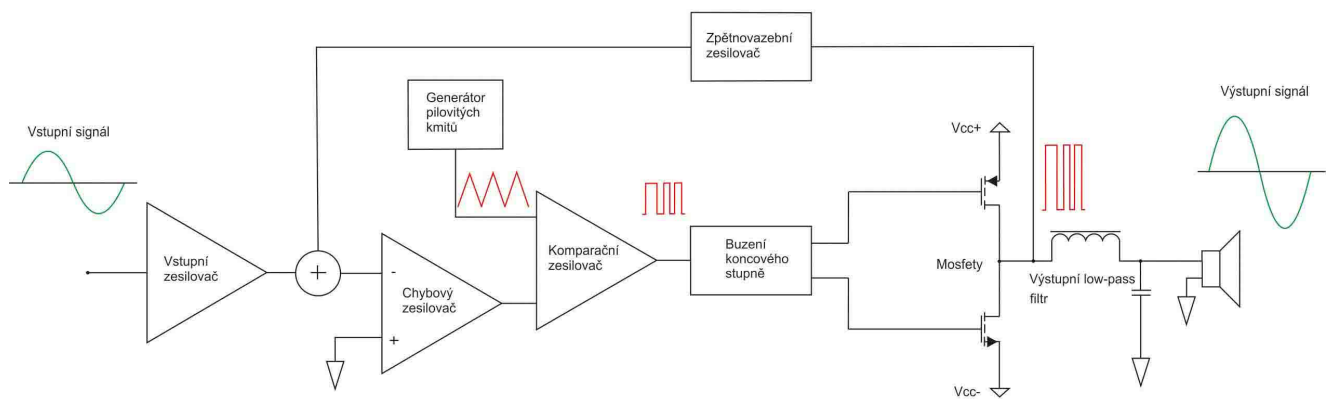
Zesilovače v pracovní třídě D fungují obecně na principu pulzně šířkové modulace PWM (Pulse Width Modulation). Dalšími principy těchto zesilovačů jsou PDM (Pulse Density Modulation) a delta-sigma modulace, ale pro názornost bude brána v potaz pouze prvně zmiňovaná a zjednodušená PWM modulace. Její princip je vidět na obrázku 1.2. Vstupní analogový audio signál je modulován spolu s trojúhelníkovým nebo pilovitým signálem řádově vyššího kmitočtu (běžně 10krát). Pokud je úroveň audio signálu větší, než úroveň pilovitého signálu, nastává logická nula. Ovšem, když se úroveň pilovitého signálu dostane nad úroveň audio signálu, v tom okamžiku se překlápí stav do logické jedničky a výsledkem je PWM signál, což je obdélníkový signál různé střídy. Takto namodulovaný signál je spínací mechanismus pro nejčastěji používané MOSFET tranzistory tvořící koncový stupeň, které mají pouze dva stavy, a to sepnuto v logické jedničce a vypnuto v logické nule. Tranzistory pracují ve spínacím režimu, a tím je dosažena zmiňovaná vysoká účinnost.



Obrázek 1.2: Pulzně šířková modulace

Na obrázku 1.3 je celkové zapojení zesilovače ve třídě D s PWM modulací a je složeno

z pěti základních bloků. První blok je vstupní zesilovač, který nízkofrekvenční signál zesiluje a impedančně přizpůsobuje. U zesilovačů s digitálním vstupem jsou vstupní obvody zpracovávající přímo digitální signál. Druhý blok tvoří zpětnovazební zesilovač, který upravuje výstupní signál z koncového stupně a přivádí jej na chybový zesilovač, třetí základní blok. Ten signál porovnává se vstupním signálem a ze zpětnovazebního signálu mu je přidávána stejnosměrná složka. Chybový zesilovač tak v podstatě řídí PWM modulátor, kde je chybový signál modulován s pilovitým. Posledním blokem je koncový stupeň tvořen budícími obvody výkonových tranzistorů, které jsou následně buzeny a namodulovaný signál zesílí. Ten je přiveden na výstupní LC filtr, který odstraní nežádoucí vysoké kmitočty modulace a složky vyšší harmonické.[2, 3]



Obrázek 1.3: Obecné schéma zapojení zesilovače pracující ve třídě D

2. Integrované obvody a klíčové prvky použité v konstrukci

2.1. Nf předzesilovač s MAX5406

Nízkofrekvenční předzesilovač je obecně zařízení, které zpracovává a upravuje vnější vstupní audiosignál, který je přiváděn na jeho vstup. Požadavky na každý takový předzesilovač jsou zesílit vstupní signál za jeho minimálního nežádoucího ovlivnění. Především jde o celkové harmonické zkreslení, odstup signál/šum, dostatečná šířka přenášeného pásma, impedanční přizpůsobení, signálová korekce.

V této konstrukci byl zapotřebí předzesilovač, který splňuje výše uvedené nároky, je snadný na ovládání, jeho pořizovací náklady jsou přijatelné. Navíc byl předem vybrán koncový stupeň zesilovače výrobce MAXIM, proto bylo vhodné použít předzesilovač stejného výrobce a právě zmiňovaný MAX5406 je přímo dělaný pro spojení s koncovým stupněm MAX9709. Z tohoto i dalších důvodů byl zvolen integrovaný obvod firmy MAXIM MAX5406, audio předzesilovač zpracovávající analogový audio signál. Jeho ovládání je možné pomocí obyčejného rozhraní tlačítek nebo také pomocí mikrokontroléru. Obvod nabízí dvojici diferenčních vstupů, regulaci hlasitosti zajištěnou vnitřní dvojicí logaritmických potenciometrů ve 32 krocích, vyvážení, regulaci výšek a hloubek. Kromě toho má obvod v sobě užitečný MONO výstupní kanál pro subwoofer. Samozřejmostí jsou funkce jako SHUTDOWN a MUTE. V konstrukci je vycházeno z doporučeného zapojení od výrobce. Všechny další informace a parametry obvodu jsou k dispozici v katalogovém listu.[4]

Mezi dalšími uvažovanými obvody byly PT2318 firmy PTC [5] a TAS3108 firmy Texas Instruments.[6] V prvním případě nevyhovovaly parametry a velikost napájecího napětí daného obvodu. V druhém případě se jedná o poměrně složitý audioprocesor náročný jak na softwarovou, tak hardwarovou stránku a značně přesahoval náklady samotných koncových stupňů. Porovnání parametrů obvodů lze vidět v tabulce 1.

	Napájení	Signál/šum	Harm. zkreslení	Separace kanálů	Řízení
MAX5406	2.7-5.5V	88dB	0.02%	>-70dB	Buttons/MCU
PT2318	7.5/9.5V	83dB	0.07%	>-90dB	I2C MCU

Tabulka 1: Parametry předzesilovačů

2.2. Výkonový zesilovač MAX9707

Integrovaný obvod MAX9709 je audio zesilovač pracující ve třídě D, který nabízí výstupní výkon až 2x25W rms pro zátěž 8 Ohm a 1x50W pro zátěž 4 Ohmy, kdy je obvod zapojen do můstku. Účinnost tohoto obvodu je výrobcem udávána až 87%, díky čemuž jsou omezeny tepelné ztráty a obvod si vystačí pouze s malým pasivním chlazením. Napájecí napětí je nesymetrické a může se pohybovat v rozmezí 10-23V. Maximálního výkonu zesilovač dosáhne právě při napájecím napětí 23V. Dále tento obvod nabízí výběr mezi dvěma typy modulace, s pevně danou frekvencí modulace (FFM) nebo s rozprostřeným spektrem modulace (SSM).

Druhý zmiňovaný typ je použitý v této konstrukci k redukci elektromagnetického vyzařování při absenci LC filtrů.

Největší výhodou tohoto obvodu je právě možnost absence výstupních LC filtrů při zachování dobrých parametrů. Pouze ale při dodržení některých podmínek, jak už byl řečeno. Zajímavou funkcí obvodu je možnost nastavení teploty, při jejímž překročení na daném vývodu přejde logická úroveň do nuly a to je využito pro monitorování teploty čipů. Signálové vstupy integrovaného obvodu jsou plně diferenční s možností nastavení vstupní úrovně signálu na hodnotu 22dB, 25dB, 29,5dB a 36dB. Samozřejmostí je vnitřní nadproudová a teplotní ochrana. V konstrukci je využit obvod v pouzdru TQFN o rozměrech 8x8x0,8mm s 56 vývody. Zapojení obvodu je opět podle doporučení výrobce. Další parametry, vnitřní blokové schéma a informace o obvodu jsou v katalogovém listu.[7]

2.3. Mikrokontrolér ATmega164PA

Mikrokontrolér ATmega164PA výrobce Atmel patří do rodiny AVR, kde spadají také další tři řady mikrokontrolérů tinyAVR, AVR XMEGA a AVR UC3. Všechny tyto obvody vychází z tzv. RISC architektury, využívající redukovanou instrukční sadu, která je jednoduchá a vysoce optimalizovaná. Každá řada se od sebe odlišuje svým provedením, parametry, výkonem, nabídkou periférií, velikostmi pamětí aj. Předností řady megaAVR jsou především nízké napájecí požadavky a pro konstruktéra dostupná škála periférií. Zvolená ATmegaxx4PA je nová řada 8-bitových mikrokontrolérů s vnitřní programovou pamětí o velikostech 16, 32, 64 a 128kB. Využitím najde především v embedded systémech a všude tam, kde je potřeba velké paměti pro rozsáhlé programové kódy. V této konstrukci zesilovače postačuje právě ATmega164PA v pouzdru TQFP (obrázek 2.1) se 44 vývody. Všechny parametry, vnitřní architekturu, popis MCU lze nalézt v katalogovém listu.[8]



Obrázek 2.1: Pouzdro TQFP ATmegy 164PA

Co se týče programování, je využito sériového způsobu nazvaného ISP (In System Programming). To znamená, že obvod lze programovat, i když je už zapojen a zapájen na desce, narozdíl od paralelního programování. To usnadňuje mnoho práce při vývoji a ladění soft-

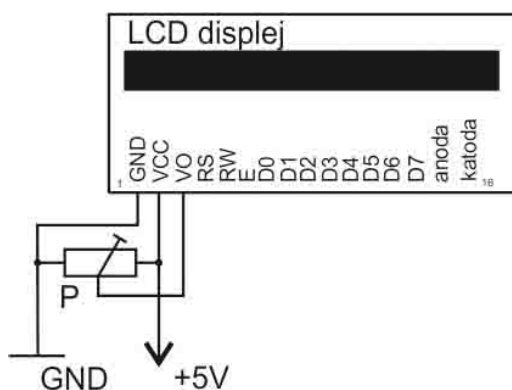
waru. U sériového programování jsou použity čtyři vývody mikrokontroléru, konkrétně MOSI (Master Out, Slave In), MISO (Master In, Slave Out), SCK (Serial Clock) a Reset. [9]

2.4. LCD displej

LCD (Liquid Crystal Display) displeje jsou nedílnou součástí embedded systémů. Co se týče provedení, existuje široká nabídka variant a provedení těchto displejů. Jednořádkové (8x1), dvouřádkové(16x2), čtyřřádkové(20x4), modře podsvícené, bílé, červeně nebo bez podsvícení.

Pro snadné řízení mají tyto displeje v sobě integrovaný řadič firmy HITACHI HD44780. Tento řadič zahrnuje v sobě vlastní znakovou sadu i interní paměť CGRAM pro uživatelem vytvořené znaky v matici 5x8 bodů, ale pouze omezeně na 8 znaků. Dále může adresovat maximálně 80 znaků, proto u větších displejů jako jsou například čtyřřádkové (40x4), hodně používané v průmyslu, jsou tyto řadiče dva.

Na obrázku 2.2 jsou vidět jednotlivé vývody displeje a v tabulce 2 jejich popis. Existují dva základní typy datové komunikace mezi LCD displejem a mikrokontrolérem. Prvním z nich je 8bitová komunikace, která potřebuje všech 8 datových pinů a 3 řídicí vývody RS, RW a E. Celkem je to 11 vývodů připojených k MCU, což je značně nepraktické. Proto se nejčastěji využívá 4bitová komunikace, kde jsou použity jen 4 horní datové piny (D4-D7) a komunikace probíhá v časovém multiplexu, kde je 8bitové slovo rozděleno do dvou niblů. K této komunikaci stačí už jen 7 vývodů MCU a řízení displeje tak zvládne jeden port. Na obrázku 2.3 je příklad 4bitové komunikace přenosu slova 0b11110000.[10, 11]

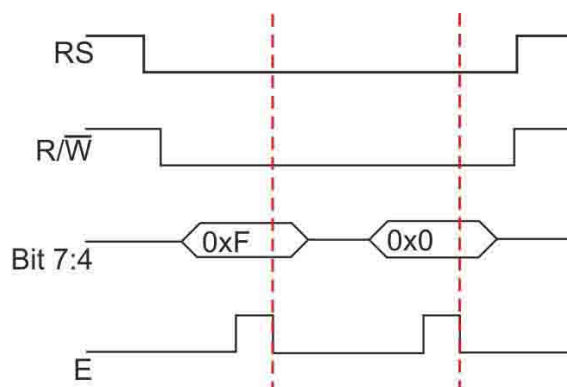


Obrázek 2.2: Jednotlivé vývody LCD displeje

V konstrukci zesilovače je použit dvouřádkový modře podsvícený LCD displej MC1602C8-SBLW firmy EVERBOUQUET INTERNATIONAL CO., LTD.[12]

1.	GND	Zem
2.	VCC	Napájecí napětí 3.3 - 5V
3.	VCO	Nastavení kontrasti
4.	RS	Instrukce (0), data (1)
5.	R/W	Zápis (0), čtení (1)
6.	E	Řídicí (startovací) signál
7.	Bit 0	Nepoužit u 4 bitové komunikace
8.	Bit 1	Nepoužit u 4 bitové komunikace
9.	Bit 2	Nepoužit u 4 bitové komunikace
10.	Bit 3	Nepoužit u 4 bitové komunikace
11.	Bit 4	
12.	Bit 5	
13.	Bit 6	
14.	Bit 7	
15.	Anode	Podsvícení, anoda
16.	Katoda	Podsvícení, katoda

Tabulka 2: Popis jednotlivých vývodů LCD displeje



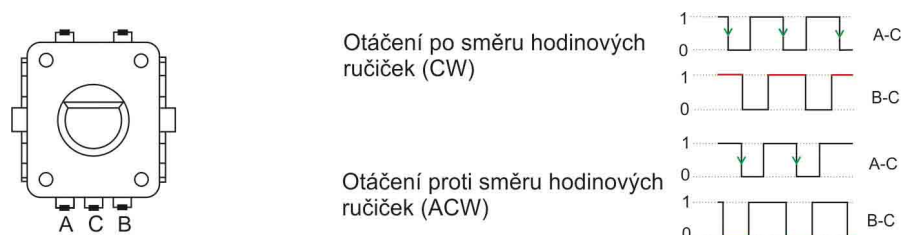
Obrázek 2.3: Ukázka 4 bitové komunikace[10]

2.5. Rotační enkodér

Rotační enkodér je součástka používaná v celé řadě elektronických zařízení, jako jsou monitory, audiosoustavy, měřicí přístroje, kde slouží jako nastavovací prvek. V průmyslových zařízeních tvoří zpětnou vazbu pohonům a jsou označovány jako inkrementální čidla. V této konstrukci se jedná o mechanický rotační enkodér, který nahrazuje tři obyčejná tlačítka a je elegantním řešením ovládání zesilovače. Oproti mechanickým enkodérům existují ještě i přesnější optické enkodéry, v běžných konstrukcích zbytečné.

