

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

DIGITÁLNÍ ZVUKOVÉ EFEKTY V OBVODU FPGA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

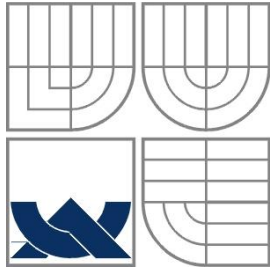
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

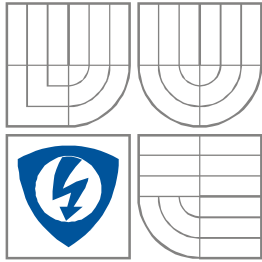
PŘEMYSL DULA

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

DIGITÁLNÍ ZVUKOVÉ EFEKTY V OBVODU FPGA

DIGITAL AUDIO EFFECTS IN FPGA CHIP

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PŘEMYSL DULA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MAREK BOHRN

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Přemysl Dula

ID: 125409

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Digitální zvukové efekty v obvodu FPGA

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte zařízení realizující zvukové efekty pro hudební nástroje pomocí obvodu FPGA. Prostudujte vlastnosti nejčastěji používaných zvukových efektů a možnosti jejich implementace do obvodu FPGA. Vyberte minimálně tři efekty, které budou implementovány do výsledného zařízení. Navržené zařízení bude mít analogový linkový vstup a výstup. Převod AD a DA bude realizován pomocí obvodu Audio CODEC. Zpracování zvuku bude provedeno digitálně v obvodu FPGA.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 16.8.2012

Vedoucí práce: Ing. Marek Bohrn

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, 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

Tato práce se zabývá návrhem a realizací digitálního efektového procesoru. V jednotlivých kapitolách je popsáno rozdělení analogových a digitálních efektů, princip a popis efektů, které jsou implementovány do FPGA obvodu, popis AD/DA převodníku a popis programu a jeho jednotlivých částí.

Klíčová slova

Efektový procesor, analogové, digitální efekty, AD/DA převodník, FPGA obvod

Abstract

This thesis deals with the design and implementation of digital effects processor. Each chapter describes the distribution of analog and digital effects, the principle and description of effects that are implemented in the FPGA, the description of AD/DA converter and description of the program and its individual parts. The conclusion work contains a summary of undergraduate work.

Key words

Effect processor, analog, digital effects, AD/DA converter, FPGA

Bibliografická citace

DULA, P. *Digitální zvukové efekty v obvodu FPGA*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Bohrn.

Prohlášení

Prohlašuji, že svůj bakalářský projekt na téma **Digitální zvukové efekty v obvodu FPGA** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářského 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 uvedeného bakalářského projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 16. srpna 2012

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářského projektu Ing. Marku Bohrnovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého bakalářského projektu.

V Brně dne 16. srpna 2012

.....

podpis autora

Obsah

Úvod.....	1
1 Kytarové efekty	2
1.1 Analogové efekty	2
1.2 Digitální efekty.....	3
1.3 Druhy efektů.....	4
1.4 Výběr efektů	4
2 Integrované obvody	9
2.1 Převodník a formát dat	9
2.2 Operační zesilovač, stabilizátor napětí.....	10
3 Praktické řešení.....	12
3.1 Vývojový kit.....	12
3.2 Převodník	13
3.3 Předzesilovač.....	19
3.4 Návrh DPS.....	21
4 Popis programu	23
4.1 Nastavení registru – blok control_registr	23
4.2 Blok přednastavení efektů.....	24
4.3 Blok příjem/odeslání dat	25
4.4 Blok memory	26
4.5 Blok efekty	27
5 Závěr	32
6 Rejstříky, seznamy a použité součástky	34
6.1 Použitá literatura	34
6.2 Abecední seznam zkratk.....	36

Seznam obrázků

Obr. 1	Analogový efekt distortion DS-1 [7]	2
Obr. 2	Podlahový digitální efektový procesor BOSS GT-10 [11]	3
Obr. 3	Blokové schéma efektu delay	6
Obr. 4	Blokové schéma efektu chorus	7
Obr. 5	Zapojení OZ s neinvertujícím vstupem [6]	10
Obr. 6	Průchod signálu	12
Obr. 7	Zjednodušené blokové schéma převodníku PCM3002 [12]	14
Obr. 8	Ztráta synchronizace mezi DAC a ADC se systémovými hodinami [12]	17
Obr. 9	Kontrola vstupních dat pomocí třívodičového rozhraní [12]	17
Obr. 10	Pouzdro s vývody a doporučeným zapojením součástek	19
Obr. 11	Předzesilovač	20
Obr. 12	Osazená DPS	22
Obr. 13	Celkové obvodové schéma programu	23
Obr. 14	Schéma přednastavení efektů	25
Obr. 15	Blokové schéma části programu příjem/odeslání dat	26
Obr. 16	Schéma programovaných efektů	27
Obr. 17	Blokové schéma efektu distortion	27
Obr. 18	Blokové schéma efektu delay	28
Obr. 19	Blokové schéma efektu chorus	30

Seznam tabulek

Tabulka 1: pořadí zapojení efektů [5]	4
Tabulka 2: Frekvence systémových hodin [12]	15
Tabulka 3: Nastavitelné funkce.....	18

Úvod

Hudební efekty, dříve nazývané zvukové operátory, se v současné hudbě používají téměř u všech nástrojů i zpěvů. Upravují výsledný zvuk hudebního nástroje do námi požadovaného. Dělalí tím zvuk bohatším a zajímavějším. Nejvíce se efekty uplatňují u elektrické kytary (správně se tento nástroj nazývá elektrofonická kytara), kde se využívá i zkreslení signálu, což je u jiných nástrojů nežádoucí. Výsledný zvuk je tvořen efekty, které jsou zapojeny za sebou. Vliv na zvuk má kromě samotných efektů i pořadí jejich zapojení, které není přesně definované, je individuální a každému hudebníkovi může vyhovovat jiné zapojení.

Cílem projektu je navrhnout efektový procesor s minimálně třemi efekty spolu s praktickým řešením. Je vybrán AD/DA převodník, který převádí analogový signál získaný z hudebního nástroje na digitální. Tento signál je upraven v obvodu FPGA a následně je převeden pomocí převodníku zpět na analogový signál. Je navržena DPS, na které se nachází převodník spolu s dalšími součástkami. Nachází se na ní i předzesilovač, který sice není součástí zadání práce, ale je navržen, aby se zvýšila vstupní impedance a také aby bylo možné nastavit co nejlépe úroveň signálu. Tato DPS je připojena do konektoru desky s FPGA obvodem.

1 Kytarové efekty

Kytarové efekty jsou elektronická zařízení, která ovlivňují zvuk nástroje. Záleží na konkrétním efektu a jeho nastavení, jak silně bude výsledný zvuk modulován. V dnešní době efekty využívají téměř všichni hudebníci. Používají se nejen při nahrávání skladeb, ale i při živém hraní. Efekty můžeme rozdělit na základní dvě skupiny – analogové a digitální.

1.1 Analogové efekty

Tyto efekty jsou stále používány pro svou kvalitu, vyrábí se stále nové verze starších efektů. Jsou tvořeny pasivními součástkami, tranzistory, diodami, popřípadě i operačními zesilovači a složitější efekty i IO. Odezva výstupního signálu na vstupní je téměř okamžitá.

Efekty mají obvykle provedení malé „krabičky“ s jedním přepínačem (zapne efekt nebo nastaví efekt do stavu tzv. truebypass, což znamená, že signál neprochází přes žádné součástky, ale je ze vstupu přiveden přímo na výstup), několika potenciometry, kterými se nastavují různé funkce efektu, dvěma vstupy (jeden pro napájení a druhý pro vstupní signál) a výstupem (někdy i více výstupy, záleží na typu efektu). Pokud chceme použít více efektů, zapojují se jednotlivé krabičky sériově za sebe a výsledný zvuk je ovlivněn všemi použitými efekty.



Obr. 1 Analogový efekt distortion DS-1 [7]

1.2 Digitální efekty

Oproti analogovým efektům mají digitální efekty menší počet součástí, neovlivňují se jednotlivé bloky uvnitř efektu navzájem, je možné vytvořit více druhů efektů, které vyžadují paměť a jsou časově stálé (analogové součástky časem stárnou a mohou měnit své vlastnosti a tím měnit zvuk).

Digitální efekty se vyrábí jako jednotlivé efekty, stejně jako analogové, ale také jako tzv. multiefekty, což znamená, že v jednom zařízení je více efektů. Můžeme tedy kombinovat různé efekty, každý zvlášť nastavit a uložit a vytvořit si díky tomu několik druhů efektů, mezi kterými můžeme přepínat a ovlivňovat jimi výsledný zvuk.

Multiefekty se vyrábí pro umístění do tzv. racku (speciální konstrukce), kdy se k efektu musí ještě připojit nožní pedál pro ovládání, nebo jako podlahové, které se umísťují na podlahu k hráči a ten jej během hry ovládá pomocí nohou (obr. 2).



Obr. 2 Podlahový digitální efektní procesor BOSS GT-10 [11]

Vstupní analogový signál u digitálních efektů je přiveden na AD převodník, ten jej převede na digitální signál, a poté je přiveden do obvodu, který jej upraví podle požadavků. Po úpravě je signál přiveden na DA převodník, ten jej převede zpět na analogový a ten je poté přiveden do sluchátek, vstupu zesilovače nebo jiného podobného zařízení na reprodukci zvuku. Vstupní signál prochází u analogových efektů pouze součástkami, které jej záměrně ovlivňují. U digitálních efektů signál prochází i AD/DA převodníkem, který by měl zajišťovat pouze převod signálu. Způsobuje ovšem i nechtěné zkreslení, které se nazývá kvantizační šum. [14]

1.3 Druhy efektů

Existuje velké množství efektů. Příklad a popis efektů je uveden v příloze C. Při použití více než jednoho efektu ovlivňuje zvuk nejen jejich nastavení, ale i pořadí, v jakém jsou zapojeny. Toto zapojení není pevně dané, je individuální, ale nejčastější pořadí zapojení je uvedeno v tabulce 1. Efekty jsou seřazeny sestupně, první efekt (v tabulce nejvýše) je zapojen za nástrojem, za posledním efektem (v tabulce nejnižší) je zapojen zesilovač.

Tabulka 1: pořadí zapojení efektů [5]

Typ efektu	Příklad efektu
efekty upravující hlasitost	compressor
efekty modulující frekvenční spektrum	pre-distortion EQ
zkreslení	overdrive, distortion
efekty modulující frekvenční spektrum	post-distortion EQ
modulační efekty	chorus, flanger
efekty upravující hlasitost	tremolo, noisegate
efekty pracující s časovým průběhem	delay, reverb

U některých efektů je velký rozdíl mezi řešením analogovým a digitálním. Například efekt delay, řešený pomocí analogových obvodů, dosahuje zpoždění jen několik stovek milisekund, v případě digitálního řešení však dosahuje zpoždění i přes pět sekund.

1.4 Výběr efektů

Efekty, které jsou realizovány v této práci, jsou tři a jsou to efekty distortion, delay a chorus. Výběr těchto efektů byl prováděn na základě možného využití efektů (nemělo by smysl vybírat efekty, které by po vyrobení a zprovoznění efektového procesoru nebyly využity) a zároveň možné realizace (aby nebyla příliš komplikovaná). Vybrané efekty jsou v následující podkapitole více rozebrány.

1.4.1 Distortion

Běžně je v hudbě kladen důraz na co nejmenší zkreslení signálu. Existují ale i systémy, které zkreslení záměrně vyvolávají. Tyto systémy se používají při zkreslení signálu z elektrické kytary (u jiných nástrojů se tento efekt téměř nepoužívá). Typickým příkladem takového systému je efekt distortion. Tento efekt může změnit sinusový signál až téměř na obdélníkový (záleží na velikosti zkreslení). Často je tento efekt řešen přímo na kytarových zesilovačích. Pokud není na zesilovači řešen nebo není kvalitní, lze připojit speciální analogový nebo digitální systém, který efekt distortion vytváří. Tento efekt je nejvíce využíván v rockové hudbě, kde si každý kytarista vytváří vlastní typické zkreslení.

Realizace pomocí funkce

Základní blok tohoto efektu je nelineární zkreslení. To lze popsat nelineárním operátorem $\Psi()$. Vztah mezi vstupním a výstupním signálem je

$$y[n]=\Psi (x[n]) \quad (1)$$

Funkce Ψ může být libovolná nelineární funkce například \tanh nebo atan . Toto zkreslení je stálé a nelze ovlivnit jeho velikost. Při zpracování signálu časově variantním systémem, kdy se s časem mění funkce, se vychází z předlohy nelineárních analogových efektů, kde pomocí nastavení pracovního bodu určujeme mimo jiné napěťové zesílení daného elektronického prvku. Pro zesílení v číslicové oblasti bude platit:

$$m[n] = \frac{y[n]-y[n-1]}{x[n]-x[n-1]} \quad (2)$$

a odtud lze vyjádřit výstupní signál jako:

$$y[n] = y[n-1]+m[n](x[n]- x[n-1]) \quad (3)$$

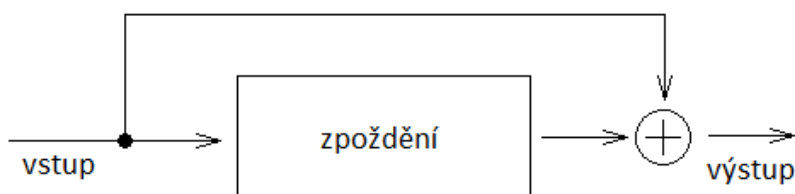
kde $m[n]$ je časově proměnný parametr zesílení, $x[n]$ a $y[n]$ jsou vstupní a výstupní napětí. [4]

Realizace

Realizace efektu pomocí funkce \tanh nebo atan je náročná na výpočet. Navíc není možné takto řešený efekt nastavovat. Proto je efekt distortion realizován tak, že vstupní signál je zesílen a špičky signálu jsou oříznuty. Zkreslení tedy závisí na velikosti zesílení vstupního signálu. Výstupní signál může být až téměř obdélníkový při velkém zesílení nebo naopak nemusí být zkreslen vůbec a může být jen zesílen (pokud bude úroveň vstupního signálu nízká).

