

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Digitální efektový modul pro zvukové aplikace

Vedoucí práce: Ing. Michal Kubík, Ph.D.

Autor práce: Tomáš Choura

2013

Abstrakt

Bakalářská práce se věnuje digitálnímu zpracování zvukových signálů, které je realizováno ve zvukových efektových modulech. Jsou v ní popsány postupy, jak některé typy efektů zpracovávají zvukový signál v analogové nebo digitální podobě a proč se takové efektové moduly používají. Obsahem je i návrh obvodového řešení vlastního efektového modulu a základní informace o programování použitého zvukového procesoru FV-1 Reverb.

Klíčová slova

DPS procesor, digitální efekt, zvukové aplikace, chorus, flanger, reverb, echo, assembler, FV-1 Reverb, prioritní kódér, operační zesilovač, nízko frekvenční generátor

Abstrakt

This Bachelor thesis deals with the digital processing of audio signals. The audio signals are usually processed in the audio effect modules. The thesis includes a description of some procedures how several effects are processing the audio signals in analogue or digital form and why and/or where effect modules are used. This is followed by a description of the design of a custom sound effect module and basic information about programming of the FV-1 Reverb processor.

.

Keywords

DSP processor, digital effect, audio application, chorus, flanger, reverb, echo, assembler, FV-1 Reverb, priority coder, operational amplifier, low frequency oscillator

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V plzni dne 5. 6. 2013

Tomáš Choura

.....

1. Úvod	4
1. Audio efekty	5
1.1. Delay, echo a looper	5
1.2. Phaser.....	6
1.3. Flanger	7
1.4. Tremolo.....	8
1.5. Reverb.....	9
1.6. Pitch shift, octaver a detune	10
1.7. Chorus.....	11
2. Operační zesilovač	12
2.1. Teorie operačních zesilovačů	12
2.2. Přístrojový zesilovač.....	13
2.3. Neinvertující zesilovač	15
3. Digitální a analogové systémy	16
3.1. DSP procesor FV-1 Reverb.....	17
3.2. DSP-1K Audio procesor	17
3.3. Rozhodnutí o výsledném obvodu	17
4. DSP procesory.....	18
4.1. Architektura DSP procesorů.....	18
4.2. Vlastnosti FV-1 Reverb a obvodové řešení.....	19
4.2.1. Aritmeticko-logická jednotka (ALU).....	20
4.2.2. Vstupní a výstupní obvody	21
4.2.3. Counter store.....	23
4.2.4. Zpožďovací paměť RAM	23
4.2.5. SIN LFO	23
4.2.6. RAMP LFO	25
5. Struktura programu pro FV-1.....	27

5.1.	Hlavička a první kroky	27
5.2.	Tělo programu	28
5.3.	Základní instrukce SpinAsm	29
6.	Napájecí zdroj.....	30
7.	Porovnání s elektronikou dostupnou na trhu	32
8.	Seznam použité literatury	34

Seznam symbolů a zkratk

DSP	digitální signálový procesor
ALU	aritmeticko-logická jednotka
LFO	nízko frekvenční oscilátor
OZ	operační zesilovač
A/D	analogově-digitální převodník
D/A	digitálně-analogový převodník
FFT	rychlá fourierova transformace
JFET	polem řízený tranzistor s vodivým hradlem
DPS	deska plošných spojů
RAM	paměť s přímým přístupem
ROM	permanentní paměť
EEPROM	elektronicky mazatelná paměť typu ROM
ACC	akumulátor

1. Úvod

Bakalářská práce se zabývá seznámením s funkcí a činností zvukového modulu, zejména bude řeč o zvukových modulech pro kytaristy a seznámí vás se základními efektovými moduly, které se v hudební praxi velice často používají. U jednotlivých typů efektových modulů je blokově popsána struktura a jak její parametry ovlivňují možnosti a výsledný zvuk efektu.