Podstatou rotačního enkodéru je jednoduše řečeno spínání dvou vývodů vůči třetímu, který je uzemněn. Otáčením enkodéru dochází ke generování dvou obdélníkových signálů,

kteře jsou vůči sobě fázově posunuty zhruba o 90°. Na následujícím obrázku 2.4 je vidět princip generování impulsů, z nichž je následně možno určit, zda bylo enkodérem otočeno vlevo (anti-clockwise direction - ACW) nebo vpravo (clockwise direction - CW). První signál je porovnáván s druhým, a pokud bylo otočeno vlevo (ACW), sestupné hraně prvního signálu odpovídá logická úroveň 0 druhého signálu. U otočení opačným směrem, čili po směru hodinových ručiček (CW) odpovídá sestupné hraně prvního signálu logická úroveň 1 signálu druhého. V této konstrukci oba signály zpracovává mikrokontrolér, který podle směru otáčení vykonává dané funkce zesilovače. Jednotlivé vývody enkodéru je možné libovolně zaměňovat. Je však nutné, aby dvojice signálových vývodů byla vždy připojena na pull-up rezistory, buď vnitřně v mikrokontroléru nebo externími rezistory.



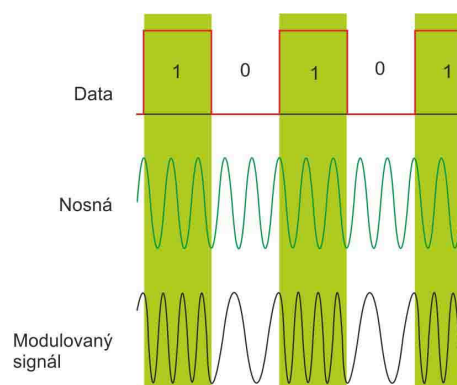
Obrázek 2.4: Průběhy signálů enkodéru

Mezi parametry sledovanými u enkodérů jsou velikost napájecího napětí a maximální povolený proud procházející kontakty, počet sepnutí při jednom otočení nebo celková mechanická životnost enkodéru. Kromě samotného enkodéru bývá do něj velice často implementováno axiální tlačítko nebo LED diody, jako je i v této konstrukci.[13]

2.6. Vf moduly

Vysokofrekvenční moduly slouží pro bezdrátový přenos dat mezi jednotlivými zařízeními a používají se pro různé účely jako bezdrátové zabezpečovací systémy, autoalarmy nebo pro přenos dat z různých senzorů v oblasti automatizace.

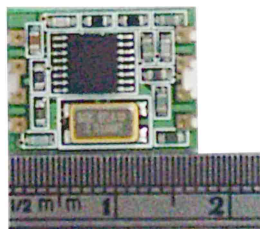
V tomto audiozesilovači jsou moduly použity pro jednostranný přenos dat ve funkci dálkového ovládaní zesilovače. Oba dva moduly pracují na frekvenci 868 MHz, která spadá do bezlicenčního rádiového pásma a je vymezená právě pro tyto účely. Moduly pracují na principu FSK modulace, jejíž princip je zobrazen na obrázku 2.5. Logickým úrovním 0 a 1 odpovídají odlišné frekvence signálu. Nevýhoda této metody je časová a energetická náročnost. Výhodou pak poměrně nízká cena a bezpečnost přenosu.[14]



Obrázek 2.5: Ukázka FSK modualce

2.6.1. Vysílací modul

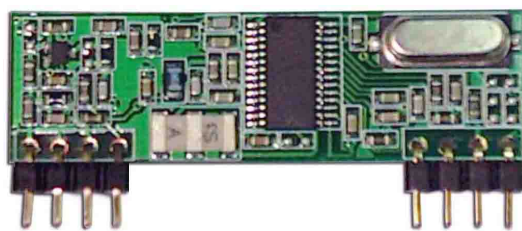
Jako vysílací modul je použit obvod firmy SUMMITEK Technology Co., Ltd. ST-FTX01-FSK. Ten je koncipován jako miniaturní vysílač o vysokém výstupním výkonu, s možností uvedení modulu do spánku pomocí vývodu ENABLE v době, kdy není vysíláno. Pak je jeho odběr pouhých 0.5 uA. To je ideální pro napájení z baterie. Napájecí napětí je v rozsahu 2.2-3.5V a odběr v aktivním režimu činí 15mA. Na obrázku 2.6 je fotka vysílacího modulu.[15]



Obrázek 2.6: Vysílací modul

2.6.2. Přijímací modul

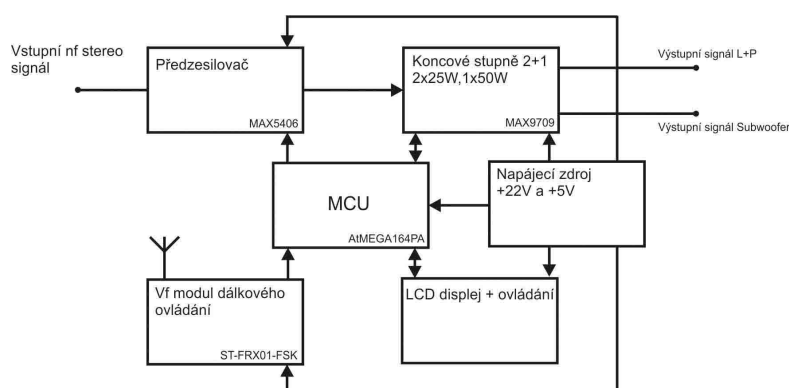
Přijímací modul tvoří superheterodynní přijímač stejného výrobce ST-FRX01-FSK. Odběr tohoto modulu je 13mA při napájení +5V. Citlivost pak výrobce udává -104dBm. Na obrázku 2.7 je fotka přijímacího modulu.[16]



Obrázek 2.7: Přijímací modul

3. Návrh zapojení

Na obrázku 3.1 je blokové schéma celého audiozesilovače. Ten se skládá celkem z šesti základních bloků. Bloku předzesilovače, koncového stupně, řídicí jednotky spolu s ovládáním a zobrazením, bezdrátového přijímacího modulu a napájecího zdroje. V dalších bodech je popsána funkce jednotlivých bloků. Celkové schéma zapojení je v příloze.



Obrázek 3.1: Blokové schéma zesilovače

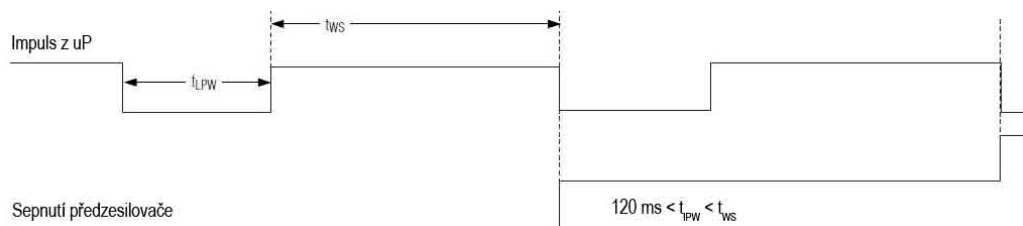
3.1. Předzesilovač a koncové stupně

Nízkofrekvenční vstupní signál je přiveden přes vazební kondenzátory, kvalitní tantalové pro dobrý přenos nízkých kmitočtů, na vstup předzesilovače tvořeného integrovaným obvodem MAX5406. V něm je signál zesílen, korekčně zpracován a na výstupu je STEREO signál pro pravý a levý kanál spolu s MONO kanálem, který je upraven vnitřní dolní propustí pro subwoofer. Externí kondenzátory na vývodech integrovaného obvodu CTR, CTL, CBL, CBR, CLS, CRS a CSUB slouží k nastavení mezních parametrů filtrů integrovaného korekčního předzesilovače. Vztahy pro jejich výpočty nalezneme v katalogovém listu.[4] Výstupní signály jsou vedeny opět přes vazební kondenzátory na dvojici koncových stupňů tvořenou obvodem MAX9709, přičemž jeden stupeň je zapojen v módu STEREO a druhý je v módu MONO, vyhrazen pro subwoofer. Tímto je získán zesilovač 2+1 o výkonu 2x25W a 1x50W rms. Koncový stupeň pro subwoofer může být vynechán a k dispozici je tak stereo zesilovač 2x25W pro zátěž 8 Ohmů.

3.2. Řídicí a zobrazovací jednotka

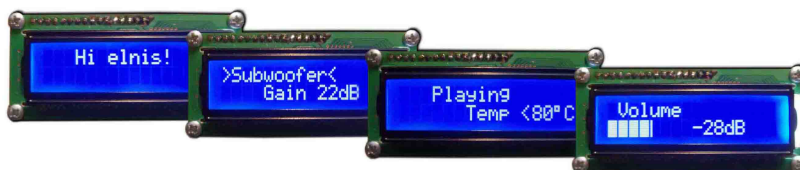
Jádro řídicí jednotky tvoří mikrokontrolér ATmega164PA, který obstarává všechny funkce ovládání celého zařízení. Na port A mikrokontroléru je připojeno rozhraní pro ovládání předzesilovače spolu se dvěma odbočenými výstupy z předzesilovače. Ty jsou připojeny přes vazební kondenzátory na vstup AD převodníků. Ovládání předzesilovače mikrokontrolér reali-

zuje pomocí vysílání logických úrovní 0 na jednotlivé vstupy předzesilovače, kdy výchozí stav je logická úroveň 1. Tím MCU dokáže ovládat hlasitost a korekce obvodu MAX5406. Důležité je správné načasování vyslaných impulsů, aby nebyly příliš krátké a brzy za sebou, protože by je předzesilovač nestihl zaregistrovat. Správné načasování je na obrázku 3.2. Určitě by byla i jiná možnost připojení osmi ovládacích vývodů předzesilovače k mikrokontroléru, ale vzhledem k velkému počtu jeho vývodů a snaze o zachování co nejmenších rozměrů to bylo nažádoucí. Úplně jiná situace by nastala, kdyby byl použit integrovaný obvod jiného výrobce řízený třeba přes rozhraní I2C.



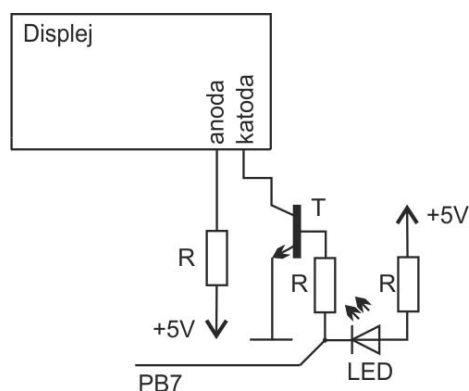
Obrázek 3.2: Časování impulsů pro předzesilovač

K portu B je připojen podsvícený dvouřádkový LCD displej, který slouží k zobrazení aktuálního dění celého zesilovače. Zobrazeny jsou údaje jako momentální rozmezí teploty čipů koncových stupňů, hlasitost, výšky, hloubky, vyvážení, menu pro subwoofer aj. Je použita 4bitová komunikace mezi displejem a mikrokontrolérem. Kontrast displeje se nastavuje odporovým trimrem. Na obrázku 3.3 je ukázka zobrazení tohoto displeje.



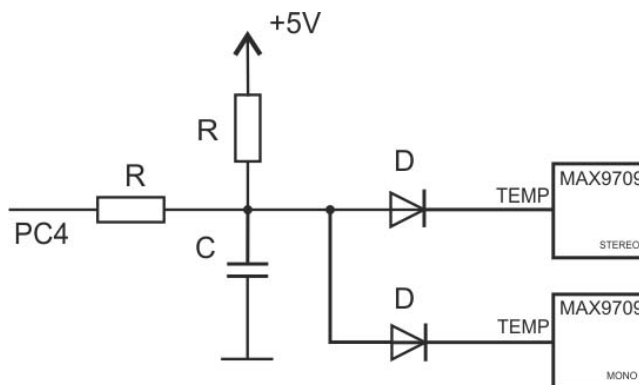
Obrázek 3.3: Příklad zobrazení displeje

Pro zapínání a vypínání podsvětlení LCD displeje v případě, že je zesilovač uveden do režimu stand-by, je použit vývod PB7 portu B. Schéma zapojení je vidět na obrázku 3.4. Je zřejmé, že displej svítí, je-li na PB7 logická 1, v druhém případě svítí červená LED dioda indikující režim stan-by.



Obrázek 3.4: Ovládání podsvícení

Port C ATmegy 164PA je vyhrazen především pro ovládání a hlídání koncových stupňů. Výjimku tvoří vývody PC7, PC6 a PC5. První dva zmíněné slouží k ovládání hloubek předzesilovače z důvodu vytížení portu A. Poslední PC5 slouží k celkovému uvádění obou koncových stupňů a předzesilovače do módu SHUTDOWN používaného v režimu STAND-BY zesilovače. Zbylé vývody slouží v první řadě k hlídání a zobrazování aktuálního rozmezí teplot koncových stupňů. Vývody TH1 a TH2 obvodu MAX9709 slouží k nastavení teplotní hranice při jejímž překročení vývod TEMP, doposud udržován v logické 1, přejde do logické 0. Takto je orientačně snímána aktuální teplota a při výrazném přehřátí dojde k odpojení koncových stupňů. Pomocí zapojení na obrázku 3.5 jsou hlídány teploty obou obvodů najednou, aniž by se vzájemně ovlivňovaly. V tabulce 2 pak je nastavení jednotlivých teplotních rozsahů.



Obrázek 3.5: Hlídání teploty koncových stupňů

Teplota (°C)	TH2	TH1
80	0	0
100	0	1
120	1	0
139	1	1

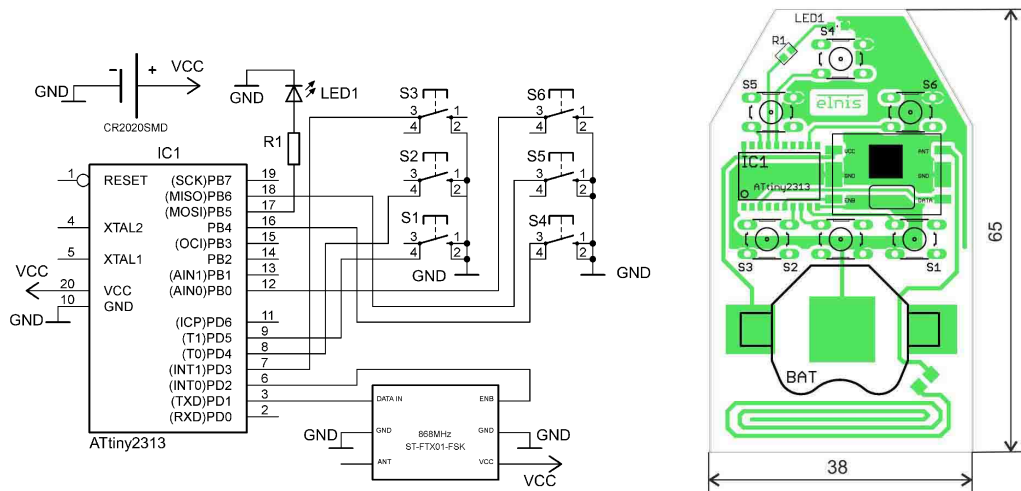
Tabulka 3: Nastavení rozsahů teplot

Poslední dva vývody jsou připojeny na vývody G1 a G2 integrovaného obvodu MAX9709, koncového stupně pro subwoofer. Pomocí nich se nastavuje vstupní úroveň nf signálu a tím je možno ovlivňovat hlasitost subwooferu v sestavě 2+1 vůči satelitům.