1.4.2 Delay

Tento efekt využívá zpožďovací smyčku. Základní princip efektu delay je přičíst zpožděný vstupní signál k nezpožděnému vstupnímu signálu. Pokud je délka zpoždění dostatečně velká (minimálně 0,2 s), výsledný zvuk obsahuje ozvěnu. [12] Při různých délkách zpoždění má ozvěna různou prodlevu. Blokové schéma efektu delay je na obrázku 3. [1]



Obr. 3 Blokové schéma efektu delay

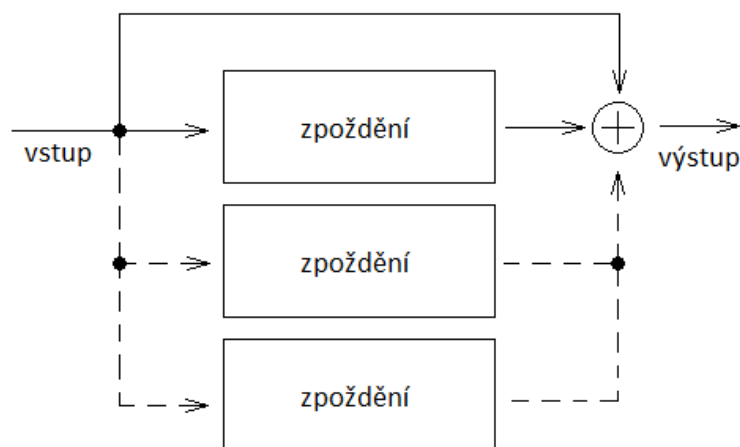
Existuje několik variant efektu delay. Jednoduchá varianta efektu delay pouze kopíruje a zpožďuje signál. Další varianta je dynamický delay, ten mění míru ozvěny podle dynamiky hry. Čím dynamičtěji se hraje, tím je míra efektu na výstupu menší, naopak pokud dynamika hry klesne, delay se prosazuje více, zvuk je čitelnější. Z dalších variant je například možné nastavit dva efekty delay nezávisle na sobě a ty se poté střídavě přesouvají na levé a pravé straně stereo soustavy. Zajímavá je i varianta, kdy je úsek přehráván donekonečna. Tato varianta se nazývá loop/sampler. To je výhodné, pokud je hudebník sám. Efekt totiž sčítá nahrané úseky a vytváří výsledný zvuk. Tato varianta ovšem není typický delay, spíše se většinou řadí do samostatné kategorie. [8]

Realizace

Efekt delay je na realizaci jeden z nejjednodušších, jelikož stačí, když je zpožděn vstupní signál. To se provede tak, že jsou jednotlivé vzorky ukládány do externí paměti. Po čase, který je nastaven, jsou načítány z paměti a jsou sčítány se vzorky signálu na vstupu. Záleží jen na velikosti použité paměti, jaké je maximální zpoždění, které lze realizovat.

1.4.3 Chorus

Efekt chorus vytváří dojem, že hraje více nástrojů najednou. Ve sboru má každý nástroj jiné zbarvení, takže výsledný zvuk tvoří původní signál upravený frekvenční modulací. Často je použito více zpožďovacích obvodů, jsou zapojeny paralelně a na výstupu přimíchány k původnímu signálu (obr. 4). Doba zpoždění je řízena pomocí LFO (low frequency oscillator – nízkofrekvenční oscilátor). Je možné jej měnit, a tím ovlivnit průběh signálu. Charakteristický je sinusový nebo pilový průběh. Dobrých výsledků je možné dosáhnout náhodným průběhem, který simuluje reálné chování muzikanta. Rozkmitání LFO bývá v jednotkách Hz, obvykle do 5Hz, protože při vyšší frekvenci by nástroj nezněl čistě.



Obr. 4 Blokové schéma efektu chorus

Vstupní signál prochází přes zpožďovací linku (popřípadě více zpožďovacích linek), kde je signál zpožděn o 10-20 ms. Při větším zpoždění (nad 20 ms) se signál zdvojí a při ještě větším zpoždění by byla slyšet ozvěna. [2]

Pokud by nebyl k upraveným signálům přimíchán původní signál, vznikl by efekt vibrato, ale vzorkovací frekvence by musela být vyšší, aby nebyl signál na výstupu příliš zpožděný. Efekt vibrato používají spíše kytaristi, kteří nemají na kytaru pohyblivou mechaniku, slouží ke zvýšení a snížení tónu. Efektu lze docílit i pohybem struny na hmatníku směrem do stran. [14]

Realizace

Vstupní signál je přiveden do zpožďovacího bloku, kde je zpožděn. Zpoždění je realizováno tak, že vzorky signálu jsou nahrány do paměti jako u efektu delay a po určité době načteny. Doba zpoždění signálu je v rozmezí 10 – 25 ms, zpoždění určuje modulaci signálu. Tím vznikne dojem, že hraje další nástroj, protože signál není jen zkopírovaný, ale mění se výška jednotlivých tónů. Chorus lze nastavit pomocí frekvence LFO a průběhu generovaného signálu. Průběh signálu je nastaven trvale jako pilový, délka zpoždění se mění.

2 Integrované obvody

V této kapitole jsou teoreticky rozebrány IO, které jsou využity při realizaci. Jedná se o převodník AD/DA a pak také operační zesilovač a stabilizátor.

2.1 Převodník a formát dat

Aby bylo možné digitálně pracovat se signálem z nástroje, je potřeba jej převést na digitální signál a po zpracování jej převést zase zpět na analogový signál. Tento převod zajišťuje převodník AD a DA. Je možné vybrat pro každý převod samostatný převodník, nebo existují i převodníky, které zvládají i AD i DA převod.

Pro audio se používají alespoň 16 bitové převodníky, je možné použít například i 10 bitový, ale výsledný zvuk nebude příliš kvalitní. Převodníky, určené přímo pro audio převod, obsahují užitečné funkce, které ulehčují práci se signálem, navíc lze zvolit jeden IO a ten řeší jak AD tak DA převod.

Existují i průmyslové převodníky, které nejsou sestrojeny na audio převod, ale je možné použít i je. Největší problém je u nich to, že neumí pracovat se záporným signálem. Převodníky určené na audio převod umí sami signál posunout a vytvořit virtuální nulu. Pro průmyslový převodník, který tuto funkci nemá, je potřeba navrhnout další obvod, který posune signál do kladných hodnot. Navíc jsou tyto převodníky většinou 8-12 bitové (dražší jsou i vícebitové, ale v takovém případě se vyplatí spíše koupit převodník určený přímo na audio) a výsledný zvuk proto není moc kvalitní.

Pro přenos signálu se používají hlavně dva typy formátu dat:

- I2S (taktéž Inter-IC Sound, Integrated Interchip Sound, nebo IIS) je standardní rozhraní sériové sběrnice, která propojuje digitální zvukové zařízení. Je nejvíce používané pro přenos PCM - pulsně kódované modulace. [9]
- Další používaný formát dat je SPI (serial peripheral interface). Pracuje v duplexním režimu, což znamená, že data mohou být přenášena v obou směrech současně. SPI je nejčastěji používán v systémech pro komunikaci mezi procesorem a periferními zařízeními, nebo při propojení dvou mikroprocesorů. Pro přenos audio dat se moc nepoužívá. [15]

2.2 Operační zesilovač, stabilizátor napětí

Důvod proč je využit operační zesilovač a stabilizátor je předzesilovač. Ten sice není součástí zadání, ale je navržen kvůli regulaci úrovně vstupního signálu a zvýšení vstupní impedance.

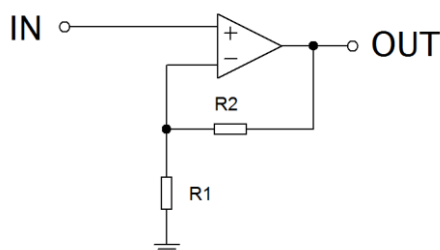
2.2.1 Operační zesilovač

Operační zesilovač byl původně navržen pro analogové počítače, aby zpracovával složité matematické operace. V současné době má všestranné využití, používá se pro zpracování jak stejnosměrných tak střídavých signálů. Obvod plní funkci zesilovače a svými parametry se blíží ideálnímu zesilovači. Ideální zesilovač by měl mít tyto vlastnosti:

- nekonečně velké proudové i napěťové zesílení,
- nekonečně velký vstupní odpor,
- nulový výstupní odpor,
- frekvenční nezávislost,
- nulové zesílení souhlasného napětí,
- parametry ideálního OZ se nemění v závislosti na okolí.

U jednoho typu reálného OZ nelze těchto parametrů dosáhnout, proto se vyrábí podle potřeby výkonové, nízkošumové, širokopásmové, s velkým vstupním oporem apod.

Existuje několik způsobů zapojení, které signál různým způsobem upravují: invertující zapojení (zesiluje signál a posouvá fázi o 180°), neinvertující zapojení (signál zesiluje, ale neposouvá fázi), sledovač napětí (používá se pro oddělení vysokoimpedančního vstupu a nízkoimpedančního výstupu) a další. Příklad zapojení s neinvertujícím vstupem je na obr. 5.



Obr. 5 Zapojení OZ s neinvertujícím vstupem [6]

Vstupní napětí je přivedeno na neinvertující vstup (plusová svorka) a na invertující vstup (minusová svorka) je přivedena záporná zpětná vazba. Toto zapojení nezpůsobuje změnu fáze, výstupní signál je pouze zesílen. [6] Velikost zesílení výstupního signálu je dáno vztahem:

$$A = \frac{U_2}{U_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

2.2.2 Stabilizátor

Stabilizátor stejnosměrného napětí je součástka, která automaticky vyrovnává napěťové změny na zátěži, a která splňuje po funkční i konstrukční stránce tyto vlastnosti:

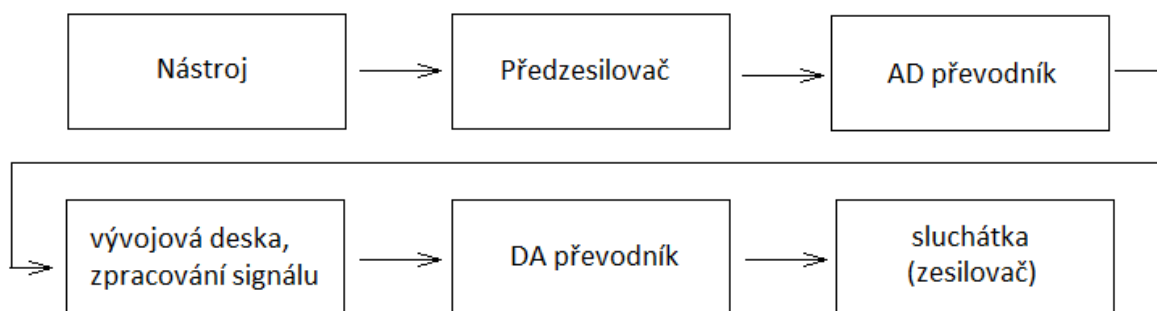
- Má ideálně nulový přenos změn vstupního napětí na výstup.
- Má ideálně nulový vnitřní (výstupní) odpor.
- Měl by mít relativně velký (často jednotkový) přenos napětí.
- Všechny důležité statické a dynamické parametry by měly být teplotně i časově stálé. [3]

Stabilizátory napětí jsou dvou typů a to parametrické stabilizátory a stabilizátory se zpětnou vazbou. Parametrické stabilizátory využívají průběh voltampérových charakteristik některých součástek. Funkce stabilizátoru závisí na rozdílu mezi stejnosměrným a dynamickým odporem stabilizačního prvku v pracovním bodě. Pokud je dynamický odpor mnohem menší než stejnosměrný, jde o stabilizátor napětí (využívají se součástky jako Zenerova dioda, dioda v propustném směru atd.), v opačném případě (dynamický odpor mnohem větší než stejnosměrný) jde o stabilizátor proudu (zde se využívá výstupní charakteristiky tranzistorů). Tyto stabilizátory ale mají malý výstupní výkon, nemožnost regulace stabilizovaného napětí a někdy příliš velká citlivost na změny a kolísání napájecího napětí.

Stabilizátor se zpětnou vazbou s vhodně zvoleným zesílením umožňuje přesnější stabilizaci výstupní veličiny a zvětšení výkonu dodávaného stabilizátorem. Tyto stabilizátory se skládají ze vstupu napětí, zdroje referenčního napětí (používají se parametrické stabilizátory nebo IO), obvodu porovnávajícího výstupní napětí s napětím regulačním a generujícího signálu odchylky a ze zesilovače signálu odchylky (používá se OZ nebo tranzistor). [3]

3 Praktické řešení

Tato kapitola se zabývá praktickým řešením efektového procesoru. Je zde popsán průchod signálu od hudebního nástroje až po zesilovač s reproboxem, popřípadě sluchátka nebo jiné zařízení reprodukcující zvuk, návrh DPS a popis programu. Průchod signálu je zobrazen na obr. 6, jednotlivé části jsou stručně popsány pod obrázkem a poté jsou níže více rozebrány.



Obr. 6 Průchod signálu

Jako nástroj je použita elektrická kytara, ale její výstupní signál je slabý, v řádu desítek milivoltů. Proto je mezi AD převodník a nástroj přidám předzesilovač, aby bylo možné nastavit úroveň signálu. Data z AD převodníku jsou přivedena na desku s FPGA obvodem Spartan 3, který signál upraví pomocí naprogramovaných efektů. Takto upravený signál je poté přiveden na DA převodník a následně na zesilovač (sluchátka).