Zvukový signál lze zpracovat analogovými nebo digitálními obvody. Každý z těchto dvou systémů má svoje klady i chyby, které jsou však i někdy záměrně vyhledávány určitou skupinou hudebníků. Práce se však bude věnovat digitálním procesům se zvukovým signálem. Z toho vyplývá, že je nutné říci, co je základem pro digitální systém pro zpracování zvukového tedy analogového signálu. Ano, řeč je o procesorech zaměřené na práci s analogovými signály, tedy o digitálních signálových procesorech, které zdaleka nejsou určeny jen pro zvukové aplikace. Digitální signálový procesor DSP je srdcem celého obvodu a základem procesoru je aritmeticko-logická jednotka. Další neméně významné součásti DSP jsou například banky registrů, které zaručují rychlý přístup pro krátkodobé uložení dat, programová paměť, analogově-digitální A/D a digitálně-analogové převodníky D/A, funkční bloky pro složitější aritmetické výpočty a další bloky obvodů, které závisí na specializaci každého DSP.

DSP procesorů jsou zastoupeny na trhu v současné době v relativně velkém počtu. V této práci se budeme konkrétně bavit jen o dvou DSP od dvou různých výrobců a řekneme, který bude pro efektový modul pro kytaristu vhodnější. Součástí této práce je také návrh pro obvodové řešení digitálního efektového modulu s jedním z těchto signálových procesorů a základní informace o postupu při psaní programu.

1. Audio efekty

Ještě předtím než bude vysvětleno, jak jednotlivé efekty fungují, mělo by být řečeno, proč se vlastně efekty, ať už při samotné hře na hudební nástroj nebo nahrávání, používají. Efekty resp. obvody, které hudebník používá, mají za úkol zpestřit a obohatit zvuk takovým způsobem, který je většinou pro hudebníka naprosto nemožný docílit jiným způsobem. Například obvod typu chorus se snaží imitovat hru dvou nástrojů, nebo efekt reverb napodobuje zvuk umístěný do prostoru. [1]

Výběr efektu bych rozdělil do dvou kategorií. Efekty, které používá sám hudebník při živém vystoupení a efekty, které jsou dnes už nezbytné pro zvukaře v nahrávacím studiu. Z tohoto rozdělení můžeme odhadnout, že pro každou kategorii představuje audio efekt naprosto odlišnou práci se zvukem, a protože téma této práce jsou především kytarové efekty, budeme se dále bavit převážně o efektech, které používá přímo hudebník, v našem případě tedy kytarista, baskytarista či klávesista. Opomenu tedy efekty jako maximizer, limiter a další efekty podstatné pro mastering nahrávky. [1]

1.1. Delay, echo a looper

Kytarové efekty typu delay a echo jsou v podstatě jen zpožďovací obvody, ale tato zpožďovací linka je základem všech následujících modulačních efektů. [1]

Jak je patrné z překladu „delay“ česky zpoždění, je úkol tohoto efektu zpozdit signál. Digitální zpracování se konvenčně nazývá „delty“ naopak analogové zpracování, u kterého se většinou využívá magnetofonového pásku „echo“. Volba analogového či digitálního přístroje je otázkou vkusu. Echo pracuje na principu nekonečné smyčky magnetofonového pásku. Okolo ní je postaveno několik snímacích hlav. Nastavením jejich poměrů dostaneme na výstupu delší či kratší echo podle síly signálu z každé hlavy. Nevýhodou je postupné opotřebení magnetického pásku, které je však u některých hudebníků i často vyhledávána. U digitálního zpracování je jako zpožďovací článek většinou použita paměť DRAM, do které vstupuje A/D převodníkem vzorkován signál, který se na výstupu objeví se zpožděním. Maximální hodnota tohoto zpoždění pak závisí na velikosti paměti. U digitálního zpracování se podobně jako u analogových efektů někdy vyhledávají určité nedokonalosti. V těchto případech tu figuruje třeba nižší vzorkovací frekvence nebo počet bitů A/D převodníku. Délka dozvuku se pohybují od jednotek