Celkem čtvrtý a poslední port D je vymezen ovládacím prvkům zesilovače, enkodéru zahrnující tlačítko připojené na externí přerušení MCU, dvěma diodám a vf přijímacím modulu připojeného na rozhraní USART ATmega164.

3.3. Dálkové ovládání

Dálkové ovládání slouží k pohodlnému ovládání audiozesilovače bez potřeby přímého kontaktu. V této konstrukci jsou pro tento účel použity vysokofrekvenční moduly, které umožňují zesilovač ovládat i mimo jeho viditelnost. U takových konstrukcí se ve většině případů používá IR (infra-červeného) přenosu, ten je ale omezen právě viditelností zařízení. Zajisté by ale plně vyhovoval. Použití vf modulů byl pouze osobní záměr. Výhodou rádiového přenosu je velký dosah dálkového ovládání i přes překážky. Nevýhodou může být pouze o něco málo vyšší spotřeba a možnost vf rušení na desce zesilovače.



Obrázek 3.6: Schéma zapojení a DPS

Na obrázku 3.6 je vidět schéma zapojení vysílače spolu s osazením desky plošných spojů. Jádrem tvoří mikrokontrolér firmy Atmel řady AVRtiny, konkrétně ATtiny2313.[17] Ten pomocí sériové linky UART vysílá data do MCU na desce zesilovače prostřednictvím bezdrátových vln modulů firmy SUMMITEK, které tvoří tzv. datový tunel. Aktivní stav modulu tzn., že modul vysílá, je podmíněn přivedením logické úrovně 1 na jeho vývod ENABLE. To je z důvodu snížení spotřeby vysílače v nečinném stavu. Doba nutná pro aktivaci vysílacího modulu před samotným vysíláním je výrobcem udávaná alespoň na 1 ms. Vysílač dálkového ovládní tak lze napájet z knoflíkové baterie +3V CR2020. Na ovladači jsou tři tlačítka, která nahrazují rotační enkodér na desce audiozesilovače. Další tři tlačítka jsou pro uživatelské funkce. Celkem šest tlačítek je připojených k portu B MCU spolu s LED diodou signalizující vysílání.

Pro vyzařování signálu směrem k zesilovači je použita smyčková půl-vlnná anténa, vhodná pro tyto účely. Její rozměry se orientačně určí ze vztahu (1), kde v je rychlost šíření vlnění v prostoru a f je frekvence, na které modul vysílá. Pro půl-vlnnou anténu je potřeba vydělit vlnovou délku λ dvěma a to je v tomto případě asi 17,3 cm. Pro odrušení parazitních jevů je dobré použít kondenzátor o hodnotě 1,5pF zapojený před anténu. [18]

Jako přijímač je použit modul ST-FRX01-FSK, zakomponovaný na desce audiozesilovače. Anténa je prutová, konstrukcí vhodná přímo pro tento modul.

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{1}$$

3.4. Zdroj napájení

3.4.1. Napájecí zdroj pro zesilovač

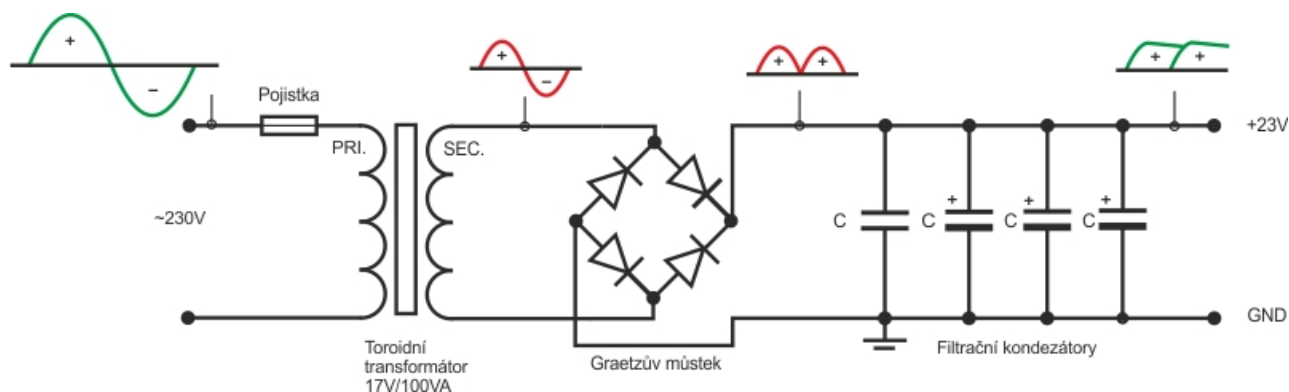
Pro správnou funkci zesilovače je zapotřebí vhodný napájecí zdroj. Bylo na výběr mezi spínaným a klasickým zdrojem napájení. Výhody a nevýhody obou typů jsou všeobecně známé. Spínaný zdroj nabízí vysoký výkon a kompaktnost, ale na úkor složitosti a potřeby mnoha součástek. Další nevýhodou je výstupní charakter napájecího napětí, které je ovlivněno vysokými frekvencemi spínání takového zdroje. Problém by také mohl být v pokrývání odebíraných proudových špiček a špatné reprodukci některých kmitočtů. Pro volbu klasického transformátoru byla jeho snadná dostupnost a poměrně malé rozměry, které splňovaly požadavky na umístění do krabičky.

Je použit toroidní transformátor o parametrech 17V/5,9A ze kterého je získáno po usměrnění a vyfiltrování napětí +23V. Vzhledem ke konstrukci toroidního transformátoru a různorodosti průběhu audiosignálu je z praktického hlediska dostačující výkon tohoto transformátoru právě 100W. Poddimenzování transformátoru je kompenzováno baterií filtračních kondenzátorů poměrně velké kapacity, která má za úkol vykrývat proudové špičky při vybuzení zesilovače. Kapacita této baterie činí asi 30mF. Teoretická hodnota kapacity filtračních kondenzátorů se vypočítá pomocí vztahu (2), kde k je konstanta, jejíž hodnota pro dvoucestné usměrnění je 300 a p je zvlnění výstupního napětí, typicky 5%.

$$C = \frac{k \cdot I_{out}}{p \cdot U_{out}} \quad (2)$$

Příklad výpočtu:

$$C = \frac{k \cdot I_{out}}{p \cdot U_{out}} = \frac{300 \cdot 6000}{5 \cdot 23} \approx 15mF$$



Obrázek 3.7: Zdroj napájení

Na obrázku 3.7 je typické schéma zapojení nesymetrického napájecího zdroje spolu s průběhy napětí v jeho jednotlivých částech. Na primární vinutí toroidního transformátoru jištěné trubičkovou pojistkou je přivedeno síťové napětí $\sim 230V$. Na sekundárním vinutí je střídavé napětí o velikosti $17V$, následně přivedeno na dvoucestný usměrňovač tvořený Graetzovým můstkem. Usměrněním a vyfiltrováním je výsledné napětí teoreticky $+24V$, vypočteno podle vztahu (3). Je ale potřeba odečíst ztrátové napětí na polovodičovém přechodu usměrňovače, asi $1,4V$. Jako filtrační blok napájení jsou použité kondenzátory o hodnotě $4700\mu F / 35V$ pro dostatečné vyhlazení napájení s ohledem na odebíraný proud. Výsledné napětí, které je vyvedeno na svorky zesilovače, je tedy asi $+23V$.

$$U_{ss} = U \cdot \sqrt{2} \quad (3)$$

3.4.2. Řešení napájení na desce zesilovače

Na vstupní svorky modulu audiozesilovače je přivedeno napětí kolem $+23V$. Toto napětí napájí přímo dvojici koncových stupňů v cestě s filtračními kondenzátory $47\mu / 35V$ poblíž pouzder integrovaných obvodů. Kromě napájení pro koncové stupně se na desce nachází napájení pro logické prvky zesilovače. To zajišťuje stabilizátor napětí 7805 dimenzovaný na

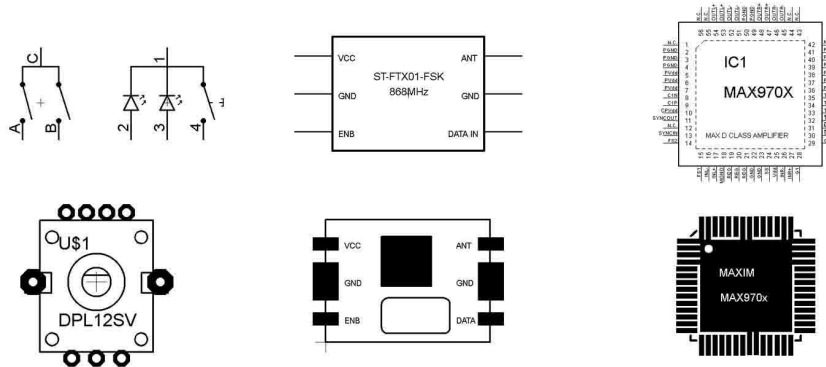
odběr proudu až 1A s výstupním napětím +5V. Stabilizátor napájí LCD displej, předzesilovač, vf modul, logické vstupy koncových stupňů a mikrokontrolér, u kterého je napájení doplněno navíc o LC filtr zajišťující korektní činnost ADC převodníku.

Ve schématu zapojení jsou tři druhy zemí. V prvním případě se jedná o výkonovou zem, jenž slouží k napájení integrovaných modulů na DPS. Druhou zem tvoří tzv. signálová zem. Tyto země bývají odděleny z důvodu eliminace rušení. V praxi je ale použita pouze jediná zem za předpokladu správného vedení země při návrhu DPS, aby nevznikaly vířivé proudy a neovlivňovaly nf signál. Vzhledem k tomu, že napájení zesilovače je nesymetrické, kromě signálové a výkonové země se ve schématu zapojení nachází ještě zem umělá. Tu vytváří předzesilovač MAX5406 pomocí vnitřních prvků a externího kondenzátoru na vývodu C_{bias} a slouží čistě pro vstupní nf audio signál. Úplně stejně si umělou zem vytváří koncové stupně, ty však s ní pracují pouze interně.

4. Konstrukce a návrh desky plošných spojů

4.1. Návrh v editoru DPS EAGLE

Po prostudování všech katalogových listů a parametrů součástek bylo třeba celý projekt realizovat, tzn. nakreslit schéma zapojení a vhodně navrhnout desku plošných spojů. K tomuto účelu byl použit známý editor schémat a plošných spojů EAGLE firmy CadSoft Computer GmbH. Jelikož knihovny nejdůležitějších součástek pro EAGLE nebyly nikde k dispozici, v prvé řadě byla potřeba takové knihovny vytvořit. Na obrázku 4.1 jsou vidět ukázky vytvořených schématických značek a jejich pouzder. Potom už jen stačilo nakreslit schéma zapojení za pomoci doporučených zapojení výrobců jednotlivých integrovaných obvodů. Byla potřeba rozvaha nad funkční orientací na budoucí DPS, především u MCU, ale také nad vizuální stránkou schématu zapojení. To je rozděleno do bloků napájecího zdroje, mikrokontroléru, předzesilovače a koncových stupňů.



Obrázek 4.1: Schématické značky a jejich pouzdra v EAGLE

Jakmile bylo schéma zapojení hotové, dalším krokem bylo navrhnout vlastní desku plošných spojů. Celý návrh byl proveden manuálně podle zásad správného návrhu DPS. Snaha byla vytvořit co nejmenší desku plošných spojů, čemuž pomohlo oboustranné řešení návrhu. Pro minimální rozměry zařízení je použito výhradně součástek v provedení SMD, především velikosti 0603. U součástek jako jsou elektrolytické kondenzátory nebo kondenzátory tantalové v audio signálové části, jsou rozměry větší z důvodu jejich konstrukce. Občas byl použit větší typ pouzdra z důvodů vedení plošného spoje.

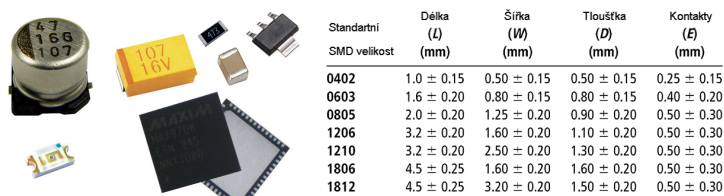
Rídicí jádro, MCU je situován uprostřed DPS, pro co nejlepší spojení s ostatními prvky. Po pravé straně z pohledu vrchní strany DPS je umístěn předzesilovač MAX5406 spolu s LCD displejem a odporovým trimrem pro nastavení jeho kontrastu. Ve spodní části desky jsou oba dva koncové stupně. U nich byla při návrhu nutnost, aby filtrační a blokující kondenzátory byly co nejbliž jejich pouzder. Taktéž byla potřeba dostatečná šířka cest napájení a audio výstupu. Dále bylo počítáno s možností umístění pasivního chladiče na oba obvody. Po levé

straně od koncových stupňů se nachází stabilizátor napětí +5V. Levý spodní roh je vyhrazen konektoru antény pro příjem signálu z vysílače. Na první pohled může zaujmout netradiční orientace některých součástek pod úhlem 45°, která je zde z čistě praktického důvodu ušetření místa nebo v jiném případě z důvodu omezení rušení v modulu připojením jeho datového vývodu co nejbližší MCU. Výsledný vizuální dojem je poměrně zajímavý.

Po úpravách a vyladění návrhu DPS byl finální soubor *.brd předán do laboratoře výroby plošných spojů na ústavu UREL, kde pomocí zhotovené filmové předlohy vyrobili precizní vrtanou DPS.