3.1 Vývojový kit

Použitý vývojový kit je základní stavební prvek navrženého efektového procesoru. Komponenty a součásti, které se nachází na této desce a jsou využity při návrhu, jsou tyto: 200 000 hradel v obvodu Spartan 3 XC3S200 FPGA, 4 320 logických buněk, dvanáct 18k bitových bloků RAM, dvanáct 18x18 hardwarových násobiček, čtyři DCM (digital clock manager), až 173 uživatelem definovaných I/O signálů. Dále také paměť PROM pro uložení programu, 1M byte rychlou asynchronní SRAM paměť, konektor pro připojení dalších komponent, čtyřmístný sedmsegmentový displej a čtyři tlačítka. Obsahuje i další komponenty a součásti, ty ale nejsou pro toto řešení potřebné. [16]

3.1.1 Digital clock manager

Tato komponenta umožňuje upravit kmitočet vstupního signálu pomocí nastaveného poměru a získat tak velké množství kmitočtů. Rovnice číslo pět určuje výstupní kmitočet.

$$f_{\text{CLKFX}} = f_{\text{CLKIN}} * \frac{\text{clkfx_multiply}}{\text{clkfx_divide}} \quad (5)$$

f_{CLKIN} – vstupní frekvence

clkfx_multiply – definuje násobící člen, nabývá hodnot 2 až 32

clkfx_divide – definuje dělicí člen, nabývá hodnot 1 až 32

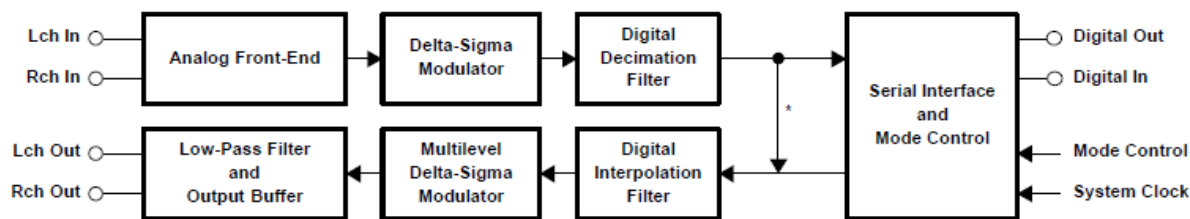
Pomocí této komponenty je nastaven signál systémových hodin pro převodník a následně jsou z něj vypočítány i ostatní potřebné hodinové signály. [17]

3.1.2 Asynchronní SRAM

Na desce jsou dvě 256Kx16 SRAM paměti. Obě mají stejné signály write enable (WE) output enable (OE) a adresové signály (A[17:0]), ale mají oddělený signál chip select (CE) a nastavení bite enable, což nastavuje výběr vysokého nebo nízkého byte v 16 bitových datech (UB a LB signál). Paměť je použita při zpoždování signálu u efektů delay a chorus, kdy je vzorek uložen do paměti a po čase opět načten. [16]

3.2 Převodník

Jelikož deska s obvodem Spartan 3 neobsahuje AD/DA převodník, bylo potřeba navrhnout DPS (viz kapitola 3.4) pro připojení do konektoru, na které je převodník. Pro převod analogového signálu z elektrické kytary na signál digitální je zvolen převodník CODEC od firmy Texas Instrument. Má označení PCM3002. Slovo CODEC označuje, že je to jak AD, tak DA převodník v jednom IO. Byl vybrán kvůli zjednodušení, aby nemusel být vybrán jeden převodník AD a druhý DA. Funkce převodníku jsou řízeny softwarově a jsou spolu s vývody popsány níže. Zjednodušené obvodové schéma PCM3002 je na obr. 7.



Obr. 7 Zjednodušené blokové schéma převodníku PCM3002 [12]

3.2.1 Vlastnosti převodníku

Převodník PCM3002 je nízkonákladový jednočipový stereo převodník (analog-digital, digital-analog) s jednotným vstupním a výstupním analogovým napětím. AD převodník využívá delta-sigma modulaci s 64bitovým vzorkováním, a taky decimační filtr a v DA převodu zase naopak 8x vzorkovací digitální interpolační filtr. DAC obsahuje digitální útlum, de-emphasis (funkce, která snižuje relativní amplitudu určitých frekvencí signálu, které jsou přebuzeny a obnovuje signál), nekonečnou detekci nuly a měkké vypnutí celého systému. Mód vypnutí je nezávislý na ADC a DAC. Při vypnutí jsou signály SYSCLK, BCKIN a LRCIN zastaveny.

PCM3002 se vyrábí v SSOP pouzdře s 24 piny. Vzorkovací frekvence, se kterou dokáže pracovat, je od 4kHz do 48kHz. Optimální napájecí napětí je 3V, ale převodník je schopný pracovat s napětím od 2,7V do 3,6V v rozmezí teplot od -25°C do +85°C. Rozlišení, se kterým je převodník schopný pracovat, je 16 nebo 20 bitů na vzorek.

3.2.2 Popis jednotlivých vstupů a výstupů

Napájecí napětí pro převodník je získáno z konektoru vývojové desky a má velikost 3,3V. Toto napětí není optimální, ale je v uvedeném rozsahu a převodník je schopný s ním pracovat. Napětí bude přivedeno na vstupy VCC1, VCC2 a VDD. Napájecí napětí VCC1 je napájení pro ADC, VCC2 je napájení pro DAC a VDD je napájení digitální. Maximální možné kolísání napájecího napětí je $\pm 0,1V$, stejná je i odchylka pro uzemnění.

Pin AGND1 je analogové uzemnění pro ADC, AGND2 je pro DAC, DGND je digitální uzemnění. VCOM je společné uzemnění pro ADC i DAC. Uzemnění je stejně jako napájecí napětí přivedeno z konektoru desky.

Analogové vstupy do ADC jsou VINL (levý kanál) a VINR (pravý kanál), analogové výstupy jsou VOUTL a VOUTR. Jelikož výstup z elektrické kytary je mono a ne stereo, je použit pouze jeden vstup, druhý zůstane nepřípojen. Výstupy jsou použity oba, pravý i levý kanál, výstupní signál je ale z obou stejný. Maximální hodnota vstupního napětí je 0,6krát hodnota napájecího napětí VCC, což při VCC=3,3V znamená, že maximální hodnota je 1,98Vp-p. Toto napětí je udáváno jako napětí špička-špička. Maximální hodnota kladné (nebo záporné) půlvlny je tedy 0,99V. Převodník se zápornými hodnotami nemůže pracovat. To je vyřešeno tak, že střed napětí není v nule, ale převodník jej posune do hodnoty 0,5krát napájecí napětí, což je hodnota 1,65V. Všechny hodnoty jsou tedy kladné, převodník vytvoří virtuální nulu. Vstupní impedance je 30kΩ. Maximální hodnota výstupního napětí je stejná jako jeho vstupní hodnota 0,6krát VCC, což je 1,98V. VREF1 a VREF2 jsou reference pro ADC.

Vstup SYSCLK jsou systémové hodiny. Jejich hodnota musí být v rozmezí 8,192 – 24,576 MHz. Vývojová deska nedokáže dodat jakoukoli frekvenci. Proto je pro generování použit systém DCM. Systémové hodiny jsou 256, 384 nebo 512 násobek vzorkovací frekvence. IO má systém, který automaticky určí, jestli pracujeme s 256, 384 nebo 512 násobkem fs (vzorkovací frekvence). Pokud pracujeme s 384 nebo 512 násobkem fs, hodiny jsou automaticky převedeny na 256 násobek fs. Tyto hodiny slouží k ovládání digitálních filtrů a delta-sigma modulací. Tabulka 2 zobrazuje příklad určení vzorkovacích frekvencí a systémových hodin. [12]

Tabulka 2: Frekvence systémových hodin [12]

Vzorkovací frekvence (kHz)	Frekvence systémových hodin (MHz)		
	256 fs	384 fs	512 fs
32	8,192	12,288	16,384
44,1	11,2896	16,9344	22,5792
48	12,288	18,4320	24,576

Dále pin BCKIN jsou vstupní bitové hodiny. Na každý jeden impuls IO posílá nebo přijímá data, a to jeden bit za jeden impuls. Podrobněji je to popsáno níže, viz PCM audio rozhraní. Vstup LRCIN řídí, pro který kanál (levý nebo pravý) budou data posílána nebo přijata.

DIN a DOUT jsou digitální vstup a výstup pro data. DOUT je výstup pro data, která budou poslána z převodníku do desky a následně upravena a poslána do převodníku na vstup DIN.

Vstupní pin RST je připojen na logickou jedničku a slouží pro externí reset převodníku. Při resetu musí být nastaven do logické nuly minimálně po dobu 40 ns, zatímco SYSCLK jsou aktivní a jsou připraveny zahájit reset převodníku. Inicializace začíná na náběžné hraně signálu RST a vyžaduje 1024 SYSCLK cyklů pro dokončení.

Výstup ZFLG je výstup s otevřeným kolektorem, který se používá jako nekonečná nulová detekce. Při nulových vstupních datech pro 65536 cyklů BCKIN je ZFLG v nule, v opačném případě je ve vysoko impedančním stavu. Tento výstup ale není připojen k vývojové desce.

Ostatní piny – MC, MD, ML jsou piny pro řízení softwarové kontroly (viz kapitola 3.2.5).

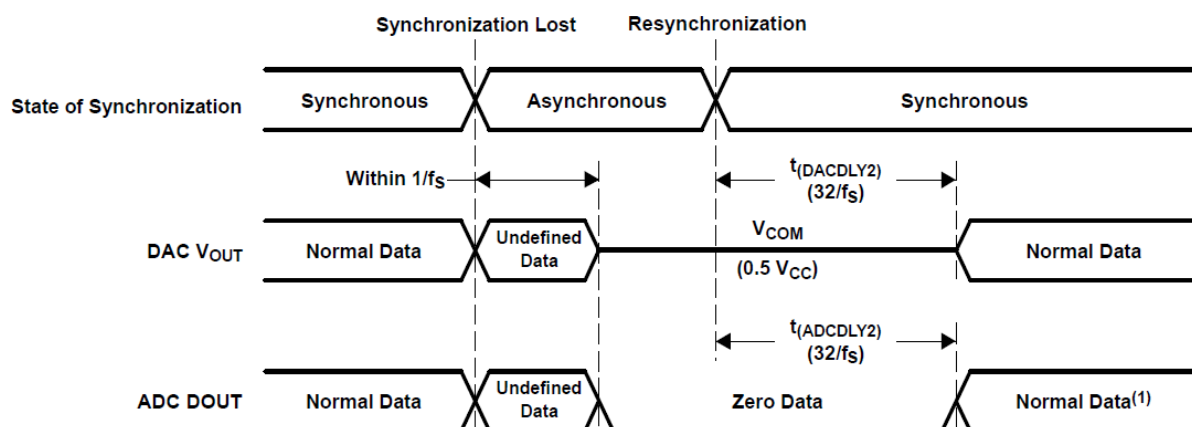
3.2.3 PCM rozhraní

Čtyřvodičové digitální audio rozhraní zahrnuje signály LRCIN, BCKIN, DIN a DOUT. Pro odeslání a příjem dat může být použit kterýkoli ze čtyř vstupních/výstupních formátů. PCM3002 přijme BCKIN během jednoho hodinového signálu LRCIN buď 32, 48 nebo 64 bitů dat. Při vybrání 32 bit/LRCIN je možné přenést pouze 16 bitové data. Pro naše účely je zvolen BCKIN 64 bit/LRCIN, kdy jsou přenesena 20 bitová data.

3.2.4 Synchronizace

Převodník PCM3002 pracuje s LRCIN synchronizovaným se systémovými hodinami. Přestože PCM3002 nestanovuje žádný vztah mezi LRCIN a systémovými hodinami, musí být synchronizace dodržena. Pokud je změna mezi LRCIN a SYSCLK více jak 6 bitů (BCKIN) v jednom vzorku (LRCIN), vnitřní provoz DAC se zastaví na $1/fs$ a analogový výstup je nastaven na bipolární nulu (1,65V), dokud se systémové hodiny nesesynchronizují s LRCIN. Vnitřní provoz ADC se také zastaví na $1/fs$ a na digitálním výstupu se nastaví

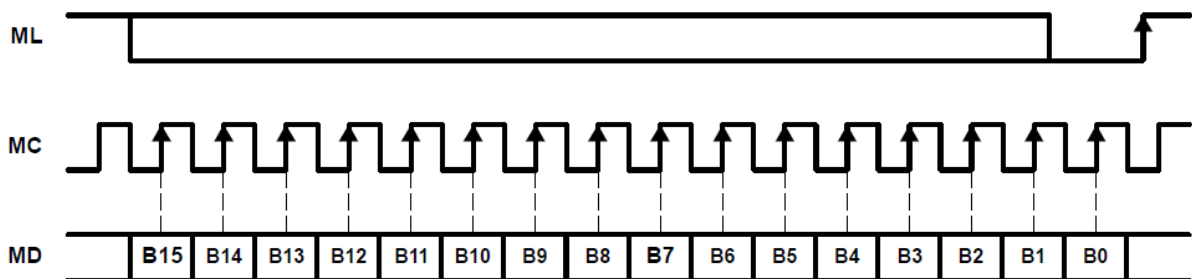
bipolární nula. Pokud dojde k synchronizaci do pěti systémových impulsů, provoz pokračuje dál. Obr. 8 ukazuje, jak to vypadá, když dojde ke ztrátě synchronizace. Před nastavením výstupů na bipolární nulu jsou hodnoty na výstupech nedefinované a může se na nich objevit šum. Při přechodu mezi nedefinovaným a normálním stavem se také může objevit na výstupu šum.



Obr. 8 Ztráta synchronizace mezi DAC a ADC se systémovými hodinami [12]

3.2.5 Provozní kontrola

PCM3002 má speciální funkce (viz tabulka 3), které se nastavují pomocí třívodičového sériového rozhraní MC, MD a ML. Tyto funkce kontroluje program registr, který je 16 bitů dlouhý (obr. 9). Výběr registru se provádí nastavením bitů 9 a 10.