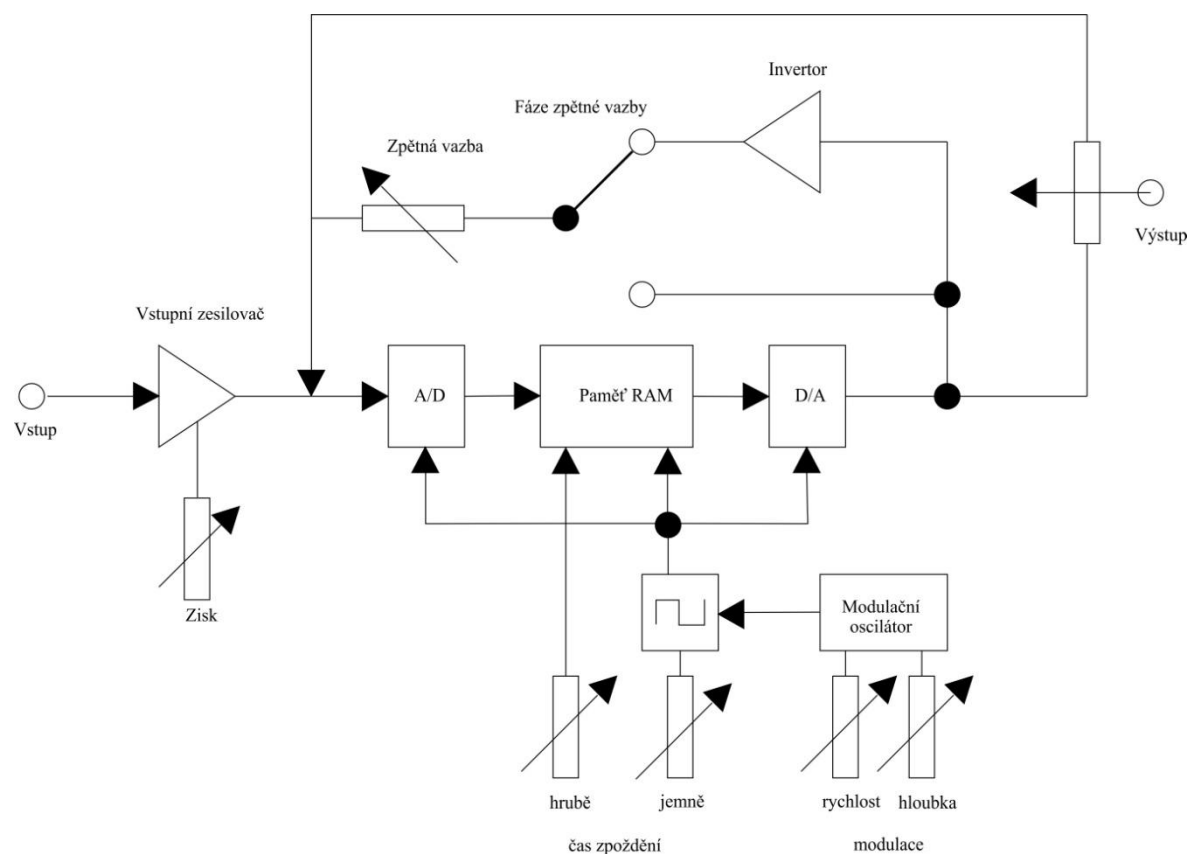
milisekund až po tři vteřiny. Tímto parametrem se efekty delay a echo liší od efektů looper – „smyčkovače“, které dokáží udržet zpoždění signálu až desítky sekund.

Možnosti ovládání:

Balance, mix – poměr mezi vstupním a zpožděným signálem

Feedback – množství signálu přivedeného zpětnou vazbou na vstup

Delay time – délka zpoždění



Obr. 1. 1.: Digitální zpožďovací linka

[1] [9]

1.2. Phaser

Zvuku phaseru docílíme průchodem signálu obvodem, který má hřebenovou frekvenční charakteristiku. Ta vykazuje útlum na vybraných pásmech. [1]

Periodickým pohybem těchto pásem pak získáme žádoucí efekt. Základní částí phaseru je širokopásmový filtr. Ten by teoreticky neměl mít na signál žádný vliv. Při praktické realizaci se však skládá ze skutečných frekvenčně závislých součástí s nenulovou impedancí. Takový filtr sice nemění amplitudu, ale otáčí fázi, a to právě v závislosti na frekvenci vstupního signálu. V praxi to znamená, že dochází ke zpoždění signálu, a to tím

více, čím vyšší je jeho frekvence. Lidské ucho otáčení fáze nevnímá. Ke slyšitelné interferenci dojde až při smíchání původního signálu se signálem na výstupu filtru. [1] [9] Při zařazení několika širokopásmových filtrů do série získáme obvod s požadovanou hřebenovou charakteristikou. Jejich počet bývá od čtyř (MXR Phase 90, EH Small-Stone) do dvanácti stupňů (Boss PH-3). Množství útlumů je rovno polovině tohoto počtu. Tedy například frekvenční charakteristika MXR 90 má dvě útlumová pásma.