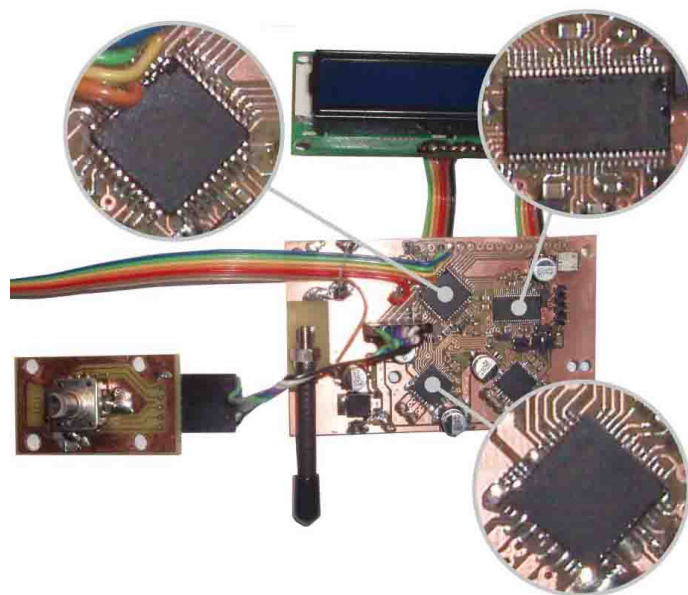
4.2. Konstrukce

Celý zesilovač je na obostranné desce plošných spojů o rozměrech 81x51. DPS byla podle potřeby nastříhána, řádně vybroušená, ošetřená jemnou vrstvou pájitelného ochranného laku. Pak následovalo samotné osazování. Zde byla potřeba zvolit vhodný postup osazování, jelikož byla použita montáž SMT o různých velikostech pouzder spolu se součástkami klasickými, kde rozložení SMD součástek na DPS bylo značně koncentrované. Jako nástroje posloužily mikro-pájecí stanice, měkká pájka průřezu 0,8mm, kalafuna, speciální tavidlo a ostatní běžné nářadí jako pinzeta či kleště. Na obrázku 4.2 jsou vidět některé použité SMD součástky a tabulka jejich velikostí.



Obrázek 4.2: Ukázka SMD součástek a jejich velikostí

Nejdříve byly zapájeny pasivní součástky jako jsou rezistory, kondenzátory, které nebyly přímo v okolí integrovaných obvodů, kde by bránily jejich pájení. Následovalo zapájení MCU, který byl nejdříve natřen silikonovou pastou ve spodní části a přilepen k DPS. Potom stačilo vhodně nasměrovat jeho orientaci, aby souhlasila s ploškami DPS a postupně zapájet. Je třeba upozornit, že všechny integrované obvody v zapojení jsou citlivé na zacházení, především na statické výboje a způsob pájení. Proto bylo potřeba dbát zvýšené opatrnosti a správných zásad při práci s nimi. Na řadu přišel největší problém, zapájení předzesilovače v pouzdře TSSOP 48L a koncových stupňů v pouzdrech TQFN 56L. Zde byl postup stejný jako u mikrokontroléru, ale s mnohem větší opatrností. Byla potřeba dát pozor na množství cínu a především na dobu pájení, aby nedošlo k poškození integrovaných obvodů. Zpětná kontrola, zda je cín správně rozlitý na ploškách a vývodech pouzder, zda nedošlo ke zkratu nebo nebyl poškozen plošný spoj, byla provedena vizuálně pomocí lupy. Na obrázku 4.3 je vidět osazení složitějších SMD pouzder.



Obrázek 4.3: Ukázka pájení pouzder TSSOP a TQFN

Po důkladné kontrole byl zapájen stabilizátor napětí s ostatními pasivními SMD součástkami včetně elektrolytických kondenzátorů, u kterých byla důležitá orientace polarity. Poslední klíčovou součástkou k zapájení byl vf moduľ. U něho bylo taktěž dbáno na pečlivé zacházení a zásady pro práci s vf modulem. Součástky jako LCD displej a rotační enkodér byly připojeny k DPS pomocí vodičů.

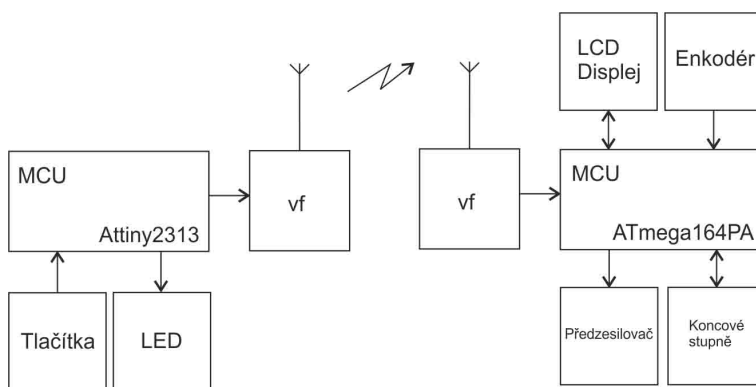
4.3. Oživení

Po vyčistění DPS po pájení od přebytečné kalafuny byla nanesena nová vrstva ochranného laku. Po podrobné kontrole zařízení následoval krok oživení. To proběhlo po částech. Jako první byla připojena na proudově omezený zdroj část předzesilovače. Na jeho vstup byl připojen nf signál z generátoru pro zjištění správné funkce a kontrolou jeho výstupu na osciloskopu. Následovalo oživení koncových stupňů, obdobně jako předzesilovače, připojením zprvu na nižší napětí cca. 12V. Tady byl problém s plovoucími vývody MUTE, které nebyly zapojené a způsobovaly nefunkčnost zesilovače. Po úpravě zapojení byly oba obvody koncového stupně plně funkční a mohlo být zvýšeno napájecí napětí až na maximum. Nyní už byl na výstupu zesílený nf signál.

Jako poslední bylo napájecí napětí připojeno na MCU s LCD displejem a vf modul. Zde nebyly žádné výrazné problémy. Teď jen stačilo připájet k MCU vývody k programování a naprogramovat do něho základní zkušební program.

5. Řídicí software

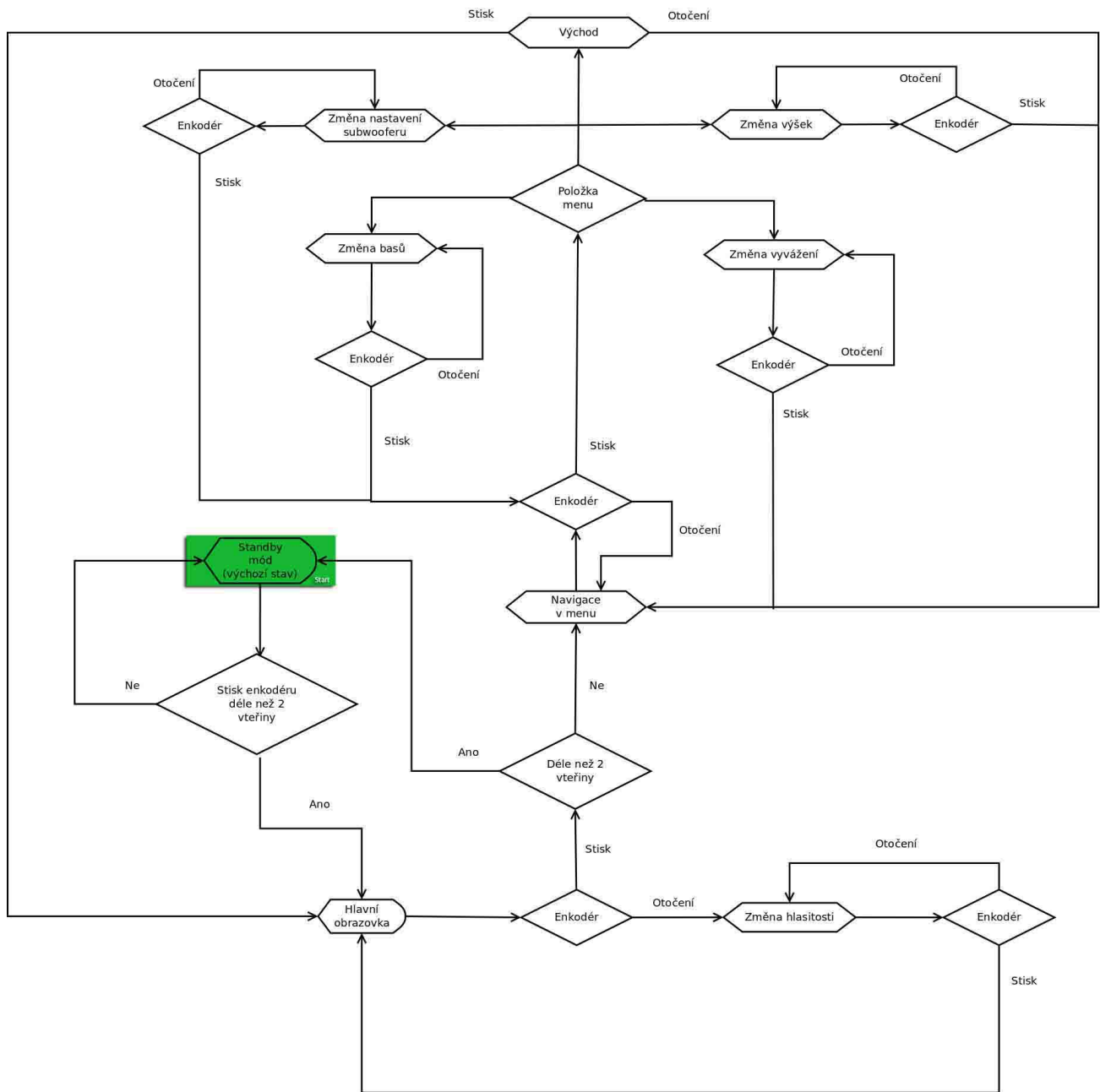
Na obrázku 5.1 je blokové schéma ovládání a řízení audiozesilovače, které zajišťují dva mikrokontroléry. ATmega164PA na základní desce audiozesilovače a ATtiny2313 na desce vysílače dálkového ovládání. Veškerý software je napsán v jazyce C a je rozdělen na dvě části, program audiozesilovače a program vysílače. Pro překlad byl použit balíček WinAVR, k programování sloužil zhotovený USBasp programátor. [19].



Obrázek 5.1: Blokové schéma dálkového ovládání a zesilovače

5.1. Hlavní program

Na obrázku 5.2 je vývojový diagram řídicího softwaru audiozesilovače. Výchozí stav, čili místo, kde se program nachází po připojení napájení zesilovače, představuje zelené políčko start. Pokud je tlačítko enkodéru podrženo déle než 2 s, dojde k aktivaci audiozesilovače. To je indikováno rozsvícením tlačítka, LCD displeje a úvodním pozdravem. Poté se na displeji objeví hlavní obrazovka, jejíž fotka je na obrázku 5.3a. Otáčením enkodéru v pozici hlavní obrazovky dochází k nastavování hlasitosti, doprovázenému grafickou a číselnou indikací, viz obrázek 5.3b. Po asi 2s nečinnosti od nastavení hlasitosti, se na vrátí displej zpět hlavní obrazovka. Pro vstup do menu nastavení zesilovače je potřeba krátkého stisku tlačítka enkodéru. To je indikováno změnou barvy tlačítka z modré na oranžovou a zobrazením nápisu "Bass". Zde se uživatel pohybuje otáčením enkodéru vpravo či vlevo a listuje mezi jednotlivými položkami menu. Ukázka je na obrázku 5.3c. Stiskem tlačítka u dané položky v menu je aktivováno její nastavování pomocí otáčení enkodéru, což je opět doprovázeno grafickou a číselnou indikací. To je vidět na obrázku 5.3d. Výjimku tvoří položka "Subwoofer" na obrázku 5.3e, kde je možné měnit jeho vstupní citlivost nebo vyřadit z provozu. Potvrzení všech nastavení se provádí opětovným stiskem tlačítka. Nyní je na obrazovce položka "Exit". Dalším stiskem tlačítka dojde k navrácení zpět na hlavní obrazovku nebo je možné otáčením enkodéru pokračovat v listování menu. Stiskem enkodéru delším než 2 s je zesilovač uveden opět do výchozího stavu neboli STAND-BY módu.



Obrázek 5.2: Vývojový diagram hlavního programu



Obrázek 5.3: Zobrazování LCD displeje: a, b, c, d, e

Tělem celého programu je vhodně deklarovaná a přehledně naplněná struktura “*State*”, na obrázku 5.4a. V ní jsou obsaženy všechny důležité parametry ovládání zesilovače, jako výpis prvního řádku LCD displeje, pole pohybu v menu pomocí enkodéru, nastavovací limity zesilovače, čísla vývodů pro posílání impulsů pro předzesilovač, parametr barvy podsvětlení tlačítka a výchozí hodnota nastavení předzesilovače po zapnutí. V neposlední řadě ale taky zahrnuje volání funkcí “*adjust_xx*” nastavující zesilovač a “*print_xx*” sloužící k zobrazování druhého řádku LCD displeje.

Pohyb ve struktuře, neboli v menu zesilovače, zajišťuje rotační enkodér a pole “*next[]*” struktury “*State*” o velikosti tří prvků. První prvek tohoto pole odpovídá stisku tlačítka enkodéru (index pole 0), druhý otočení enkodéru vlevo (index pole 1) a třetí otočení enkodéru vpravo (index pole 2). Pole “*next[]*” všech položek struktury “*State*” jsou systematicky naplněny. Pohybem enkodéru a zjištěním, zda se jedná o stisk nebo otočení, dojde ve struktuře k přeskočení na položku struktury, jejíž číslo je uloženo právě v poli “*next[]*” předchozí položky struktury.

```

typedef struct TState {
    char label[17];
    unsigned char next[3];
    unsigned char limits[2];
    unsigned char pins[2];
    int p;
    unsigned char led;
    unsigned char value;
    PROCESS_ENCODER process_encoder;
    PRINT_VALUE print_value;
} State;

State states[] = {
//Napis prvnioho radku |stisk tlacitka |otoceni vlevo|otoceni vpravo|rozsek hodnot|piny|port|barva LED|vzchozi|funkce enkodéru|Vypis druheho radku
{.label=" Playing", (M_BASS_SEL, M_EXIT, M_BALANCE), .limits={0,5},{}, .p=0, .led=1, .value=0, &encoder_nop, &print_temperature},
{.label=" Bass", (M_BASS_SEL, M_EXIT, M_BALANCE), .limits={0,21},{}, .p=0, .led=0, .value=14, &encoder_nop, &nop},
{.label=">Bass<", (M_EXIT, M_BASS_SEL, M_BASS_SEL), .limits={0,21},{7,6}, .p=1, .led=0, .value=14, &adjust_value, &print_bass_bar},
{.label=" Balance", (M_BALANCE_SEL, M_BASS, M_TONE), .limits={0,32},{}, .p=0, .led=0, .value=22, &encoder_nop, &nop},
{.label=">Balance<", (M_EXIT, M_BALANCE_SEL, M_BALANCE_SEL), .limits={0,32},{3,2}, .p=0, .led=0, .value=16, &adjust_value, &print_balance_bar},
{.label=" Tone", (M_TONE_SEL, M_BALANCE, M_SUB), .limits={0,21},{}, .p=0, .led=0, .value=15, &encoder_nop, &nop},
{.label=">Tone<", (M_EXIT, M_TONE_SEL, M_TONE_SEL), .limits={0,21},{6,7}, .p=0, .led=0, .value=15, &adjust_value, &print_tone_bar},
{.label=" Subwoofer", (M_SUB_SEL, M_TONE, M_EXIT), .limits={0,32},{}, .p=0, .led=0, .value=0, &encoder_nop, &nop},
{.label=">Subwoofer<", (M_EXIT, M_SUB_SEL, M_SUB_SEL), .limits={0,32},{}, .p=0, .led=0, .value=0, &adjust_sub, &print_sub},
{.label=">Exit<", (M_EXIT, M_SUB, M_BASS), .limits={0,32},{}, .p=0, .led=0, .value=22, &encoder_nop, &nop},
{.label=" Volume", (M_IDLE, M_SUB, M_BASS), .limits={0,32},{1,0}, .p=0, .led=1, .value=22, &adjust_value, &print_volume_bar},
};

```

Obrázek 5.4: Deklarace struktury a její naplnění

Tlačítko enkodéru je připojeno na vývod externího přerušni mikrokontroléru “*ISR(INT1_vect)*”. Zde jsou hlídány jednotlivé stisky tlačítka a rozeznávání jejich délky, důležité pro zapínání a vypínání zesilovače. Důležité je nastavení přerušni na sestupnou i vzestupnou hranu, kvůli realizaci zapínání a vypínání audiozesilovače. Zpracování dat z enkodéru a následné zjišťování

směru otáčení zajišťuje funkce *“encoder_rotated()”* převzatá ze stránky AVR freaks[20]. Její volání a kontrolování pohybu enkodéru je hlídáno v nekonečné smyčce hlavního programu. Pro zobrazovací LCD displeje je použita knihovna, jejíž autor je Peter Fleury. Samotné zobrazování displeje probíhá voláním funkcí z knihovny *“bars”* při změně stavu ve struktuře *“State”*. [21].