Obr. 9 Kontrola vstupních dat pomocí třívodičového rozhraní [12]

Tabulka 3: Nastavitelné funkce

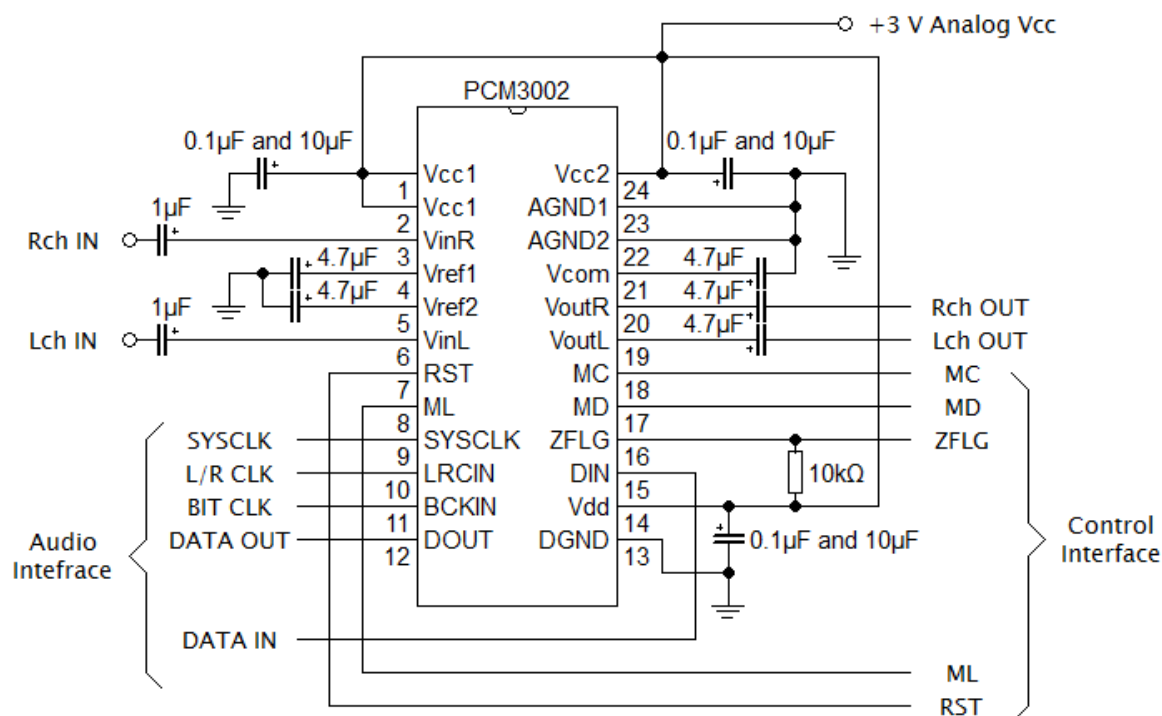
Funkce	ADC/DAC	PCM3002
Audio data format	ADC/DAC	Čtyři formáty
LRCIN	ADC/DAC	O
Zpětná smyčka	ADC/DAC	O
Útlum levý kanál	DAC	O
Útlum pravý kanál	DAC	O
Kontrola útlumu	DAC	O
Detekce nekonečné nuly	DAC	O
DAC kontrola výstupu	DAC	O
Kontrola „soft mute“	DAC	O
De-emphasis	DAC	O
ADC kontrola vypnutí	ADC	O
DAC kontrola vypnutí	DAC	O
Provoz horní propusti	ADC	O

3.2.6 Výpočet kmitočtů

Pro správnou funkci převodníku je třeba na vstupy SYSCLK, LRCIN a BCKIN přivést signál o určité frekvenci. Systémové hodiny musí být v rozmezí 8,192 – 24,576 MHz. Pomocí DCM je generována frekvence 18 421 052,6 Hz. Jelikož systémové hodiny jsou 256, 384 nebo 512 násobek vzorkovací frekvence, podělí se frekvence systémových hodin určeným násobkem, což je 384, a tím se získá vzorkovací frekvence 47971,5 Hz. Frekvence bitových hodin – BCKIN je buď 48, nebo 64 násobek vzorkovací frekvence. Zvolením 64 násobku vyjde výsledná frekvence 3 070 175,4 Hz.

Vzorkovací frekvence je získána tak, že se při nástupné hraně systémových hodin na každém 192 impulsu bude měnit úroveň vzorkovacího signálu z logické jedničky na logickou nulu a naopak. Obdobně pak získáme frekvenci bitových hodin (BCKIN). Jenom místo toho, aby změna nastala na každém 192 impulsu, bude se měnit úroveň signálu při každém třetím impulsu.

3.2.7 Doporučené zapojení převodníku PCM3002



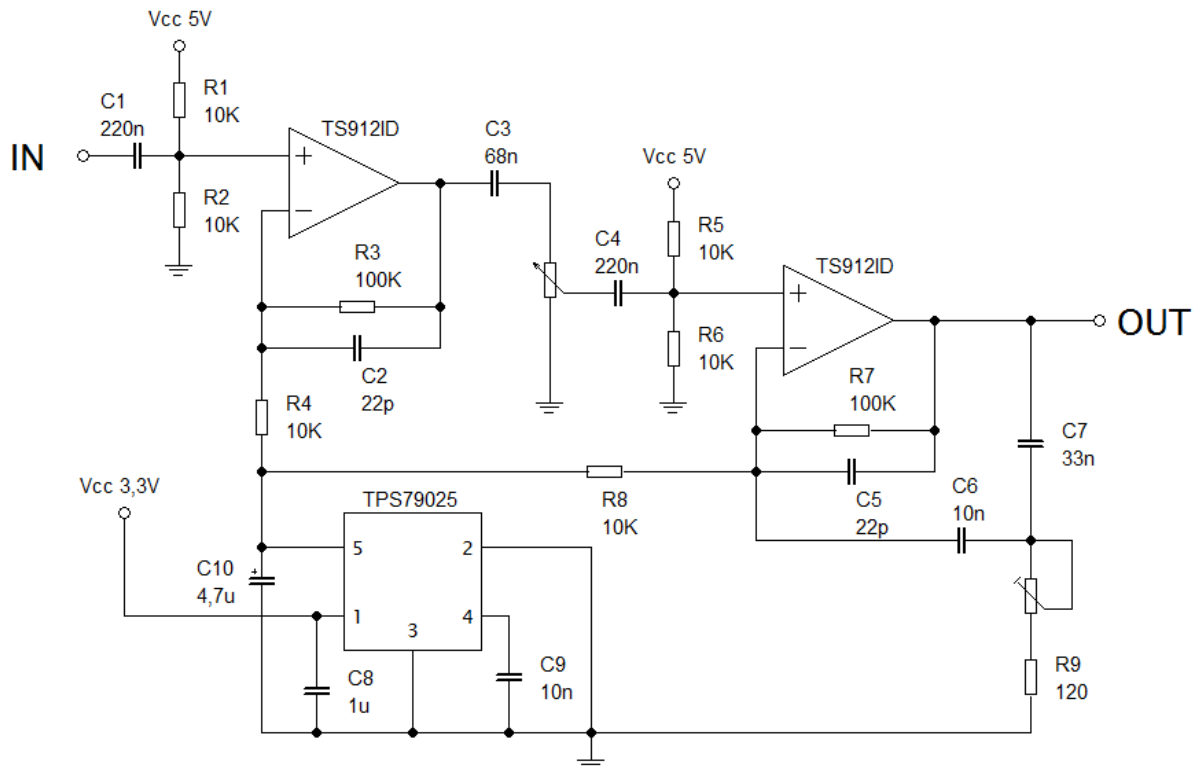
Obr. 10 Pouzdro s vývody a doporučeným zapojením součástek

3.3 Předzesilovač

Předzesilovač je navržen, aby se zvýšil vstupní odpor a taky aby bylo možné nastavit požadovanou úroveň signálu. Pro stavbu předzesilovače jsou použity operační zesilovače a stabilizátor.

3.3.1 Operační zesilovač

OZ, který jsou použity, je TS912ID. Je to rail-to-rail zesilovač což znamená, že může pracovat téměř v celém rozsahu napájecího napětí. Jsou to dva OZ v jednom pouzdře, oba dva jsou využity, jelikož předzesilovač je dvoustupňový. Jsou zapojeny v neinvertujícím zapojení, jelikož signál je potřeba pouze zesílit, není potřeba posouvat fázi nebo signál jinak upravit. Na obr. 11 je zobrazeno zapojení dvoustupňového předzesilovače spolu se stabilizátorem a filtrem.



Obr. 11 Předzesilovač

Signál prochází před první stupeň a je 10krát zesílen. Poté je potenciometrem upravena úroveň signálu. Další stupeň signál opět 10krát zesílí a v poslední řadě je signál upraven pomocí filtru. Tento filtr tvoří součástky C6, C7, R9 a trimr. Trimr je použit místo potenciometru, jelikož stačí filtr pro jeden nástroj jen jednou nastavit a není potřeba jej měnit. [13] [10]

3.3.2 Stabilizátor

Použitý stabilizátor je od firmy Texas Instruments a jedná se o stabilizátor TPS79025. Stabilizátor je použit, aby bylo možné střídavý signál zesílit. Pokud by nebyl střed signálu posunut na hodnotu 2,5V, byla by zesilována pouze kladná půlvlna signálu a záporná úroveň signálu by byla nastavena na nulu. Po zesílení je stejnosměrná složka odfiltrována, signál je potenciometrem zeslaben a následně je v dalším stupni opět posunut a zesílen.

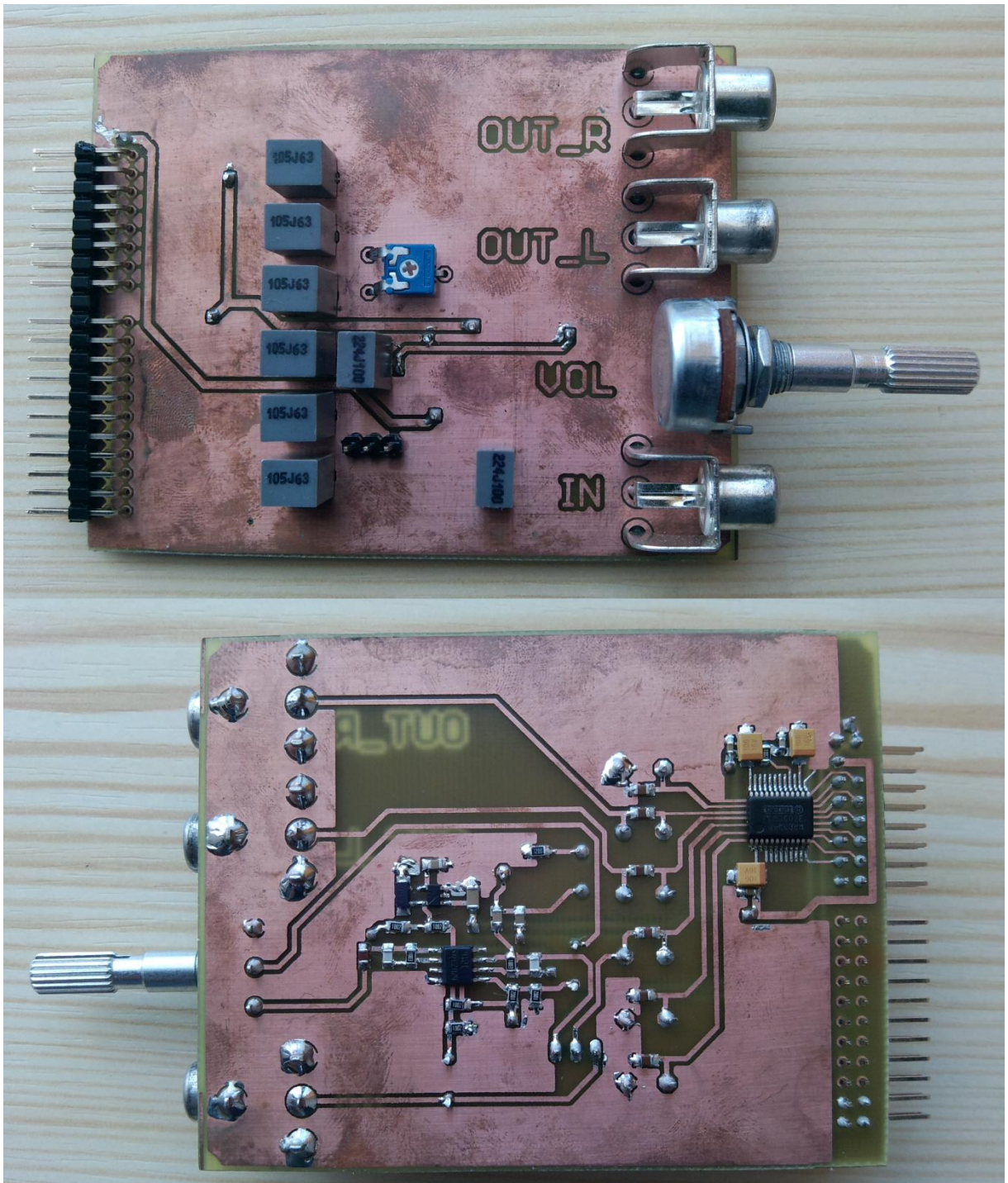
3.4 Návrh DPS

DPS je navržena dle doporučeného zapojení převodníku (kapitola 3.2.7 obr. 10) a navrženého předzesilovače (kapitola 3.3.1 obr. 11). Rozdíl je v použitých kondenzátorech. Místo kondenzátorů $4,7\mu\text{F}$ u převodníku jsou použity svitkové kondenzátory $1\mu\text{F}$ a ke každému z nich je paralelně připojen keramický kondenzátor 22nF . Svitkové kondenzátory jsou použity, protože jsou pro audio vhodnější než elektrolytické, elektrolytické kondenzátory se spíše používají v obvodech se stejnosměrným signálem. Svitkové kondenzátory jsou ale dražší a proto jsou použity kondenzátory o hodnotě $1\mu\text{F}$ a ne doporučená $4,7\mu\text{F}$. Čím je kapacita vyšší, tím je vyšší i cena. Datové signály, které vedou z převodníku do desky, by měly být co nejkratší, proto je převodník umístěn co nejbližší konektoru. Kondenzátory $0,1\mu\text{F}$ a $10\mu\text{F}$ by měli být umístěny co nejbližší pinům převodníku. GND je vylita po co největší ploše ale tak, aby nevznikaly antény.