Některé phasery mohou mít zavedenou zpětnou vazbu pro zvýšení dosaženého efektu.

Možnosti ovládání:

Rate, intensity – hloubka efektu

Speed – rychlost změny fází

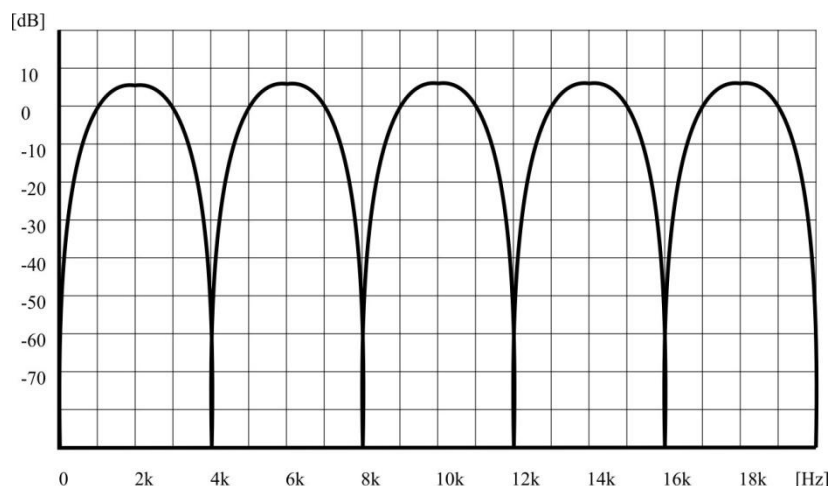
Feedback – množství signálu přivedeného zpětnou vazbou na vstup

Balance, mix – poměr mezi vstupním a výstupním signálem s posunutou fází

[1] [9]

1.3. Flanger

Charakter zvuku efektu je dán přimícháním rozladěného a zpožděného signálu k původnímu. Hlavním prvkem flangeru je zpožďovací článek s rozsahem 1-10 ms. Realizaci tohoto zpoždění zajišťuje nízkofrekvenční oscilátor (dále jen LFO). Ten kmitá řádově v jednotkách Hz. Běžný rozsah je někde mezi 0,5 až 3 Hz. Průběh LFO bývá možné měnit, častý je pilový nebo sinusový. [1] [9]



Obr. 1. 3.: Frekvenční charakteristika hřebenového filtru

Aby bylo dosaženo požadovaného efektu, je třeba signál zpožďovat nejen o proměnnou danou LFO, ale též o konstantní čas. Celkový čas zpoždění je tedy roven $T = T_{\text{konst}} + T_{\text{LFO}}$.

Do obvodu je zavedena zpětná vazba, která je důležitá pro výsledný "plechový" charakter zvuku. Při nastavení velkých hodnot zpětné vazby a dodání dostatečně silného signálu, může dojít k nestabilitě systému. Podle výrobců by to mělo být využitelné při vytváření nových zvuků. V praxi to má spíše za následek nečitelné rozmazání tónu. Zpožděný signál má posunutou fázi a dochází k jeho interferenci se vstupem. Frekvenční charakteristika celého obvodu vykazuje hřebenový průběh (viz obr. 1). Na některých pásmech dochází k úplnému útlumu, přičemž počet pásem je přímo úměrný celkovému nastavení zpoždění. Počet pásem je řádově v jednotkách. Stereofonní Flanger se realizuje umístěním nezávislých zpožďovacích obvodů zvlášť do každého kanálu. Například Lexicon MPX 200 má na jednom kanálu konstantní zpoždění, na druhém kanálu pak pracuje výše popsaný člen řízený LFO.