Významnou funkci v hlavním programu má čítač/časovač1, který časuje řídicí impulsy pro předzesilovač, jelikož by nebyl schopný registrovat impulsy přímo z enkodéru.

Hlídání teploty koncových stupňů zajišťuje funkce *“overheated()”*.

Přijímání dálkového ovládání je řešeno pomocí periferie USART0 mikrokontroléru ATmega164PA spolu s přijímacím vf modulem ST-FRX01-FSK. Přenosová rychlost je nastavena na hodnotu 4800Bd/s podle vzorce (4). Rámec komunikace je 8bitový, bez parity se dvěma stop bity. Zpracování přijatých dat z vysílače probíhá ve vektoru přerušeni *“ISR(USART0_RX_vect)”*. Přijatá data z vysílače je třeba patřičně ověřovat, jelikož přijímací modul přijímá nežádoucí šum z okolí. Ukázka programového ověření je vidět na obrázku 5.5.

$$BAUD = \frac{f_{osc}}{16UBRR0+1}. \quad (4)$$

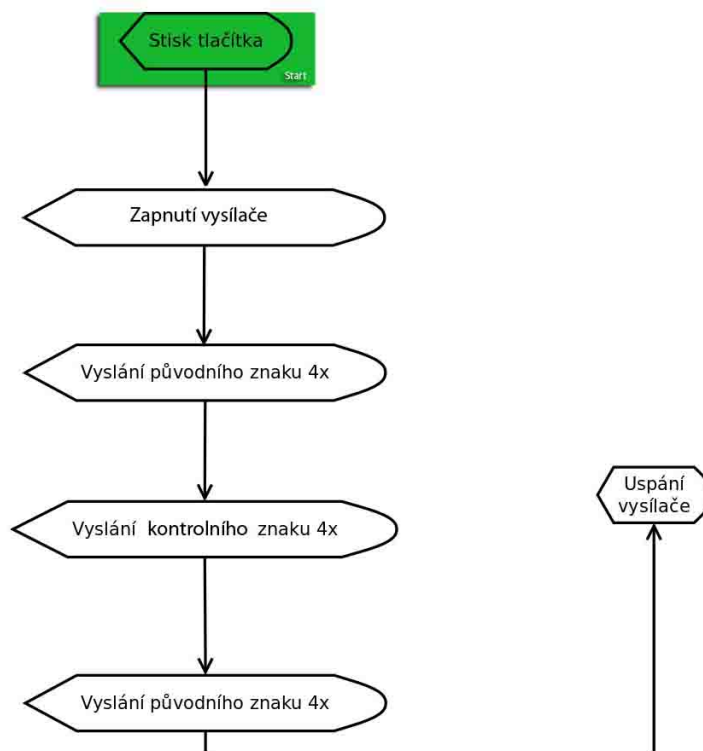
```
ISR(USART0_RX_vect) {
    g_data = UDRO;
    if (CheckCode(g_data)) {
        if(pos_count ==0){
            buttonId = g_data;
            pos_count=1;
            false_counter=0;
        }
    }
    if((pos_count == 1) && (g_data == (buttonId & g_mask))){
        pos_count = 2;
        false_counter=0;
    } else if((pos_count==2) && (g_data == buttonId)){
        pos_count = 3;
        false_counter=0;
    } else if((pos_count==3) && (g_data == (buttonId & g_mask))){
        pickAction(buttonId);
        pos_count=0;
        false_counter=0;
        g_data=0;
        buttonId=0;
    } else {
        if (++false_counter == 10) {
            pos_count=0;
            false_counter=0;
            g_data=0;
            buttonId=0;
        }
    }
}
}
```

```
//čtení přijatých dat z registru jednotky USART
//volání funkce "CheckCode" identifikující přijatý znak
//začátek ověřování přijatého znaku
//uložení přijatého znaku do proměnné buttonId
//inkrementace počítadla ověření
//ověření přijatého kontrolního znaku
//inkrementace počítadla
//nulování počítadla chybných znaků
//ověření přijatého znaku
//poslední ověření přijatého kontrolního znaku
//volání funkce pickAction realizující ovládání zesilovače
//nulování parametrů ověřování
//počítadlo chybných znaků
```

Obrázek 5.5: Ukázka funkce kontroly přijatého znaku

5.2. Program vysílače dálkového ovládání

Na obrázku 5.6 je vývojový diagram řídicího programu vysílače dálkového ovládání.



Obrázek 5.6: Vývojový diagram programu vysílače dálkového ovládání

Po zapnutí vysílače je mikrokontrolér ATtiny2313 uspán. Stavy všech tlačítek jsou hlídány ve vektoru přerušení “*ISR(PCINT_vect)*”. Jakmile dojde ke stisku tlačítka, je probuzen MCU. Je zjištěno, o které tlačítko se jedná a je zavolána funkce “*SendButtonId(char buttonId)*”, která vyše data přes jednotku USART na modul vf vysílače. Každému tlačítku odpovídá jeden vlastní nezaměnitelný znak ASCII tabulky. Pro bezproblémový přenos dat a spolehlivost dálkového ovládání je nutné opakovaně za sebou vysílat tentýž znak, a to následujícím způsobem, jenž je vidět na obrázku 5.7. Po odvysílání dat je opět MCU uspán.

```

void SendButtonId(char buttonId) {
    char character = (buttonId);
    character &= 0b01010101;

    PORTD |= _BV(PD2);
    _delay_ms(3);

    USART_Transmit(buttonId);
    USART_Transmit(buttonId);
    USART_Transmit(buttonId);
    USART_Transmit(buttonId);
    USART_Transmit(buttonId);

    USART_Transmit(character);
    USART_Transmit(character);
    USART_Transmit(character);
    USART_Transmit(character);
    USART_Transmit(character);
}
//funkce několikanásobného vyslání znaku
//uložení vyílaného znaku do proměnné character
//kontrolní znak vysílaného znaku

//aktivace vysílacího modulu

//volání funkce a vyslání znaku

//volání funkce a vyslání kontrolního znaku

```

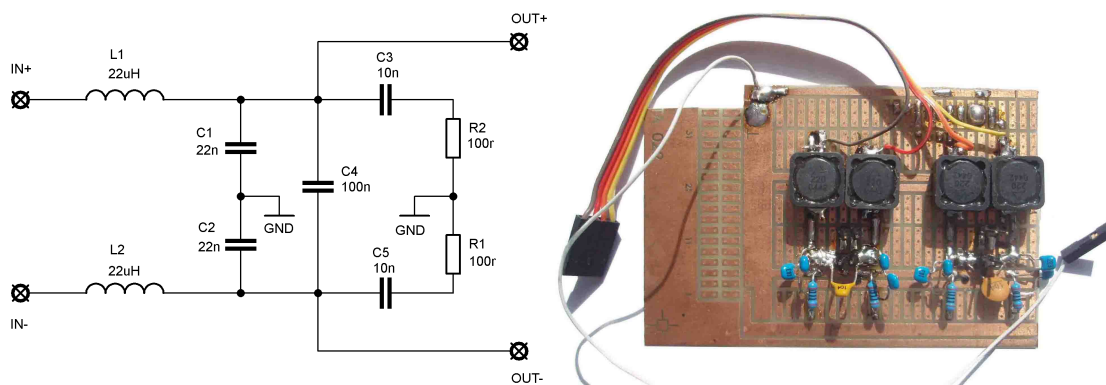
Obrázek 5.7: Ukázka kódu v jazdycce C vysílaného symbolu jednotkou USART

Při jednom zavolání funkce *“SendButtonId(char buttonId)”* je znak vyslán několikrát za sebou střídavě s kontrolním znakem. To zabezpečí bezproblémový příjem na straně audiozesilovače z důvodu okolního šumu a rušení okolí. Jěšte před samotným vysláním dat jednotkou USART je aktivován vývod enable vř modulu, což zajiřtuje PB6 mikrokontroléru ATtiny2313. Při skončení vysílání je tento vývod vrácen zpět do nuly. Vysílání je provedeno dvěma způsoby. První způsob volá funkci *“SendButtonId(char buttonId)”* pořád dokola, je-li stisknuté tlačítka. To je použito pro tlačítka představující otáčení enkodéru vpravo či vlevo. Druhý způsob zavolá funkci *“SendButtonId(char buttonId)”* až v okamžiku uvolnění stisknutého tlačítka. Tak je dosaženo provedení pouze jednoho kroku v menu audiozesilovače při stisku tlačítka.

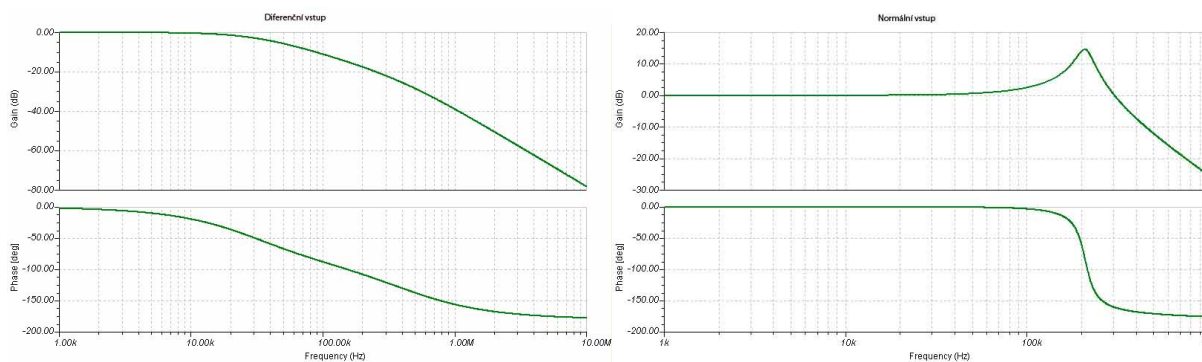
Jednotka USART je nastavena na doporučenou rychlost vř vysílacího modulu, a to 4800Bd/s. Rámec komunikace je 8bitový, bez parity se dvěma stop bity. Nastavení je tedy shodné s nastavením přijímače na desce audiozesilovače.

6. Parametry audiozesilovače

Pro měření parametrů audiozesilovače byly zhotoveny výstupní LC filtry dle doporučeného zapojení výrobce. Schéma zapojení a fotka zhotoveného výstupního filtru je na obrázku 6.1. Na obrázku 6.2 je simulace přenosové charakteristiky výstupního filtru pomocí programu TINA Designsoft.



Obrázek 6.1: Schéma zapojení a fotka výstupního LC filtru



Obrázek 6.2: Přenosová charakteristika filtru simulovaná v programu TINA

6.1. Výstupní výkon audiozesilovače

Měření výkonu bylo provedeno pomocí rezistoru 8 Ohm/20 W, který představoval umělou zátěž na výstupu zesilovače. Potom jen stačilo změřit napětí na této zátěži a výstupní výkon byl pak vypočten pomocí vztahu (5). Na vstup zesilovače byl přiváděn harmonický signál o různých frekvencích a amplitudách napětí, které jsou v následující tabulce 4. Výsledná účinnost byla vypočtena pomocí vztahu (7), kde P_{out} je naměřený výstupní výkon a P_{in} je příkon zesilovače z napájecího zdroje, vypočten pomocí vztahu (6).

$$P_{out} = P_R + P_L = \frac{U_R^2}{R_R} + \frac{U_L^2}{R_L} [W] \quad (5)$$

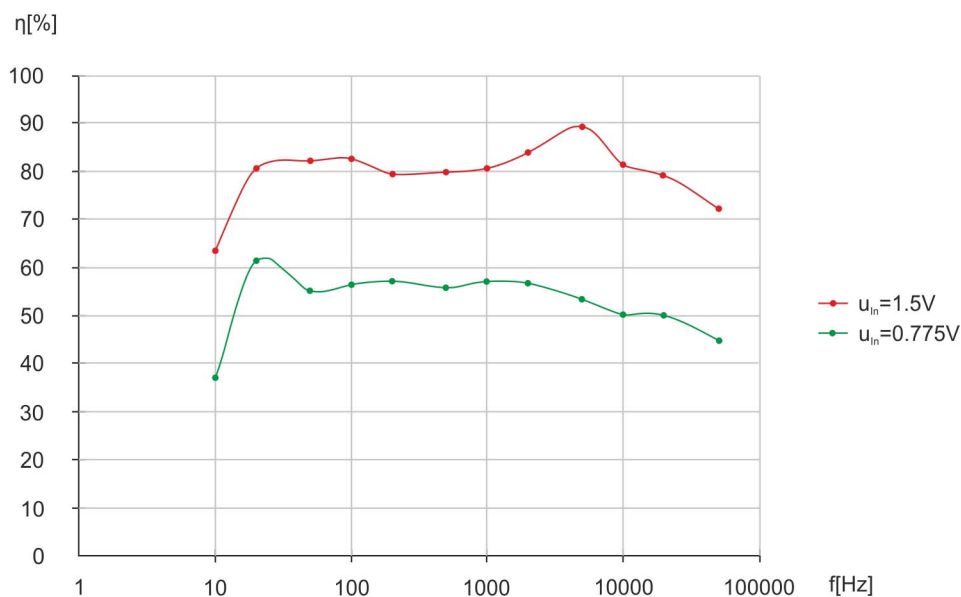
$$P_{in} = U \cdot I [W] \quad (6)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 [\%] \quad (7)$$