V příloze B je schéma zapojení navržené DPS. Konektor není úplný (nemá všech 40 vývodů ale jen 37), několik vývodů chybí, jsou to ovšem vývody, které nejsou využity. Tyto tři piny z konektoru jsou odstraněny kvůli vedení napájení na DPS. Vyrobená a osazená DPS je na obr. 12. Její layout je v příloze A.

Součástky, které jsou použity v původním návrhu:

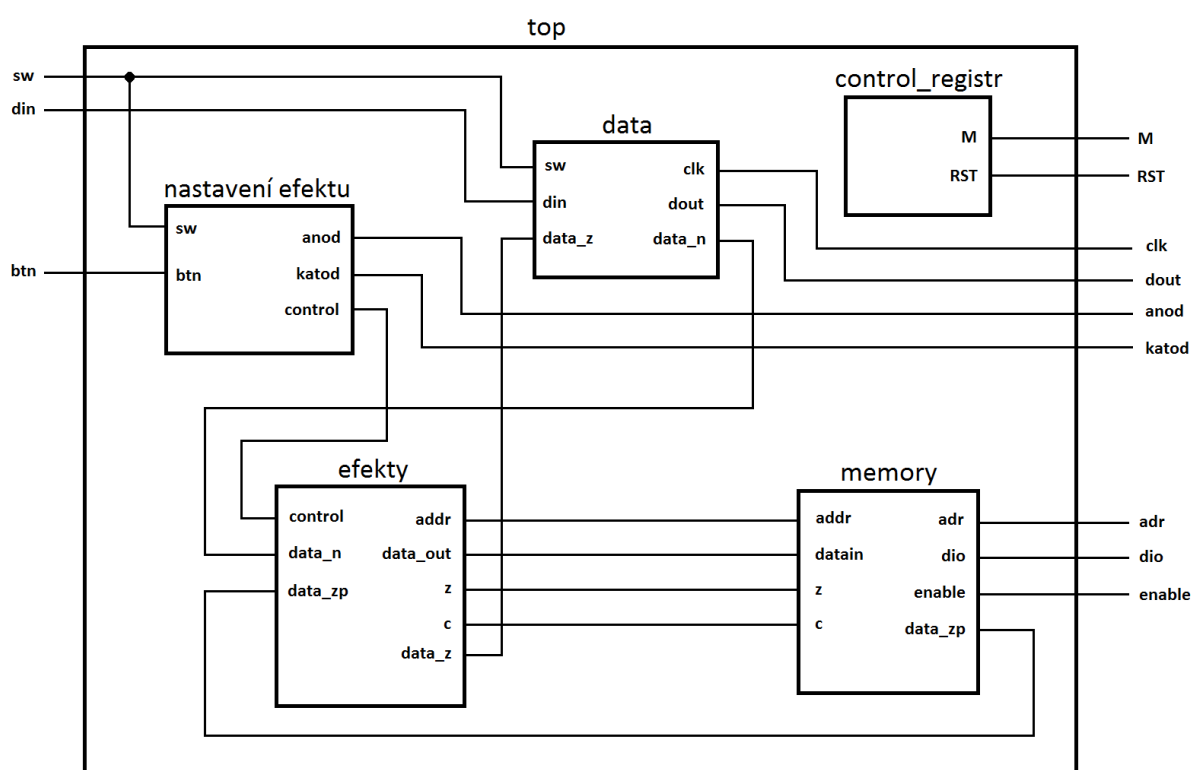
- převodník AD/DA PCM3002,
- operační zesilovač TS912ID,
- stabilizátor TPS79025,
- kondenzátory 100nF , 10nF , 22nF , $1\mu\text{F}$, 33nF , 68nF , 22pF , $10\mu\text{F}$, $4,7\mu\text{F}$, 220nF ,
- rezistor $10\text{k}\Omega$, $100\text{k}\Omega$, 120Ω ,
- potenciometr PC1624NAK100,
- trimr CA6VK010,
- cinch zásuvka do DPS 90° ,
- konektor S2G40W,



Obr. 12 Osazená DPS

4 Popis programu

Celkové obvodové schéma (obr. 13) znázorňuje jednotlivé části programu, jejich propojení a vstupní a výstupní signály programu. Tyto části jsou popsány níže. Vstupní signály jsou: clk – hodinový signál, který je přiveden z desky a jehož frekvence je 50 MHz, din – vstupní signál přivedený z převodníku, který udává hodnotu vstupního signálu přivedeného z audio vstupu a btn – signál z tlačítek, kterými se nastavují efekty. Výstupní signály jsou signály pro řízení registrů, audio rozhraní, sedmissegmentového displeje a paměti SRAM. Více jsou popsány u popisu jednotlivých částí programu.



Obr. 13 Celkové obvodové schéma programu

4.1 Nastavení registru – blok control_registr

Je to samostatný blok, který není ovlivněn jinými bloky a ani další bloky neovlivňuje. Jeho výstupní signály jsou přivedeny na ovládací rozhraní převodníku, tím jsou nastaveny čtyři registry pro jednotlivé funkce převodníku. Tyto registry se nastavují jeden po druhém.

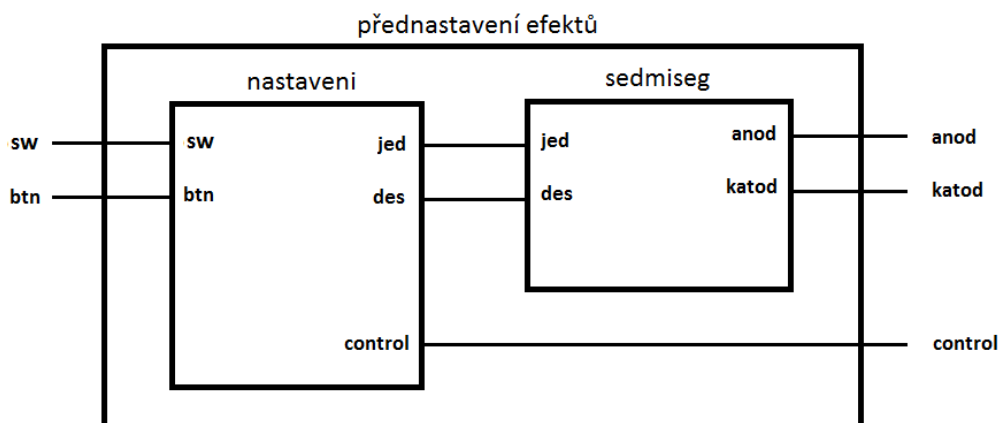
Každý registr má celkem 16 bitů, bity 10 a 11 nastavují adresu vybraného registru. První dva registry nastavují zeslabení signálu na výstupu, každý pro jeden kanál (levý a pravý), třetí a čtvrtý nastavují další možné funkce převodníku. V kapitole 3.2.5 jsou v tabulce 3 uvedeny tyto funkce a na obr. 9 je zobrazen průběh výstupních signálů. Tento blok je možné vůbec nezapojovat, převodník má jednotlivé funkce v základu nastavené, ale jelikož jsou některé funkce nastaveny jinak než má převodník nastaven v základu, jsou příslušná data posílána do převodníku.

Vstup je hodinový signál clk o frekvenci 50 MHz. Výstupy jsou třívodičový signál a RST signál. Tři vodiče jsou: MC – hodinový signál o frekvenci 5MHz, MD – data, kterými jsou jednotlivé registry nastaveny, ML – určuje začátek příjmu následujících dat. RST signál je připojen na log. 1, při změně signálu na log. 0 dojde k restartování převodníku.

4.2 Blok přednastavení efektů

Tato část programu zpracovává data pro nastavení efektů a na sedmsegmentovém displeji zobrazuje příslušná data. Při vypnutých spínačích se na sedmsegmentovém displeji zobrazuje nápis EFCT (effect). Po zapnutí prvního spínače zleva se zobrazí nápis LOOP a signál prochází bez úpravy přímo ze vstupu na výstup. Při zapnutí prvního spínače zprava se rozsvítí nápis CHxx, kde xx je číslo, které určuje nastavení efektu chorus. Druhý spínač zprava zobrazuje nápis DExx, kde opět xx je číslo, které určuje nastavení efektu delay a třetí spínač zprava zobrazí nápis DIxx, kdy xx určuje nastavení efektu distortion. Spínače mají zleva vyšší prioritu, což znamená, že pokud je zapnutý spínač úplně nalevo, svítí nápis LOOP a signál prochází přímo ze vstupu na výstup i když jsou ostatní spínače také zapnuté. Podobně pokud je zapnutý třetí spínač zprava, nastavuje se efekt distortion a pokud jsou zároveň sepnuty i ostatní spínače, na nastavení dalších dvou efektů to nemá vliv. Nastavení (a tím i číslo xx) u jednotlivých efektů se mění pomocí dvou tlačítek. Tím se mění signál, který je posílán k blokům jednotlivých efektů, a to ovlivňuje jednotlivé efekty.

Na vstup tohoto bloku je přiveden i signál o frekvenci 1kHz, který je určen pro ovládání anod sedmsegmentového displeje. Blok sedmseg řeší podle přijatých signálů zobrazení znaků, které jsou na sedmsegmentovém displeji a na anody a katody posílá příslušné data pro správné zobrazení.



Obr. 14 Schéma přednastavení efektů

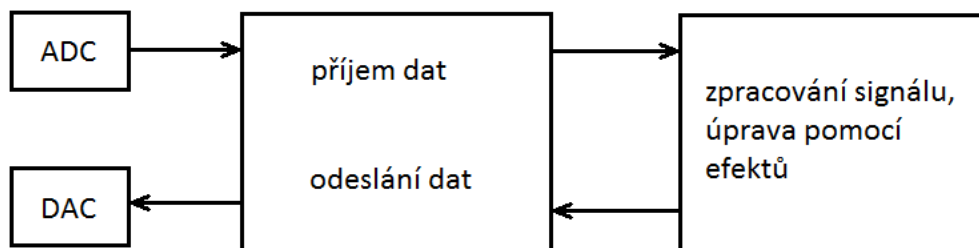
Vstupní signály jsou btn, což je signál z tlačítek, sw, což je signál ze spínačů a clk. Výstupní signály jsou anod – nastavuje anody na sedmissegmentovém displeji, katod – nastavuje katody na sedmissegmentovém displeji a control – přenáší informaci do části programu realizující efekty a podle tohoto signálu jsou nastaveny, ke každému efektu je poslán jiný signál control.

Celkem je možné zvolit 100 různých nastavení každého efektu. Toto nastavení se ovšem po restartování vynuluje. Aby bylo možné nastavovat efekty a ukládat je, bylo by potřeba navrhnout DPS, na které by byla umístěna flash paměť a do té by bylo možné jednotlivé nastavení uložit.

Neustále se načítají data pro zobrazení na sedmissegmentovém displeji a signál anod postupně přepíná mezi čtyřmi sedmissegmentovými displeji rychlostí 1kHz (přepínání není okem pozorovatelné). Podle toho, který je zrovna vybrán, je buď vypnut, nebo je přiřazen signál, který rozsvítí požadované segmenty tak, aby zobrazili potřebný znak.

4.3 Blok příjem/odeslání dat

Tento blok přijímá data z převodníku AD, upraví je na 20 bitový signál a poté je pošle dále do programu pro zpracování. Program data upraví podle zadaných parametrů (nastavení efektů) a následně tyto zpracované data opět přijme a pošle je na vstup převodníku, který je převede na analogový signál. Aby bylo možné data přijímat a odesílat, je potřeba nastavit i audio rozhraní převodníku, což tento blok také provádí.



Obr. 15 Blokové schéma části programu příjem/odeslání dat

Nejprve upraví pomocí DCM vstupní hodinový signál o frekvenci 50 MHz na frekvenci 36,84 MHz (což je dvojnásobná systémová frekvence pro převodník než je potřeba, ale frekvenci 18,42 MHz nelze pomocí DCM nastavit, a proto je až následně upravena na požadovanou frekvenci a je poslána na výstup sysclk). Dále je frekvence 36,84 MHz upravena na další dvě, a to na frekvenci 3,07 MHz, což jsou bitové hodiny a 47,97 kHz, což je vzorkovací frekvence. Signál o frekvenci 3,07 MHz je poté poslán na výstup bitclk i bclk (rozdíl mezi nimi je ten, že bitclk má stejně dlouho trvající log. 1 i log. 0 a řídí audio rozhraní převodníku, zatímco bclk je impulsový signál, kdy při sestupné hraně bitclk je nastaven impuls log. 1, ale hned jej zase vrátí do log. 0 a s tímto signálem pracují další části programu) a signál o frekvenci 47,97kHz je poslán na výstup lrclk. Na sestupnou hranu bitclk jsou přijímány nebo odesílány data a vzorkovací frekvence - signál lrclk určuje, pro který kanál (pravý nebo levý) jsou data přijata nebo odesílána. Pokud je lrclk roven log. 0, data jsou zpracovávána pro levý kanál, pokud je lrclk roven log. 1, jsou data zpracovávána pro pravý kanál. Na pravý kanál ale není připojen žádný vstup, výstup z elektrické kytary, který je připojen na vstup, je jednakanálový - mono. Výstupní data jsou jak pro pravý tak pro levý kanál, levý kanál reprodukuje signál upravený pomocí efektů, pravý kanál reprodukuje nezměněný signál přímo ze vstupu.