Frekvence f [Hz]	$u_{in1} = 0,775V$			$u_{in2} = 1,5V$		
	$P_{in} [W]$	$P_{out} [W]$	$\eta [\%]$	$P_{in} [W]$	$P_{out} [W]$	$\eta [\%]$
10	28.6	10.6	36.9	41.8	26.5	63.5
20	32.3	19.8	61.2	61.6	49.7	80.7
50	38.5	21.2	55.0	70.4	57.8	82.0
100	40.0	22.6	56.3	68.9	57.0	82.8
200	40.3	23.0	57.2	70.0	55.5	79.3
500	40.5	22.6	55.7	68.2	54.8	80.3
1000	40.3	23.0	57.2	69.3	55.5	80.1
2000	39.8	22.6	56.7	68.9	57.8	83.9
5000	39.6	21.2	53.4	70.6	63.2	89.5
10000	39.4	19.8	50.3	85.8	69.7	81.3
20000	38.5	19.4	50.3	88.0	69.7	79.2
50000	33.9	15.2	44.9	66.0	47.6	72.1

Tabulka 4: Tabulka naměřených hodnot výkonů L+P kanálu audiozesilovače

Závislost výstupního výkonu na frekvenci vstupního signálu



Obrázek 6.3: Graf závislosti výkonu zesilovače na frekvenci vstupního signálu

Poznámka. $U_{nap} = 23V, u_{in1} = 0.775V, u_{in2} = 1.5V, R_Z = 8\Omega$

Frekvence f [Hz]	$u_{in1} = 0,775V$			$u_{in2} = 1,5V$		
	$P_{in}[W]$	$P_{out}[W]$	$\eta[\%]$	$P_{in}[W]$	$P_{out}[W]$	$\eta[\%]$
20	33.1	17.1	51.6	62.1	42.9	69.1
100	32.6	12.6	38.7	57.5	37.8	65.7

Tabulka 5: Tabulka naměřených hodnot výkonů subwooferu audiozesilovače

Poznámka. $U_{nap} = 23V, u_{in1} = 0.775V, u_{in2} = 1.5V, R_Z = 4\Omega$

Příklad výpočtu:

$$P_{out} = \frac{U_L^2}{R_L} = \frac{8.26^2}{4} = 17.1W$$

$$P_{in} = U_{nap} \cdot I = 23 \cdot 0.82 = 33.1W$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 = \frac{17.1}{33.1} \cdot 100 = 51.6\%$$

Výkon udávaný výrobcem je 2x25 W rms stereo a 1x50 W rms v zapojení do můstku. Cílem tohoto měření bylo ověřit skutečný výkon a účinnost zesilovače, která je udávaná na

87 %. Z naměřených a vypočtených hodnot je vidět, že výrobcem udávané účinnosti lze dosáhnout, a to dostatečným vybuzením vstupním signálem. Nejvyšší účinnost je tedy až v oblastech vysokých výkonů. Dále je vidět, jak se liší hodnoty výkonů v závislosti na frekvenci signálu.

Výkon subwooferu je menší než 50 W z důvodů nižší úrovně signálu vycházející z předzesilovače, kde všechny koncové stupně jsou nastaveny na stejnou úroveň vstupní citlivosti 22 dB. Tomu odpovídá i nižší účinnost u subwooferu. V menu nastavení zesilovače je ovšem možné vstupní citlivost pro subwoover zvětšit až na 36 dB.

6.2. Modulová kmitočtová charakteristika

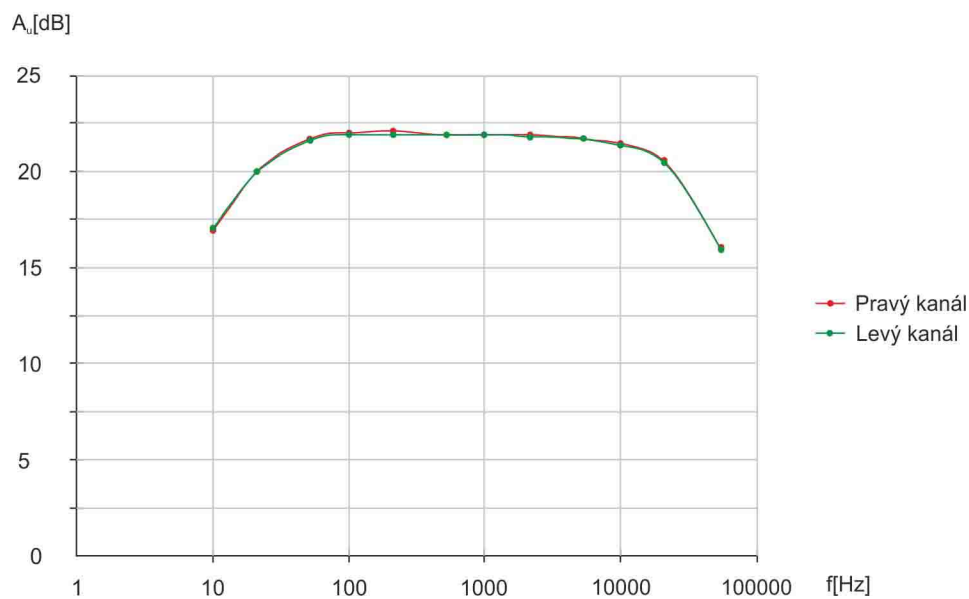
Na vstup zesilovače byl přiváděn harmonický signál o amplitudě 200 mV v kmitočtovém rozsahu 10 Hz až 50 kHz. Na výstupu zesilovače bylo měřeno napětí u_2 , kde přenos byl pak vypočten pomocí vztahu (8). V tabulce 6 jsou vypočtené hodnoty přenosu pro levý a pravý kanál a na obrázku 6.4 je graf modulové kmitočtové charakteristiky. V tabulce 7 jsou vypočtené hodnoty přenosu pro subwoofer a na obrázku 6.5 je graf jeho modulové kmitočtové charakteristiky.

$$A_u = 20 \log \left(\frac{u_2}{u_1} \right) [dB] \tag{8}$$

f[Hz]	Pravý kanál		Levý kanál	
	$u_2[V]$	$A_u[dB]$	$u_2[V]$	$A_u[dB]$
10	1.60	18.6	1.58	17.95
20	2.30	21.21	2.31	21.25
50	2.81	22.95	2.85	23.08
100	2.91	23.26	2.95	23.38
200	2.92	23.29	2.97	23.43
500	2.90	23.23	2.93	23.32
1000	2.91	23.26	2.91	23.26
2000	2.89	23.20	2.91	23.26
5000	2.85	23.08	2.86	23.11
10000	2.73	22.70	2.75	22.77
20000	2.26	21.06	2.29	21.18
50000	1.33	16.45	1.35	16.58

Tabulka 6: Modulová kmitočtová charakteristika zesilovače

Modulová kmitočtová charakteristika zesilovače



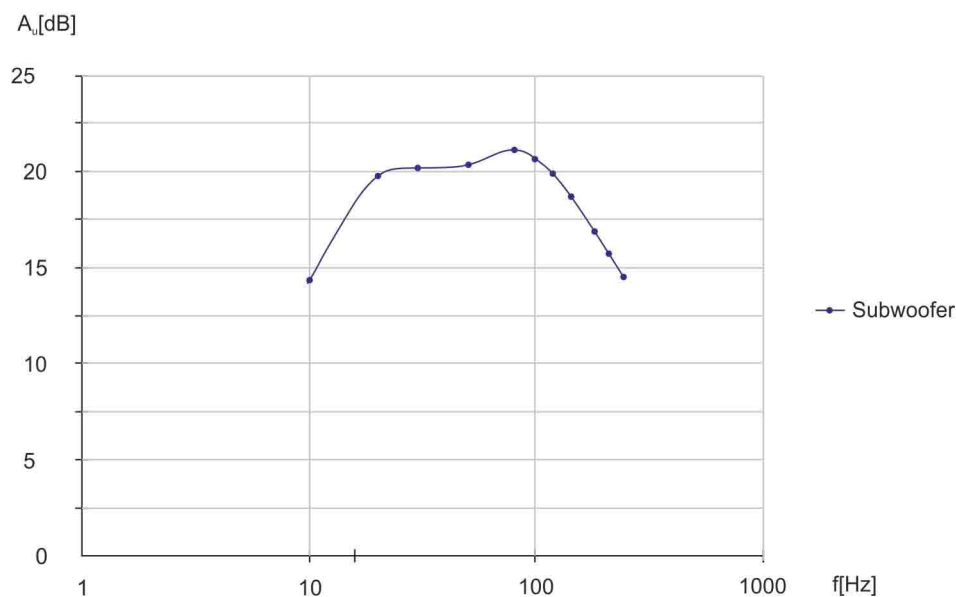
Obrázek 6.4: Graf modulové kmitočtové charakteristiky zesilovače

Poznámka. $U_{nap} = 23V, u_{in} = 200mV, R_Z = 8\Omega$

Subwoofer		
f[Hz]	$u_2[V]$	$A_u[dB]$
10	0.53	14.49
20	0.98	19.82
30	1.02	20.17
50	1.03	20.26
80	1.15	21.21
100	1.08	20.67
120	1.01	20.09
150	0.9	19.08
180	0.8	18.06
200	0.61	15.71
250	0.56	14.96

Tabulka 7: Modulová kmitočtová charakteristika subwooferu

Modulová kmitočtová charakteristika subwooferu



Obrázek 6.5: Graf modulové kmitočtové charakteristiky subwooferu

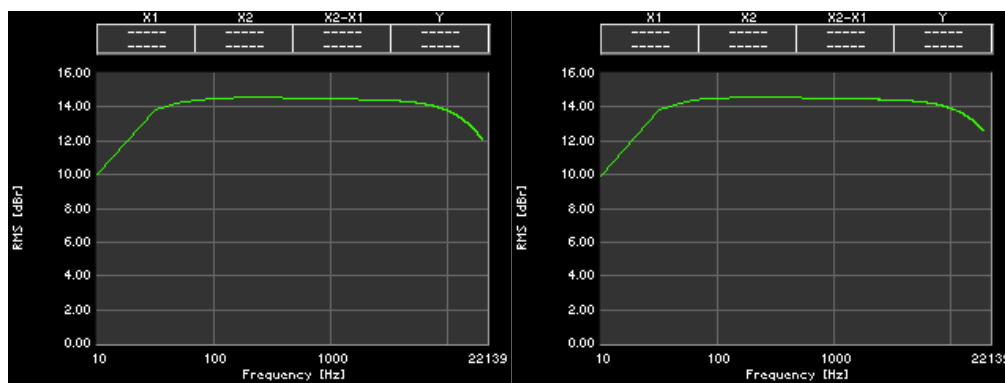
Poznámka. $U_{nap} = 23V, u_{in} = 100mV, R_Z = 4\Omega$

Příklad výpočtu:

$$A_u = 20 \log \left(\frac{u_2}{u_1} \right) = 20 \log \frac{2.81}{0.2} = 22.95 dB$$

Výrobce neudává šířku pásma přenosu, ale z naměřených a vypočtených hodnot lze vyčíst, že je standardně 20 Hz až 20 kHz. Horní mezní hodnota je nastavena výstupním LC filtrem vyhotoveným pouze pro měření parametrů. V praxi je zesilovač bez tohoto filtru za předpokladu silně induktivní zátěže, čili reproduktorů.

Měření modulové kmitočtové charakteristiky bylo také provedeno na audio analyzátoru R&S®UP350. Výsledná charakteristika generovaná přímo přístrojem je na obrázku 6.6.



Obrázek 6.6: Modulová kmitočtová charakteristika měřená audio analyzátořem pro levý a pravý kanál

6.3. Vstupní odpor zesilovače

Mezi vstup zesilovače a generátor harmonického signálu byl sériově připojen očíslovaný potenciometr. Při hodnotě odporu 0Ω bylo na výstupu naměřeno napětí u_2 , odpovídající výkonu 1 W. Postupně byl potenciometr nastavován až do hodnoty, kdy výstupní napětí kleslo na polovinu. Poté byl odečten odpor potenciometru, který odpovídá vstupnímu odporu zesilovače.

$$R_{Lin} = 8,4k\Omega$$

$$R_{Rin} = 8,4k\Omega.$$

Poznámka. $u_1 = 775mV, u_2 = 388mV, f = 1kHz$

Výrobce je vstupní odpor udáván v rozmezí 8-10 k Ω . Tomu odpovídá i naměřená hodnota 8,4 k Ω .

6.4. Výstupní odpor zesilovače

Výstupní odpor byl měřen nepřímou metodou a byl vypočítan pomocí vztahu (9), kde u_l představuje výstupní napětí zatíženého zesilovače a u_{nl} napětí po odpojení zátěže z koncového stupně.

$$R_{out} = R_z \cdot \frac{u_{nl} - u_l}{u_l} \tag{9}$$

Příklad výpočtu:

$$R_{Lout} = R_z \cdot \frac{u_{nl} - u_l}{u_l} = 8 \cdot \frac{9.23 - 9.1}{9.1} = 0,114\Omega$$

$$R_{Rout} = R_z \cdot \frac{u_{nl} - u_l}{u_l} = 8 \cdot \frac{9.23 - 9.1}{9.1} = 0,114\Omega$$

Poznámka. $u_l = 9.1V, u_{nl} = 9.23V, R_z = 8\Omega, f = 1kHz$

Výstupní odpor zesilovače byl změřen $0,114\Omega$ pro levý a pravý kanál. Výstupní odpor zesilovače výrobce neudává.

6.5. Činitel tlumení a vnitřní odpor

Činitel tlumení zesilovače byl vypočítán pomocí vztahu (10). Vnitřní odpor je potom převrácená hodnota činitele tlumení (11).

$$D = \frac{R_z}{R_{out}}. \tag{10}$$

$$R_i = \frac{1}{D} \tag{11}$$

Příklad Výpočtu:

$$D_L = \frac{R_z}{R_{out}} = \frac{8}{0.114} = 70.1 \Rightarrow R_{iL} = \frac{1}{D} = \frac{1}{70.1} = 0.014\Omega$$

$$D_R = \frac{R_z}{R_{out}} = \frac{8}{0.114} = 70.1 \Rightarrow R_{iR} = \frac{1}{D} = \frac{1}{70.1} = 0.014\Omega$$

Poznámka. $R_{Lout} = 0,114\Omega, R_{Rout} = 0,114\Omega, R_z = 8\Omega, f = 1kHz$

U Hi-Fi systémů by měl být vnitřní odpor maximálně třetinu odporu zatěžovacího, to tento audiosesilovač s vnitřním odporem 0.014Ω splňuje.

6.6. Celkové harmonické zkreslení THD+N

Pravý kanál			Levý kanál		
$u_{R2}[V]$	$P_{Rout}[W]$	$THD + N[\%]$	$u_{L2}[V]$	$P_{Lout}[W]$	$THD + N[\%]$
8.1	8.2	1.324	8.2	8.4	1.352
11.5	16.0	7.3	12.3	18.9	7.3

Tabulka 8: Tabulka naměřených hodnot celkového harmonického zkreslení

Poznámka. $f = 1kHz$

Výrobce udává maximální hodnotu harmonického zkreslení 0,1 % při výstupním výkonu 8 W. Maximální celkové harmonické zkreslení by mělo být 10%. Je vidět, že naměřené hodnoty se podstatně liší od udávaných. Měření celkového harmonického zkreslení u tohoto zesilovače je problematické vzhledem k třídě zesilovače a jeho spojením spolu s předzesilovačem. Výsledky lze považovat za silně orientační.