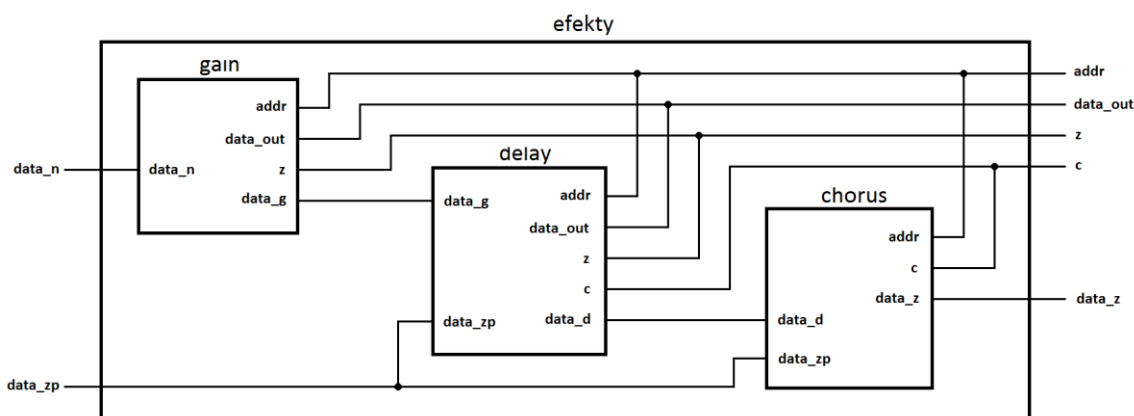
4.4 Blok memory

Tento blok je důležitý pro efekty delay a chorus, jelikož ukládá do paměti potřebná data. Každý z těchto bloků načítá data z jiné části paměti, aby nedošlo k jejich přepsání, a poté k načtení nechtěných dat.

Data přijatá z bloku efekty ukládá na požadované adresy a následně, pokud je potřeba, získává tato data z paměti a posílá je zpět do bloku efekty. Při ukládání nebo načítání dat z paměti je signál ready nastaven na nulu a díky tomu blok efekty rozpozná, že nemůže ani ukládat, ani načítat a čeká.

4.5 Blok efekty

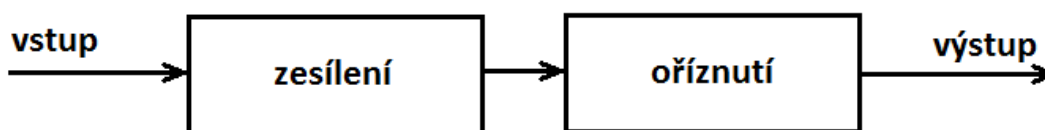
Tento blok zpracovává nezměněný signál (zobrazen na grafech 1 a 2 v příloze D) z bloku příjem/odeslání dat a upravuje jej pomocí vybraných efektů. Jsou to efekty distortion, delay a chorus. Vstupní signál ovšem není čistý, jak lze z grafu poznat, je zašuměný a díky tomu je i výstupní signál zašuměný. Taky lze z grafů vyčíst, že mezi vstupním a výstupním signálem je zpoždění. Signál o frekvenci 1kHz má zpoždění 680us, signál o frekvenci 500Hz je to zpoždění menší a to 470us.



Obr. 16 Schéma programovaných efektů

4.5.1 Efekt distortion

Effekt distortion zesiluje vstupní signál, a poté ořeže špičky signálu, pokud má signál vysokou úroveň signálu.



Obr. 17 Blokové schéma efektu distortion

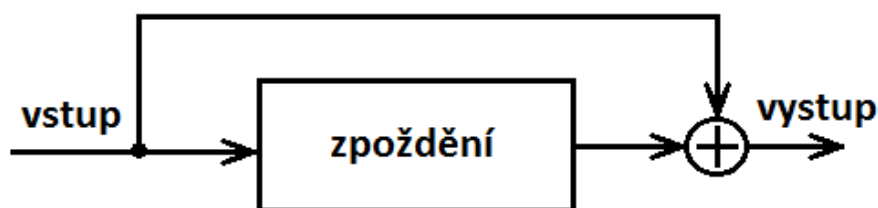
Zesílení a zkreslení signálu určuje signál control. Je to sedmibitový signál, který je přiveden z bloku přednastavení efektů a může nabývat celkem 100 hodnot. Hodnota 0 efekt vypne, takže signál projde a nijak není ovlivněn. Ostatní hodnoty efekt postupně zesilují až do maximálního zesílení 25,75. Ukázka průběhu signálu je na grafech 3 až 6 v příloze D. V zobrazených grafech je znázorněn průběh signálu pro dvě frekvence.

Grafy 3 a 4 znázorňují průběh pro frekvenci 1kHz, grafy 5 a 6 znázorňují průběh pro frekvenci 500 Hz. Grafy 3 a 5 znázorňují zesílení 1,75, je vidět, že signál je zesílen a ořezán, stále však připomíná sinusovku. Grafy 4 a 6 znázorňují maximální zesílení a zde je vidět, signál nezmění hodnotu okamžitě, ale při změně signálu z nejnižší úrovně na nejvyšší se mění postupně, stejně tak z nejvyšší na nejnižší hodnotu. Je to pravděpodobně způsobené použitými kondenzátory na výstupu převodníku. Signál o nižší frekvenci (500Hz) tvoří téměř obdélníkový průběh, zatímco signál o frekvenci 1kHz je zkreslen více. Při vyšší frekvenci se kondenzátor nestíhá dostatečně rychle nabíjet a vybíjet.

Výstupní signál je přiveden na vstup druhého efektu – delay, ale je i poslán do paměti spolu s adresou. To se provádí kvůli následujícímu efektu delay, aby signál bylo možné načíst po určité době, a tím dosáhnout jeho zpoždění. Aby jej bylo možné do paměti zapsat, musí být rozdělen. Paměť dokáže ukládat pouze 16 bitová data, ale datový signál má velikost 20 bitů. Proto je nejprve do paměti posláno nejvyšších 16 bitů spolu s adresou, a poté jsou poslány zbylé 4 bity na následující adresu. Tím, že jsou poslány pouze 4 bity, je dalších 12 bitů nevyužitých, ale paměť je dostatečně velká. Celková velikost paměti je 8Mbit, ale pokud by byla potřeba využít všechny bity, bylo by zapisování i čtení jen požadovaných dat obtížné.

4.5.2 Efekt delay

Tento blok upravuje signál pomocí efektu delay. Upravení je provedeno tak, že ke vstupnímu signálu je přičten zpožděný signál.



Obr. 18 Blokové schéma efektu delay

Délka zpoždění je určena sedmibitovým signálem control. Hodnota 0 efekt vypne, na výstup jsou přivedena data ze vstupu bez upravení. Další hodnoty určují délku zpoždění, ta postupně narůstá po 10ms až do hodnoty jedné sekundy. V příloze E jsou čtyři grafy, které znázorňují jednotlivé nastavení efektu pro dvě frekvence. Grafy 7, 8 znázorňují upravený signál o frekvenci 1kHz a grafy 9, 10 signál o frekvenci 500Hz.

Grafy 7 a 9 znázorňují signál zpožděný o 30ms a přičtený k nezpožděnému signálu. Je vidět, že signál se od neupraveného signálu (grafy 1 a 2, příloha D) příliš neliší. Grafy 8 a 10 znázorňují signál zpožděný o jednu sekundu a oproti neupraveným signálům se liší ve velikosti amplitudy i fázovém posunu, což je způsobeno přičtením zpožděného signálu k nezpožděnému.

Aby bylo možné načíst zpožděná data je potřeba, aby byl z bloku gain poslán i signál určující současnou adresu. Podle signálu control se určí délka zpoždění a dopočítá se adresa, na které jsou zpožděná data. Ta se poté načtou z paměti a přičtou se k vstupnímu signálu, a poté jsou poslána na výstup. Jelikož se data sčítají, výstupní signál je o jeden bit větší.

Výstupní signál je přiveden na vstup třetího efektu – chorus a také, jako v předešlém případě, je poslán do paměti. Je zapsán do paměti stejným způsobem jako v předešlém případě, rozdíl je v adresách a v tom, že data mají o jeden bit větší velikost. Aby nedošlo k přepisu dat, jsou použity jiné adresy. Jak je uvedeno v teoretickém rozboru, efekt delay může dosahovat až několikasekundového zpoždění. Většinou se ovšem používá zpoždění do jedné sekundy, proto je maximální zpoždění efektu nastaveno na jednu sekundu.

Použitá externí paměť má velikost 256k x 16 a na desce jsou tyto paměti 2. Díky tomu můžeme vypočítat celkovou velikost paměti

$$256 * 1024 * 16 * 2 = 8\,388\,608 \text{ bit}$$

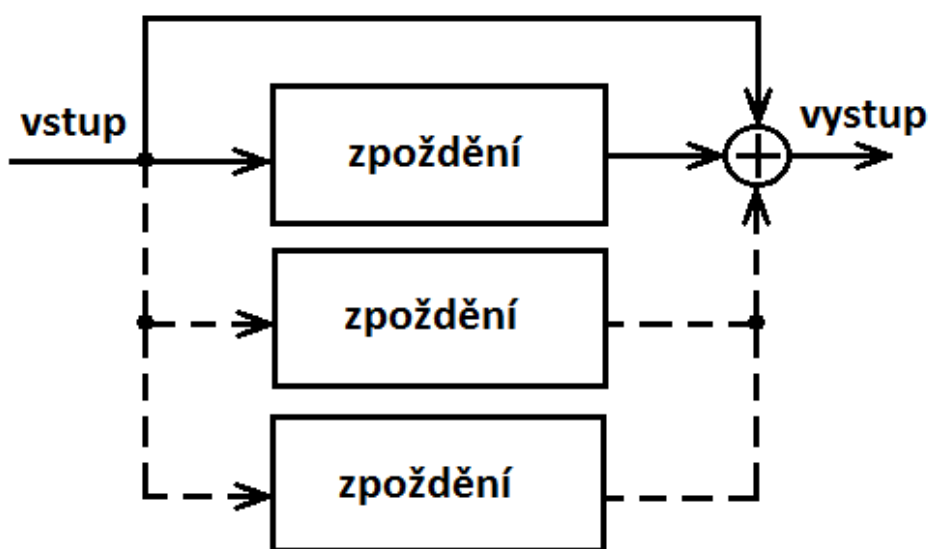
Jedna paměť má tedy poloviční velikost, což je 4 194 304 bit. Vzorkovací frekvence je 47971,49 kHz a počet bitů na vzorek je 20, tedy počet bitů za sekundu je 959 429,8. Pokud podělíme celkovou velikost 8 388 608 bitů externí paměti počtem 959 429,8 bitů za sekundu, dostaneme maximální délku zpoždění 8,74 sekund. Tohoto zpoždění by bylo možné dosáhnout, pokud by byly využity všechny bity. Pro uložení jednoho vzorku využijeme celkem 32 bitů místo dvaceti (nejprve uložíme prvních 16 bitů a poté 4 bity, 12 bitů je nevyužito), je tedy využita větší část paměti pro uložení dat. Jelikož maximální využitá délka zpoždění je jedna sekunda, potřebná velikost je

$$47971,49 * 32 = 1\,535\,087,68 \text{ bit}$$

Protože vzorky jsou uloženy jak po zpracování efektem distortion, tak po zpracování efektem delay znamená to, že celková potřebná velikost paměti je 3 070 175,36 bit. Je tedy možné využít jen jednu paměť.

4.5.3 Efekt chorus

Efekt chorus upravuje signál tak, že stejně jako delay využívá zpoždění signálu. Zpožděný signál ale není načítán rovnoměrně, mění se frekvence, se kterou je signál načten. Trvale se nastavuje maximální zpoždění 20ms. Efekt pracuje tak, že začíná načítat data, která mají zpoždění jeden vzorek, což je asi 20 μ s, a postupně se mění adresa, až se dosáhne zpoždění 20ms. Poté se adresa začne postupně měnit tak, že se zpoždění snižuje. Rychlost, jakou se adresa mění, tj. frekvence, je nastavitelná.



Obr. 19 Blokové schéma efektu chorus

Sedmibitový signál control nastavuje tuto frekvenci. Opět hodnota 0 efekt vypíná, hodnota 1 nastavuje frekvenci 10Hz a postupně hodnota klesá až k hodnotě 0,1Hz. Při vyšší frekvenci se zpoždění mění příliš rychle a díky tomu je signál příliš rozladěn. Obvykle se frekvence nastavuje v jednotkách Hz. Grafy 11 a 12 zobrazují signál o frekvenci 1kHz, grafy 13 a 14 signál o frekvenci 500Hz. Grafy 11 a 13 potom zobrazují nastavení efektu na hodnotu 03, a jak je z grafů patrné, frekvence, se kterou se mění zpoždění je příliš vysoká a signál je rozladěn. Grafy 12 a 14 zobrazují nastavení efektu na hodnotu 99, tyto grafy tvoří sinusovky, jelikož signál je načítán dostatečně pomalu a je tedy rozladěn jen mírně.

I zde je na vstup efektu přiveden signál určující aktuální adresu pro dopočítání potřebné zpožděné adresy. Zpožděná adresa je načítána podle trojúhelníkového průběhu, tedy od nejmenšího zpoždění postupně k největšímu nastavenému, a poté od největšího k nejmenšímu zpoždění. Načtený zpožděný signál je opět přičten ke vstupnímu a je poslán na výstup. Na výstupu je signál zase o jeden bit větší stejně jako na výstupu efektu delay. Celková velikost signálu je tedy 22 bit, na výstupu ale musí být signál o velikosti 20 bit, takže je použito 20 nejvyšších bitů signálu a dva poslední jsou zahozeny. Důvod, proč na výstupu každého bloku není jen 20 bitový signál, je ten, že pokud je signál ořezán až po poslední úpravě, dochází k menšímu zkreslení signálu. Výstupní signál je poslán do bloku příjem/odeslání dat a následně do DA převodníku.

5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se s možností úpravy zvukového signálu pomocí hudebních efektů, vybrat jednotlivé efekty a realizovat je. Zvukový signál je potřeba převést do digitální podoby, aby se s ním dalo pracovat a upravovat jej pomocí naprogramovaných efektů v obvodu FPGA. Po aplikování efektu je potřeba následně upravený signál převést zpět z digitálního signálu na analogový. AD/DA převod zajišťuje převodník PCM3002, pro který je navržena DPS. Spolu s převodníkem je na DPS umístěn i předzesilovač, který zajišťuje vyšší vstupní odpor, možnost nastavit přesně úroveň signálu a také je zde filtr, kterým je možné zesílit nebo zeslabit určité frekvence. Na DPS je umístěn propojovací konektor který má 3 vývody. Je zde proto, aby bylo možné nástroj připojit buď přes předzesilovač, nebo přímo na vstup AD převodníku. Propojení je provedeno pomocí zkratovací propojky tzv. jumper.

V první kapitole jsou popsány analogové a digitální efekty, důvody proč se které efekty používají a rozdíly mezi nimi. Dále jsou uvedeny druhy možných efektů a jsou popsány vybrané efekty, které jsou implementovány do obvodu. Jsou to efekty distortion, delay a chorus. Jednotlivé efekty jsou rozebrány, je popsána jejich funkce, a taky je teoreticky popsána jejich možná realizace. Praktická realizace je popsána v kapitole 4.5. Ve druhé kapitole jsou rozebrány integrované obvody, které byly při návrhu použity. Dále také formát dat I2S a SPI, které pracují s daty.

Ve třetí kapitole je popsáno, jak signál prochází od hudebního nástroje až po sluchátka (zesilovač), zvolená deska s obvodem FPGA a její komponenty a součásti, které jsou při návrhu využity. Dále je rozebrán použitý AD/DA převodník pro převod analogového signálu na digitální a následně upraveného digitálního na analogový, je zde doporučené schéma zapojení převodníku, které je využito pro návrh DPS. Také je zde popis operačního zesilovače a stabilizátoru. Tyto dvě součástky byly použity pro realizaci předzesilovače. Návrh DPS je zde také popsán spolu se schématem obvodu.

Ve čtvrté kapitole je popis programu a jeho jednotlivých částí. Je zde popis pro nastavení registrů, příjmu a odeslání dat, přednastavení efektů, praktické řešení jednotlivých efektů a také zápisu do paměti SRAM.

Jelikož efekt nemá flash paměť, je potřeba efekt vždy po zapnutí nastavit a pro změnu efektu je potřeba přestat hrát a opět jej znovu nastavit. Pokud by byla použita i flash paměť, bylo by možné efekty ukládat a poté mezi nimi snadno přepínat. Při nastavování efektu jsou vždy na sedmsegmentovém displeji zobrazeny dvě písmena, která určují nastavovaný efekt a poté dvě čísla, která určují nastavení efektu. Původně bylo v semestrálním projektu plánované vytvoření bank (každý bank by měl nastavené jednotlivé efekty), mezi kterými by bylo možné přepínat. Také bylo plánované přepínání pomocí nožních přepínačů. Konstrukce pouzdra, na kterém by byly přepínače ukotveny, byla ale vynechána. Pokud bude efekt dále využíván, konstrukce pouzdra může být dodělána, stejně jako případné další rozšíření například přidání flash paměti, potenciometrů a AD převodníků, aby bylo možné efekty přesně a lépe nastavovat za běhu efektového procesoru, a poté toto nastavení uložit.

Při zpracování bakalářské práce jsem dospěl k závěru, že výroba digitálního efektového procesoru je složitější než výroba analogového efektu. Je potřeba mít určité zkušenosti, aby byl procesor vyroben kvalitně. Efekt distortion nezní příjemně pro poslech, je příliš ostrý, bylo by potřeba jej více vyladit, navíc je i zkreslen při vyšších frekvencích a velkém zesílení. Efekt delay by mohl mít více smyček pro opakování, které by se mohly postupně zeslabovat, a efekt chorus by mohl mít nastavení maximální doby zpoždění. Na realizaci těchto vylepšení ovšem nevyšel čas. Navíc jsou sice efekty zapojeny za sebou, aby je bylo možné používat současně, při praktické zkoušce bylo ovšem zjištěno, že při spojení efektů delay a chorus dochází k vazbě a pískání, což je pravděpodobně způsobeno díky paměti, do které jsou vzorky ukládány a při kombinaci efektu delay nebo chorus je výsledný zvuk nesrozumitelný.

Digitální zvukové procesory jsou výhodnější, pokud mají více funkcí, jelikož zabírají malou plochu. Ale pokud jsou realizovány pouze tři efekty, bylo by pravděpodobně výhodnější a jednodušší realizovat je jako analogové efekty.

6 Rejstříky, seznamy a použité součástky

6.1 Použitá literatura

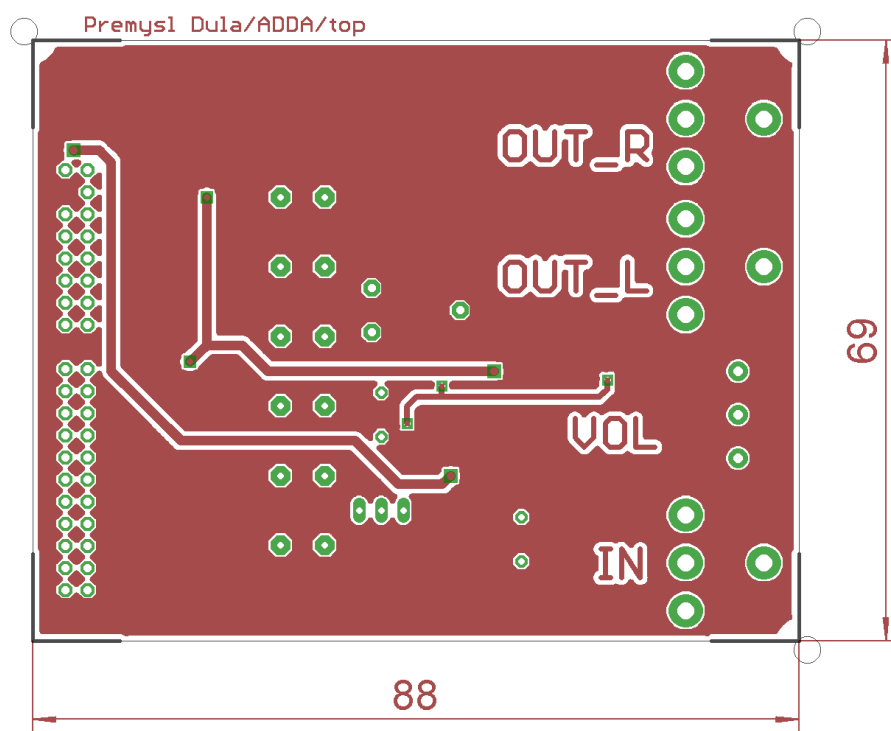
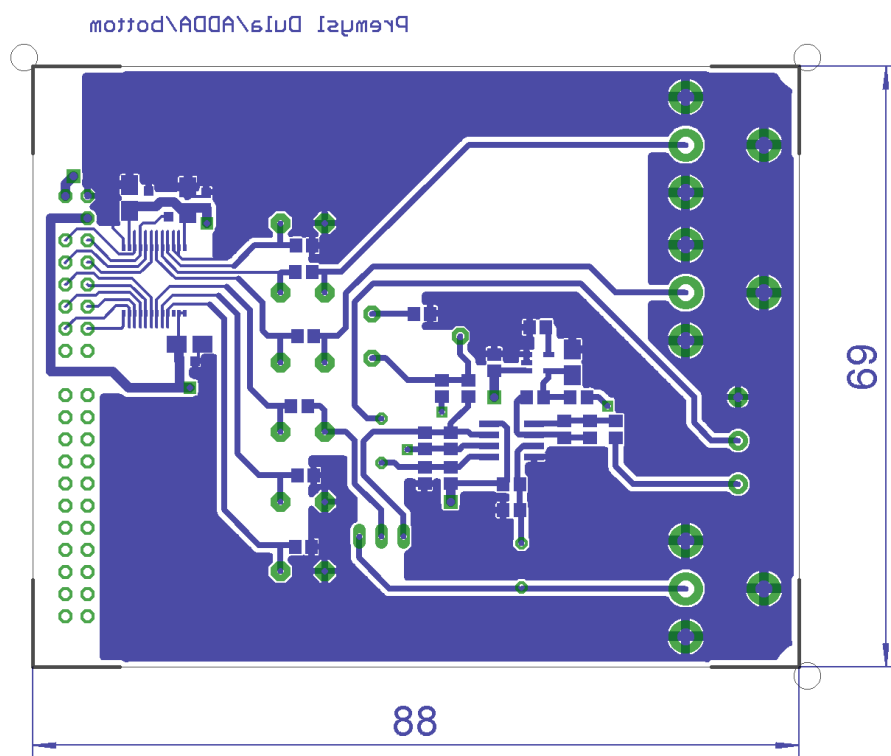
- [1] *DAFX: digital audio effects*. Chichester: John Wiley, 2002, 533 s. ISBN 04-714-9078-4.
- [2] *Dreamface.net* [online]. 2003 [cit. 2011-12-15]. ZVUKOVÉ EFEKTY - 6. DÍL. Dostupné z WWW: <<http://www.dreamface.net/modules.php?name=News&file=article&sid=156>>.
- [3] *Dspace.k.utb.cz* [online]. 2008 [cit. 2012-08-14]. Dostupné z: <http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/6756/kr%C5%AF%C5%BEela_2008_dp.pdf?sequence=1>.
- [4] *Elektrorevue.cz* [online]. 2009 [cit. 2011-12-15]. Hudební efekt distortion využívající zpracování přírůstků signálů časově variantním systémem. Dostupné z WWW: <<http://elektrorevue.cz/cz/clanky/zpracovani-signalu/0/hudebni-efekt-distortion-vyuzivajici-zpracovani-prirustku-signalu-casove-variantnim-systemem/>>.
- [5] *Hudebniforum.cz* [online]. 2007 [cit. 2011-12-15]. TO ZÁKLADNÍ O KYTAROVÝCH EFEKTECH. Dostupné z WWW: <<http://hudebniforum.cz/kytarove-efekty/to-zakladni-o-kytarovych-efektech-t6945.html>>.
- [6] *Mikroelektro.utb.cz* [online]. [cit. 2012-08-14]. Dostupné z: <http://mikroelektro.utb.cz/e107_files/downloads/1227009285_operacni_zesilovace_1.pdf>.
- [7] *Musichard.com* [online]. 2010 [cit. 2011-12-15]. DS-2 Turbo Distortion features twin modes for extending the reach of distortion. Dostupné z WWW: <<http://musichard.com/tag/distortion>>.
- [8] *Muzikus.cz* [online]. 2009 [cit. 2012-05-26]. Dostupné z: <<http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-clanky/Jak-pracuji-efekty-II~05~brezen~2009/>>.

- [9] *Panasonic.com* [online]. 2012 [cit. 2012-05-23]. Texas Instruments Based PAN13xx Series. Dostupné z:
<<http://www.panasonic.com/industrial/includes/pdf/PAN13xxSeriesFAQ.pdf>>.
- [10] *Stavebnice.postreh.com* [online]. [cit. 2012-08-14]. Dostupné z:
<<http://www.stavebnice.postreh.com/select.php?link=PT007>>.
- [11] *Synthtopia.com* [online]. 2008 [cit. 2012-05-26]. Dostupné z:
<<http://cdn.synthtopia.com/wp-content/uploads/2008/02/boss-gt-10-guitar-processor.jpg>>.
- [12] *Texas Instruments* [online]. 2011 [cit. 2011-12-15]. PCM3002. Dostupné z WWW:
<<http://www.ti.com/product/pcm3003>>.
- [13] *Velleman.eu* [online]. 2004 [cit. 2012-08-14]. Dostupné z:
<http://www.velleman.eu/downloads/0/illustrated/illustrated_assembly_manual_k4102_rev1.pdf>.
- [14] *Vutbr.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-12-15]. Analýza hudebních multieffektů. Dostupné z WWW:
<http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41414>.
- [15] *Whatis.techtarget.com* [online]. 2012 [cit. 2012-05-23]. Serial peripheral interface (SPI). Dostupné z: <http://whatis.techtarget.com/definition/0,,sid9_gci959922,00.html>.
- [16] *Xilinx.xom* [online]. 2011 [cit. 2012-05-26]. Dostupné z:
<http://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug331.pdf>.
- [17] *Xilinx.xom* [online]. 2006 [cit. 2011-12-15]. Using Digital Clock Managers (DCMs) in Spartan-3 FPGAs. Dostupné z WWW:
<http://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp462.pdf>.