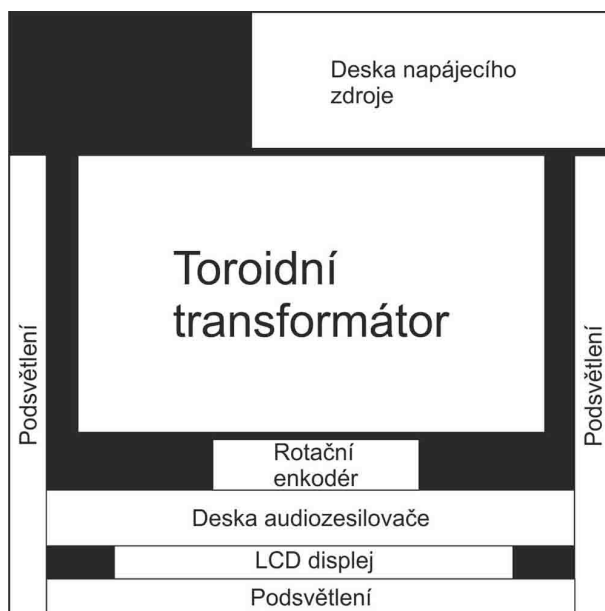
7. Krabička audiozesilovače

Při návrhu krabičky byl kladen důraz především na designový charakter audiozesilovače. Po konzultacích s třineckým designerem Michalem Sedláčkem byla budoucí krabička navržena do tvaru kostky o rozměrech 100x100x100 mm. Na obrázku 7.1 je porovnání původně navržené představy vzhledu krabičky zesilovače vymodelované ve 3D grafickém programu a fotka finální verze krabičky audiozesilovače. Materiál krabičky je výhradně z PMMA (PolyMethyl-MetaAcrylate). To dává výrobku moderní a nevšední nádech, díky optickým vlastnostem tohoto materiálu a ve spojení s podsvětlením LED diod je dosaženo velmi efektního vzhledu. Nevýhodou je poměrně složitá a jemná práce s opracováním plexiskla.



Obrázek 7.1: 3D model krabičky a finální verze krabičky

Před samotným začátkem konstrukce krabičky byla potřeba vhodného vnitřního rozvržení umístění elektroniky. To je vidět na následujícím obrázku 7.2. Největší prostor uvnitř krabičky zaujímá toroidní transformátor, ten je umístěn do středu k zajištění stability krabičky. V zadní části je deska napájecího zdroje včetně baterie filtračních kondenzátorů. V přední části je veškerá řídicí elektronika, základní deska audiozesilovače, LCD displej a rotační enkodér. Ve spodních bocích a vespod přední části krabičky je umístěna deska podsvětlení.



Obrázek 7.2: Rozmístění elektroniky v krabičce

Kostra krabičky zesilovače je zhotovena z 6 mm tlustého čirého plexiskla o celkových rozměrech krabičky 110x110x110 mm, jelikož původní navržené rozměry by nebylo možné realizovat vzhledem k velikosti napájecího zdroje. Přesnost rozměrů plexiskla a děr pro konektory byla zajištěna řezáním pomocí laseru podle narýsované předlohy ve formě křivek. Všechny soubory a fotky týkající se výroby krabičky jsou součástí přílohy. Následovalo navrtání děr, vyřezání závitů pro připevnění vnitřní elektroniky a slepení konstrukce krabičky. Na zadní stranu byly naneseny stříbrné popisy konektorů zesilovače. Potom byla zadní a spodní strana krabičky kromě spodních okrajů přestříkaná černou barvou pro získání potřebného optického efektu.

Co se týče horního pláště krabičky, ten je zhotoven z tmavě hnědého plexiskla. Tento vrchní plášť je přilepen na základní kostru krabičky audiozesilovače. Do pláště byla potřeba pouze vyvrtat otvor pro ovládací tlačítko. Vnitřní plochy tohoto vrchního plexiskla kromě oblasti zobrazení LCD displeje jsou nastříkány modrou metalízou a následně stříbrnou barvou. Výsledná barva vzhledu zesilovače je nazvána “Magic Brown” pro svou schopnost měnit barvu v závislosti na osvětlení, na hnědou, tmavě modrou a černou barvu. Dále je zajímavým efektem zobrazování LCD displeje, který je vidět na předním panelu pouze tehdy, když je zapnut. Efektivně působí také bílé podsvětlení spodní části zesilovače, když je vypnut.

8. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá kompletním návrhem audiozesilovače ve třídě D řízeného mikrokontrolérem, tzn. zahrnuje řešení návrhu nf předzesilovače, koncových stupňů, napájecího zdroje a vhodného ovládacího softwaru. Navíc je audiozesilovač doplněn o rádiové dálkové ovládání a stylovou krabičku. Součástí práce bylo také ověření parametrů zesilovače.

Na začátku celé konstrukce byly důkladně vybrány dílčí komponenty a ověřena jejich funkčnost na vývojových prvcích dle doporučených zapojení výrobce. Jakmile bylo funkční celé zapojení a vyřešeny konstrukční detaily, následoval návrh finálního schématu zapojení a desky plošných spojů. Ta byla navržena jako oboustranná s prokvy oproti původní vývojové verzi audiozesilovače, což umožnilo zmenšení rozměrů a efektivnější vedení spojů, aby deska vyhovovala umístění v krabičce. Po oživení zesilovače následovala realizace softwarové části zesilovače. Nakonec následovalo ověření parametrů zesilovače a zhotovení krabičky.

Mezi největší problémy při vývoji zesilovače patřila část spojení hardwaru a softwaru, týkající se hlavně předzesilovače a dálkového ovládání. Nelehká byla také konstrukce krabičky, která zabrala poměrně hodně času, ať už z důvodů konstrukčního řešení, shánění materiálů, potřeby opatrného zacházení a důsledné výroby, což materiál PMMA vyžaduje. Co se týče parametrů zesilovače, shodují se s parametry udávanými výrobcem. Přesto je nutné přiznat, že jsou naměřené parametry spíše orientační z důvodu absence výstupních LC filtrů.

Celkové zhotovení audiozesilovače zabralo nemalé množství času a je třeba konstatovat, že výsledná práce tomu odpovídá. Výsledkem je audio zařízení, které překvapí rozměry, vzhledem, ale také i schopností reprodukce hudby. Do budoucna se předpokládá uvedení audiozesilovače do sériové výroby jako radioamatérské stavebnice.

Reference

- [1] ELWEB, Elektronika Na Webu Martina Olejára. *Audio zesilovače pracující ve třídě D* [online], [cit. 7. prosince 2010]. Dostupné na WWW: < <http://www.elweb.cz/clanky.php?clanek=109> >
- [2] WIKIPEDIA, The Free Encyclopedia. *Class D amplifier* [online]. 6 December 2010, [cit. 7. prosince 2010]. Dostupné na WWW: < http://en.wikipedia.org/wiki/Class_D_Amplifier >
- [3] KRATOCHVÍL, Tomáš. *Koncové a výkonové zesilovače, Digitální zesilovače s PWM: Přednáška č.5 k předmětu Nízkofrekvenční elektronika*. Brno: FEKT, VUT v Brně, 2008. 54 s.
- [4] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, *MAX5406 Audio Processor with Pushbutton Interface*: Datasheet [online]. 05/2006, [cit. 7. prosince 2010]. 26 s. Dostupné na WWW: < <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX5406.pdf> >.
- [5] PRINCETON TECHNOLOGY CORPORATION, *Sound Fader Controller IC*: Datasheet [online]. 03/2006, [cit. 7. prosince 2010]. 28 s. Dostupné na WWW: < <http://www.princeton.com.tw> >.
- [6] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, *TAS3108 Digital Audio Procesor*: Datasheet [online]. 11/2007, [cit. 7. prosince 2010]. 60 s. Dostupné na WWW: < <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tas3108.pdf> >.
- [7] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, *MAX9709 25W/50W, Filterless, Spread-Spectrum, Stereo/Mono, Class D Amplifier*: Datasheet [online]. 05/2008, [cit. 7. prosince 2010]. 20 s. Dostupné na WWW: < <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX9709.pdf> >.
- [8] ATMEL CORPORATION. *AVR 8-Bit ATmega164/324/644P(V)*: Datasheet [online]. 08/2009, [cit. 16. listopadu 2009]. 439 s. Dostupné na WWW: < http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8011.pdf >.
- [9] ATMEL CORPORATION. *AVR 8-Bit RISC* [online]. 2009, [cit. 7. prosince 2010]. Dostupné na WWW: < <http://www.atmel.com/products/avr/> >.
- [10] FRÝZA, Tomáš. *Zobrazovací zařízení, zpracování analogových signálů : Přednáška č.6 k předmětu Mikroprocesorová technika*. Brno: FEKT, VUT v Brně, 2010. 43 s.
- [11] WIKIPEDIA, The Free Encyclopedia. *HD44780 Character LCD* [online]. 29 September 2010, [cit. 7. prosince 2010]. Dostupné na WWW: < http://en.wikipedia.org/wiki/HD44780_Character_LCD >
- [12] EVERBOUQUET INTERNATIONAL CO., LTD. *CHARACTER LCD MODULES* [online], [cit. 7. prosince 2010]. Dostupné na WWW: < <http://www.everbouquet.com.tw/MC1602C.htm> >
- [13] ELEKTRONIKA KVALITNE, *Použití rotačních enkodérů* [online]. 17 March 2007, [cit. 7. prosince 2010]. Dostupné na WWW: < <http://elektronika.kvalitne.cz/ATMEL/necoteorie/tutorial/RotaryEncoder/RotaryEncoder.html> >
- [14] WIKIPEDIA, The Free Encyclopedia. *Frequency-shift keying* [online]. 29 September 2010, [cit. 28. prosince 2010]. Dostupné na WWW: < http://en.wikipedia.org/wiki/Frequency-shift_keying >

- [15] SUMMITEK Technology Co., Ltd. *FSK Transmitter Module ST-FTX01-FSK*: Datasheet [online]. 2005, [cit. 7. prosince 2010]. 3 s. Dostupné na WWW: < http://www.summitek.com.tw/ST_SPEC/ST-FTX01-FSK.pdf >.
- [16] SUMMITEK Technology Co., Ltd. *FSK Super Heterodyne Receiver ST-FRX01-FSK*: Datasheet [online]. 2005, [cit. 7. prosince 2010]. 2 s. Dostupné na WWW: < http://www.summitek.com.tw/ST_SPEC/ST-FRX01-FSK.pdf >.
- [17] ATMEL CORPORATION. *AVR 8-Bit ATtiny2313/V*: Datasheet [online]. 08/2010, [cit. 7. prosince 2010]. 226 stran. Dostupné na WWW: < http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2543.pdf >.
- [18] NOVÁČEK, Z. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení*. VUTIUM, Brno, 2006, ISBN 80-214-3301-9
- [19] FISCHL, *USB programmer for Atmel AVR controllers* [online], [cit. 15. května 2011]. Dostupné na WWW: < <http://www.fischl.de/usbsp> >
- [20] AVR FREAKS, *AVR GCC forum - Rotary Encoder Strategies?* [online], [cit. 15. května 2011]. Dostupné na WWW: < <http://8515.avrfreaks.net/index.php?name=PNphpBB2&file=printview&t=3223&start=20> >
- [21] FLEURY, P. *LCD library for HD44870 based LCD's* [online], [cit. 15. května 2011]. Dostupné na WWW: < <http://homepage.hispeed.ch/peterfleury> >

Seznam zkratek

PWM - *Pulse Width Modulation*, pulzní šířková modulace

PDM - *Pulse Density Modulation*, obdoba PWM v digitální formě

MOSFET - *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, metal oxidový tranzistor řízený polem

FFM - *Fixed Frequency Modulation*, pevně dána frekvence modulace

SSM - *Spread Spectrum Modulation*, rozprostřené spektrum modulace v okolí určité její hodnoty

TQFN - *Thin Quad Flat No-lead package*, tenké hranaté poudro integrovaného obvodu pro plošnou montáž bez vývodů

TQFP - *Thin Quad Flat Pack*, tenké hranaté poudro integrovaného obvodu pro plošnou montáž

LCD - *Liquid crystal display*, displej z tekutých krystalů

I2C - *Inter-Integrated Circuit*, počítačová sériová sběrnice vyvinutá firmou Philips

FSK - *Frequency-Shift Keying*, frekvenční klíčování. Je typ digitální frekvenční modulace

DPS - *Deska Plošných Spojů*

ADC - *Analog to Digital Converter*, analogově digitální převodník

FSK - *Frequency-Shift Keying*, frekvenční modulace (digitální)

ISP - *In System Programming*, zařízení je možné programovat v systému

MCU - *Microcontroller Unit*, mikrokontrolér, mikroprocesor

RISC - *Reduced Instruction Set Computer*, počítač s redukovanou instrukční sadou

USART - *Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter*, univerzální periferie MCU synchronní/asynchronní komunikace po sériové lince

PMMA - *Poly Methyl Meta Acrylate*, organické plexisklo

CTC - *Clear Timer on Compare match*, vynulování časovače při shodě porovnávání

Příloha

A. Seznam součástek

Zesilovač

Součástka	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1,R2,R9,R13	470r	R0603	Rezistor
R4,R7,R14	10k	R0603	Rezistor
R5,R6	10k	R1206	Rezistor
R3	10k	TRIMM4G/J	Rezistor
C1,C10,C29,C38	1u	C0603	Keramický kondenzátor
C2	220n	C0603	Keramický kondenzátor
C3,C13	3n3	C0603	Keramický kondenzátor
C4,C11	4n7	C0603	Keramický kondenzátor
C5,C22,C31,C45	100n	C1206	Keramický kondenzátor
C17,C19,C20,C21,C32,C33	100n	C0603	Keramický kondenzátor
C6,C7,C9,C15,C18,C23,C35,C37C39,C40	1u/16V	SMC_A	Tantalový kondenzátor
C8,C16,C26,C30,C34,C36	47u/50V	153CLV-0605	Elektrolytický kondenzátor
C12,C14	22p	C0603	Keramický kondenzátor
C24,C25	470n	C0603	Keramický kondenzátor
C27,C28	10n	C0603	Keramický kondenzátor
D1,D2	1N4148	D0805	Univerzální dioda
LED1	L-C170KRCT	D0805	LED dioda
L1	LQH1N150K04	L1206	Tlumivka
IC1	ATmega164PA	TQFP44	Mikrokontrolér
IC2	7805DT	TO252	Stabilizátor
IC3,IC4	MAX9709	56-QFN	Komcové stupně
IC5	MAX5406	48-TSSOP	Předzesilovač
DIS1	MC1602C8-SBLW		LCD displej
T1	BC846	SOT23	Bipolární tranzistor
Q2	12MHz	HC49/S	Krystal
S1	B3F-10XX		Mikrospínač
E1	DPL12S	ENCODER	Rotační enkodér
V1	WRX868		Přijímací vf modul