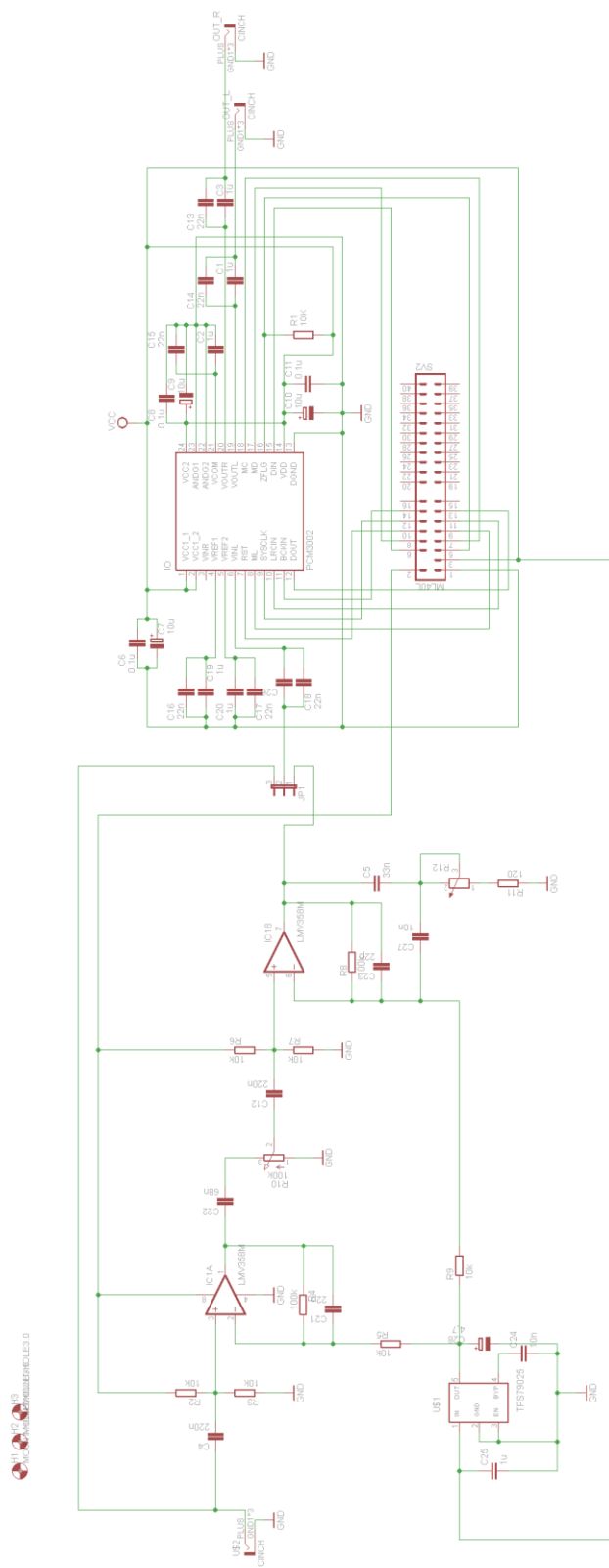
6.2 Abecední seznam zkratk

- AD/DA - Analog-digital / digital-analog
- ADC - Analog to digital converter
- DAC - Digital to analog converter
- DCM - Digital Clock Managers
- DPS -Deska plošného spoje
- FPGA – Field programmable gate array
- IO - Integrovaný obvod
- I2S – Integrated Interchip Sound (formát audio dat)
- LFO – Low frequency oscilátor
- OZ – Operační zesilovač
- PCM - Pulse code modulation
- SPI –Seriál Peripheral Interface (formát audio dat)
- SSOP – Shrink small outline package

Příloha A: návrh DPS - layout



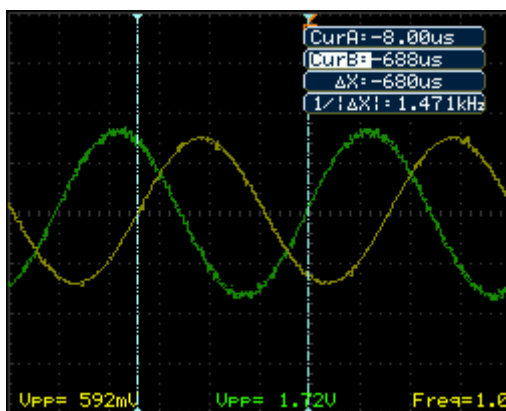
Příloha B: návrh DPS – schéma zapojení



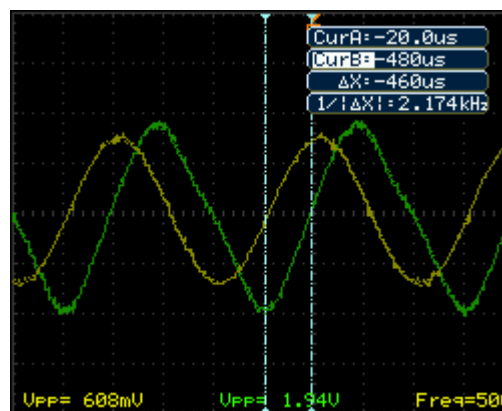
Příloha C: příklady efektů a jejich popis [5]

Zkreslovací efekty	
Overdrive	simuluje přebuzený lampový zesilovač
Distortion	signál zkresluje agresivněji než efekt overdrive
Fuzz	napodobuje přebuzený zesilovač zapojený do reproboxu s potrhaným reproduktorem
Efekty měnící frekvenční pásmo	
Ekvalizér	zvýrazňuje nebo potlačuje frekvence v určitých pásmech
Phaser	přidává k signálu jeho fázově posunuté kopie
Wah-wah	jde o efektový pedál, který podle polohy nechává projít jen určité pásmo frekvencí
Resonator	filtruje frekvenční spektrum a zesiluje úroveň hlasitosti frekvencí, které propouští
Efekty pracující se změnou hlasitosti	
Tremolo	periodicky zesiluje a zeslabuje úroveň signálu
Compressor	signál s nízkou úrovní zesiluje, s vysokou úrovní zeslabuje
Noise gate	nepropustí signál pod určitou úrovní signálu
Efekty pracující s časovým průběhem	
Delay	zpožďuje signál a přičte jej k nezpožděnému
Echo	vytváří několik kopií signálu, ty se postupně zeslabují a prodleva mezi nimi klesá
Reverb	dodává zvuku dojem, že se hraje ve velké místnosti
Efekty pracující se změnou výšky tónu	
Vibrato	periodicky zvyšuje a snižuje výšku tónu
Octaver	upraví vstupní signál tak, že jej posune o oktávu výš nebo níž a přičte k nezměněnému signálu
Chorus	tvoří jej efekt vibrato, ke kterému se přičte nezměněný signál

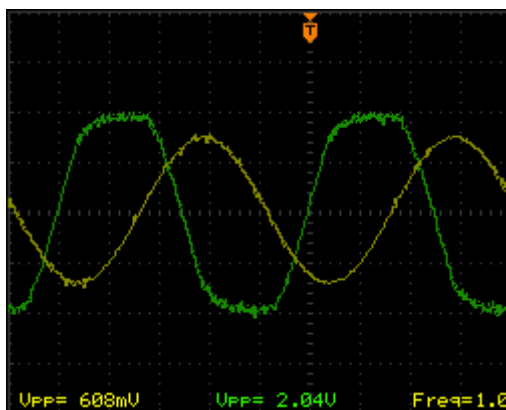
Příloha D: Grafy – neupravený signál a signál upravený efektem distortion



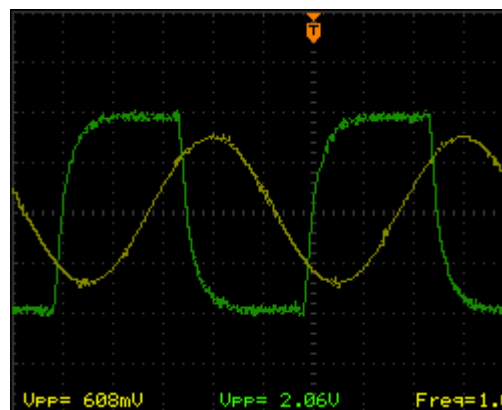
Graf 1 - 1kHz



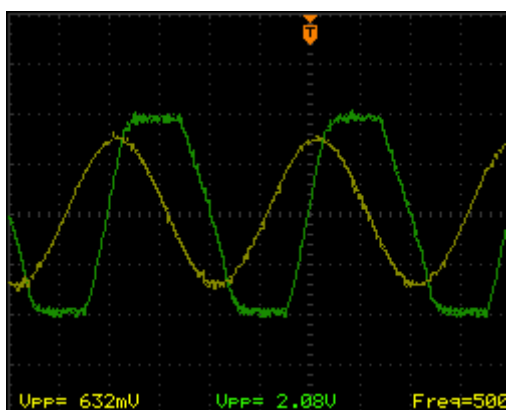
Graf 2 - 500Hz



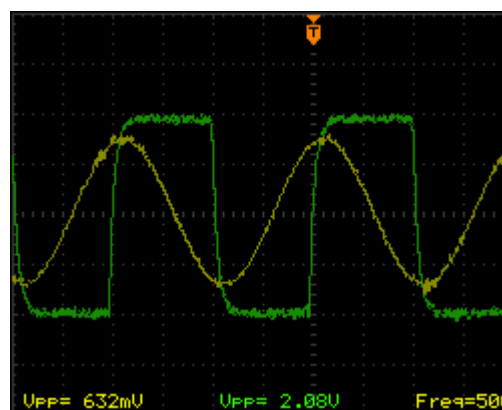
Graf 3 - distortion 1kHz, nastavení 03



Graf 4 - distortion 1kHz, nastavení 99

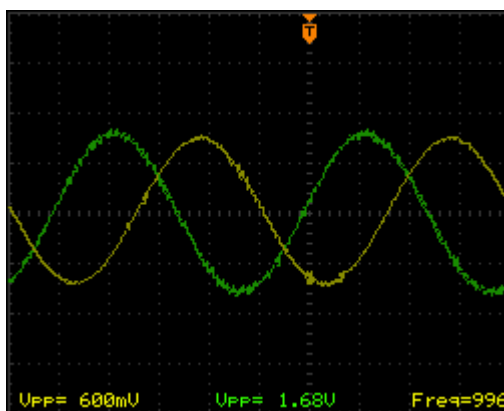


Graf 5 - distortion 500Hz, nastavení 03

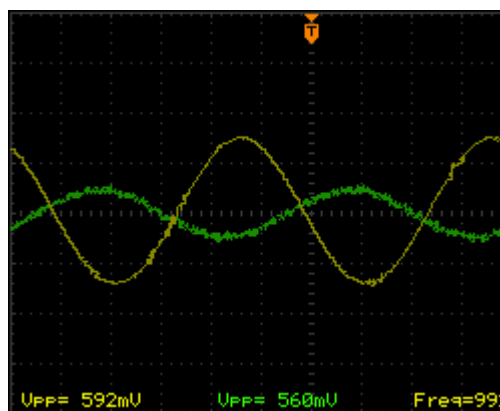


Graf 6 - distortion 500 Hz, nastavení 99

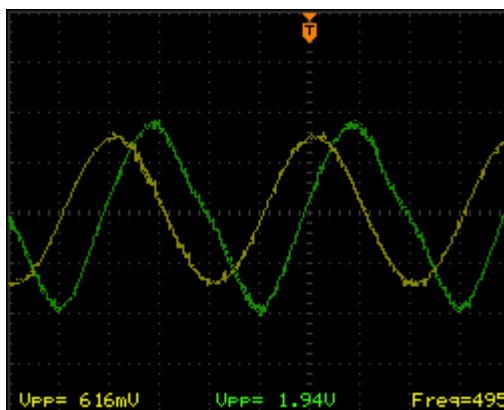
Příloha E: Grafy – signál upravený efektem delay



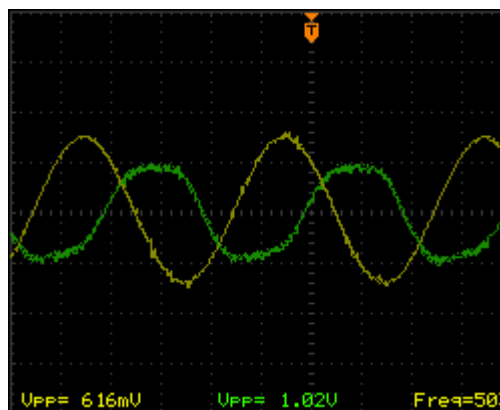
Graf 7 - delay 1kHz, nastavení 03



Graf 8 - delay 1kHz, nastavení 99

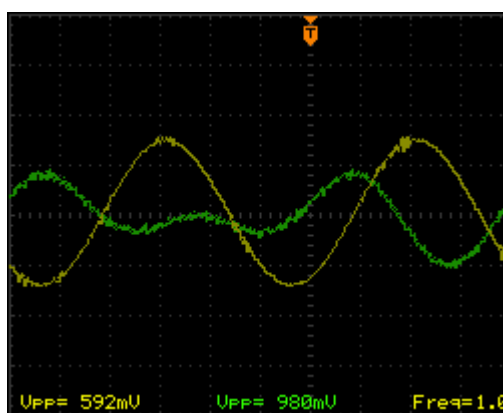


Graf 9 - delay 500Hz, nastavení 03

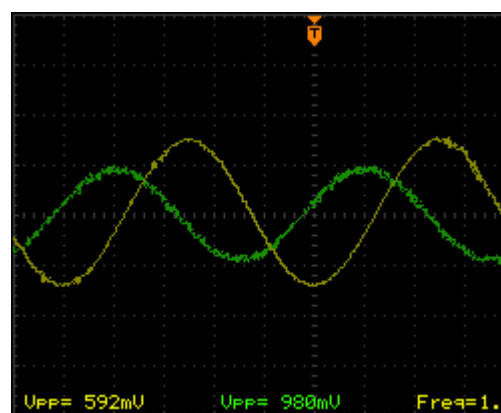


Graf 10 - delay 500 Hz, nastavení 99

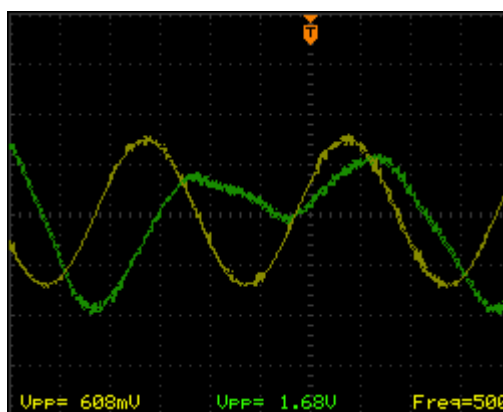
Příloha F: Grafy – signál upravený efektem chorus



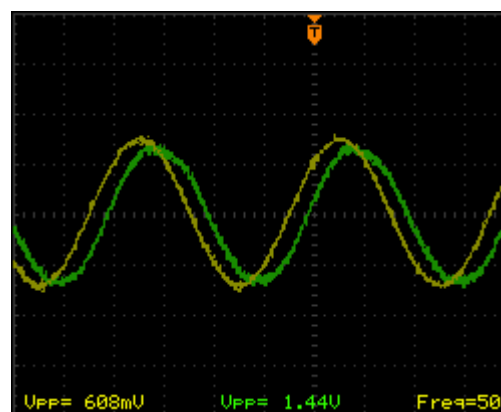
Graf 11 - chorus 1kHz, nastavení 03



Graf 12 - chorus 1kHz, nastavení 99



Graf 13 - chorus 500Hz, nastavení 03



Graf 14 - chorus 500 Hz, nastavení 99