Zdroj

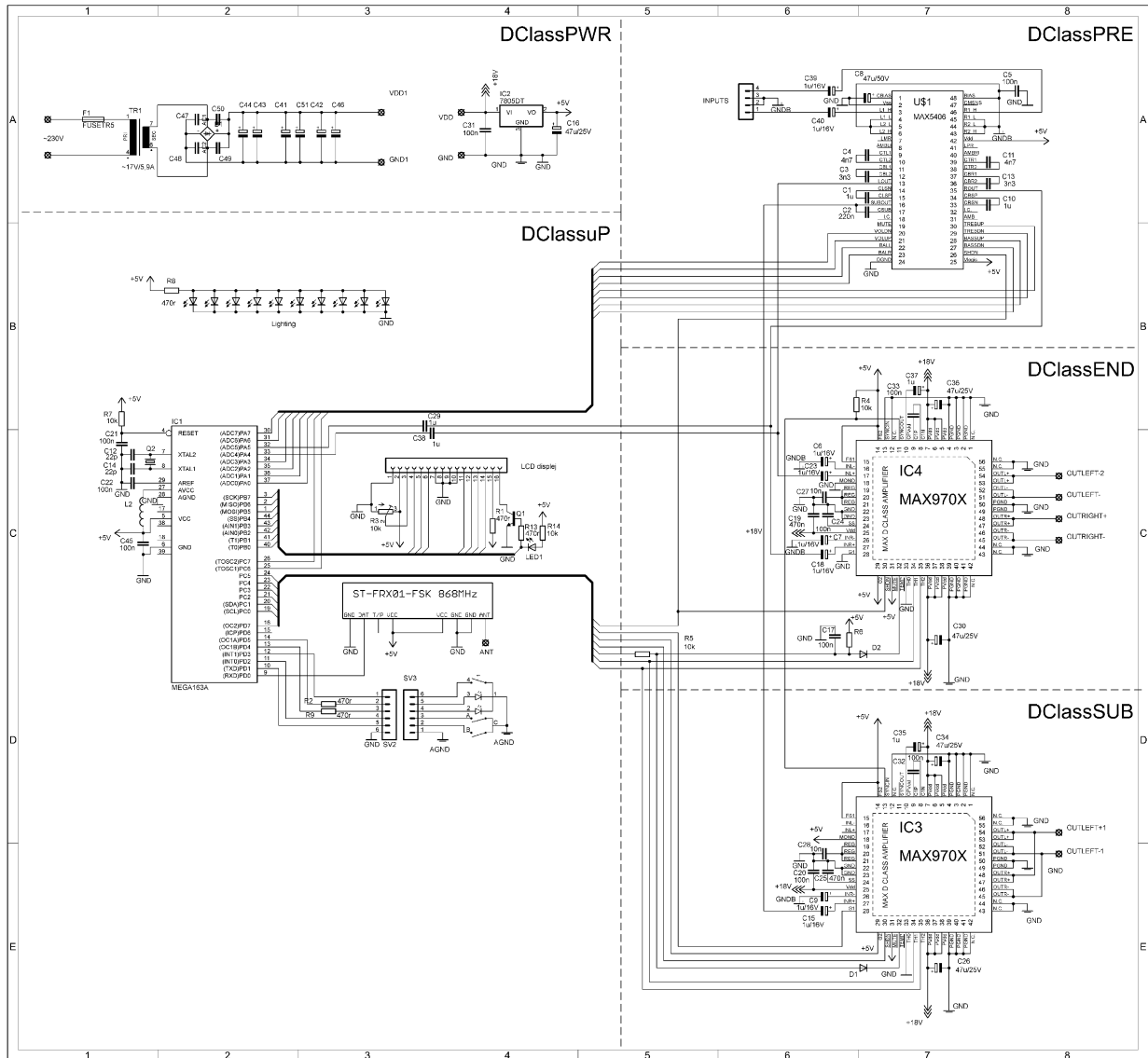
Součástka	Hodnota	Pouzdro	Popis
B1	B250C6000	KBU610	Usměrňovací Graetzův můstek
C41	100n	B32651	Keramický kondenzátor
C42,C43,C44,C45,C46,C47	4700u/35V, elektrolytický	Radiální	Elektrolytický kondenzátor
TR1	15V/5A		Toroidní síťový transformátor

Dálkové ovládání

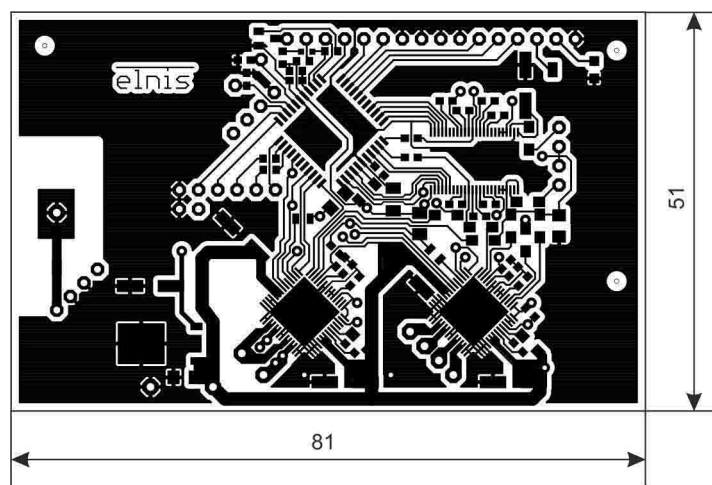
Součástka	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1	470r	R0603	Rezistor
LED1	L-C170KRCT	D0805	LED dioda
S1,S2,S3,S4,S5,S6	B3F-10XX		Mikrospínač
IC1	ATtiny2313	SO20L	Mikrokontrolér
V1	WTX868		Vysílací vf modul
BAT1	CR2020		Baterie

B. Schéma zapojení a desky plošných spojů

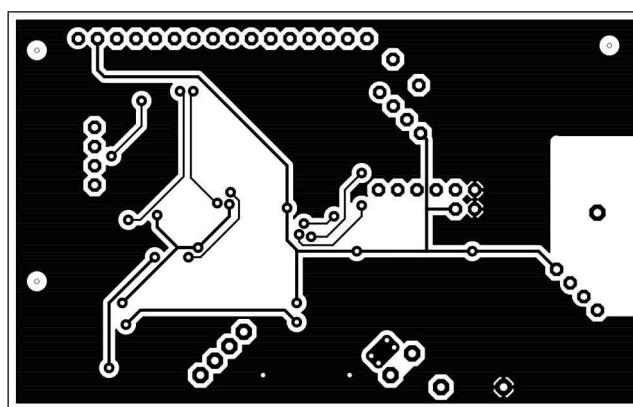
Hybride D-Class power amplifier 2x25W and 1x50W with uP controlled PreAmplifier



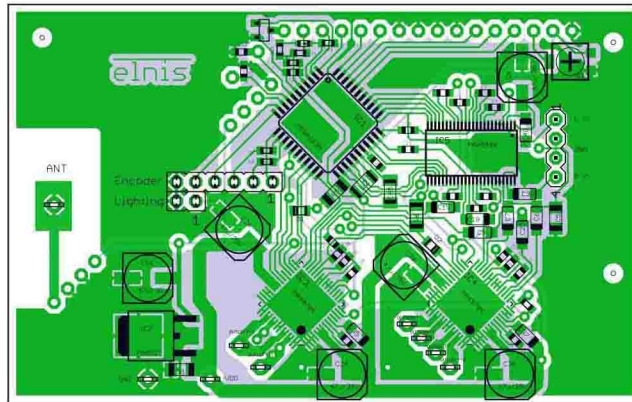
Obrázek 8.1: Schéma zapojení



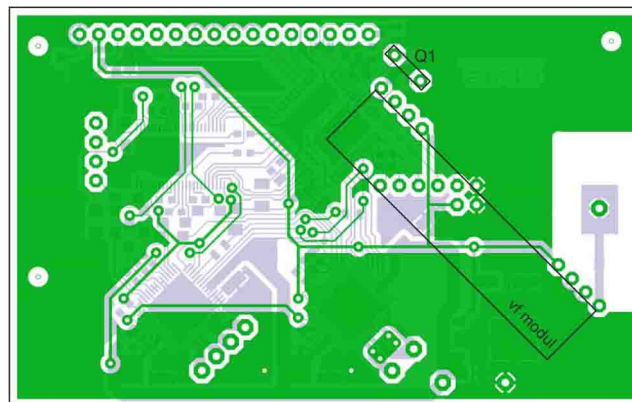
Obrázek 8.2: Vrchní strana DPS zesilovače



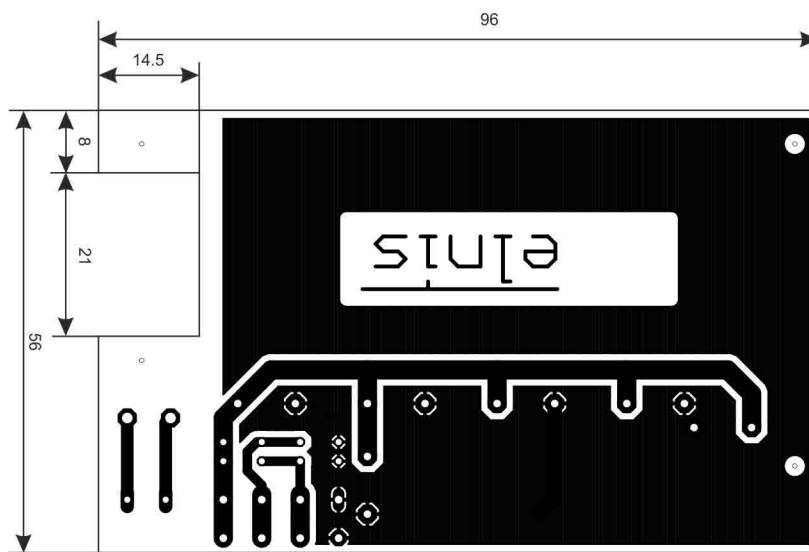
Obrázek 8.3: Spodní strana DPS zesilovače



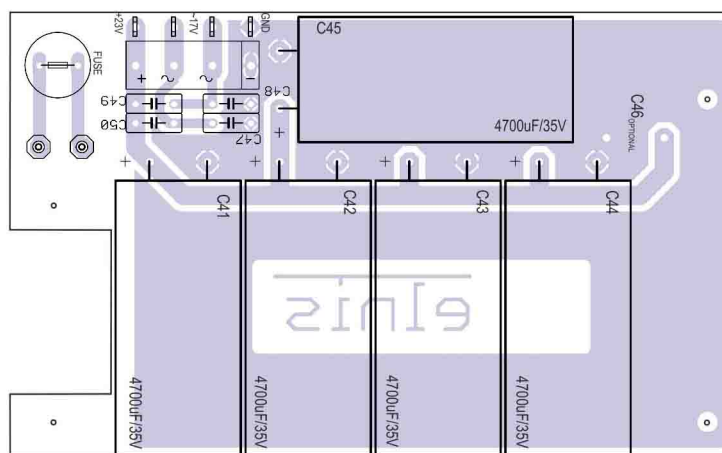
Obrázek 8.4: Osazení vrchní strany DPS zesilovače



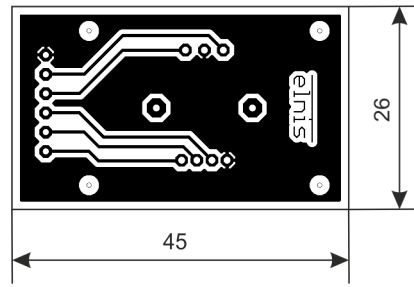
Obrázek 8.5: Osazení spodní strany DPS zesilovače



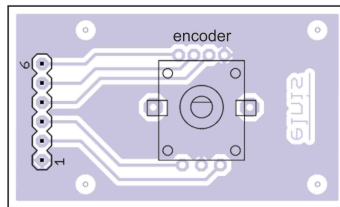
Obrázek 8.6: DPS napájecího zdroje



Obrázek 8.7: Osazená DPS napájecího zdroje

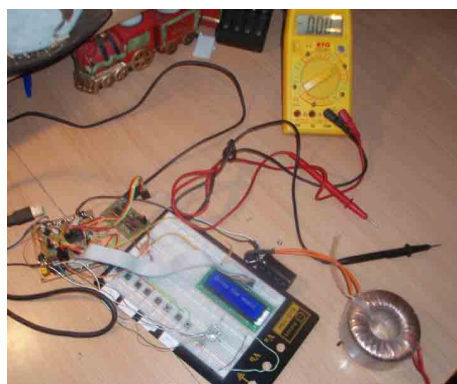


Obrázek 8.8: DPS enkodéru



Obrázek 8.9: Osazení DPS enkodéru

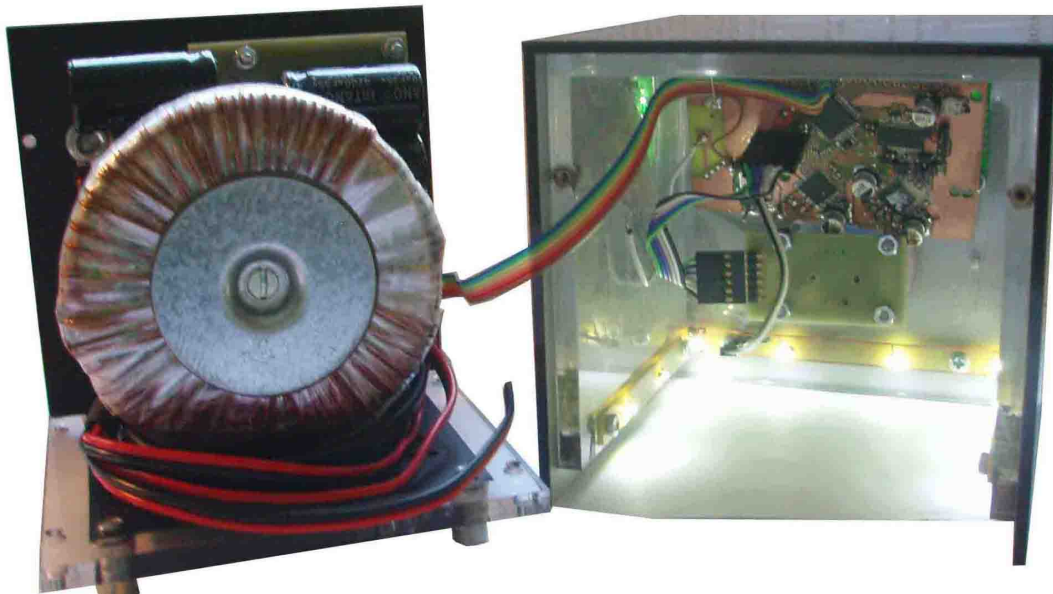
C. Fotogalerie



Obrázek 8.10: Fotka z vývoje zesilovače



Obrázek 8.11: Fotky z výroby krabičky



Obrázek 8.12: Pohled dovnitř krabičky



Obrázek 8.13: Spodní a horní část krabičky zesilovače



Obrázek 8.14: Přední pohled na zesilovač