Možnosti ovládání:

Depth, Width – hloubka efektu

Speed – celkový čas zpoždění

Feedback – množství signálu přivedeného na vstup zpětnou vazbou

Balance, Mix – poměr mezi vstupním a efektovaným výstupním signálem

[1] [9]

1.4. Tremolo

Princip tohoto efektu je stejný, jako kdybychom v pravidelném intervalu zeslabovali a zesilovali výstupní signál, který je přiváděn do reproduktoru. [1]

V principu se jedná o velmi jednoduchý obvod, který býval jedním z prvních efektů vůbec. Jeho funkce může být postavena na fotorezistoru. Na něj střídavě bliká zdroj světla, řízený LFO. Další praktickou realizací může být střídavá změna biasu lampy v předzesilovači. Bias je potenciál řídicí mřížky; jeho pokles umožní přenos menšího počtu elektronů, a tím menší zesílení. V současnosti se tremolo realizuje optočleny nebo digitálně. [1] [9]

Útlum tremola bývá v rozsahu od 0 až do cca 6 dB. Rychlost oscilátoru je v rozmezí 0,5 až 20 Hz. K dispozici je tradiční sinusový, ale též obdélníkový nebo pilový průběh. Zajímavého zvuku lze dosáhnout při ovládání LFO vstupní obálkou (dynamikou hry). Silnější hra tak má za následek například rychlejší kmitání tremola, slabá pak jeho zpomalení. Výraz díky tomu může nabýt na dramatičnosti. Je dobré, když je frekvence

LFO nastavena podle rytmu dané skladby. Je zřejmé, že fáze výstupního signálu se nemění, pouze amplituda. Stereofonní tremola umožňují nejen nastavení kmitání každého kanálu zvlášť, ale též synchronizovat oba LFO, což může vytvářet zajímavé efekty.

Možnosti ovládání:

Depth – hloubka efektu

Speed, Rate – celkový čas zpoždění

Shape mode – charakter LFO, respektive typ průběhu

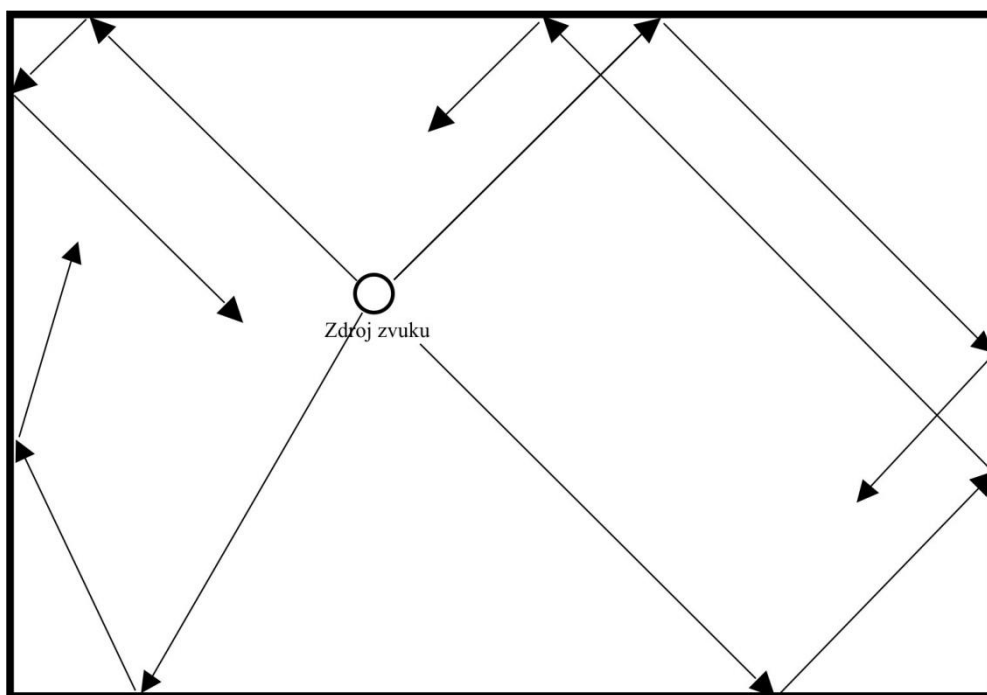
[1] [9]

1.5. Reverb

Takřka nepostradatelný efekt ve výbavě každého nahrávacího studia, avšak i na živých vystoupeních má své plnohodnotné místo. Poslech bez reverbu je suchý a sterilní. Reverb dodává nástroji či zpěvu hloubku a umisťuje je do prostoru. Podle nastavení v podstatě určuje, jaký charakter ozvěny budeme slyšet, např. malá místnost, kostel, koncertní hala nebo otevřené prostranství. Nevhodné nastavení ale udělá z poslechu nesrozumitelný shluk tónů. [1] [9]

Pocit prostorů je v podstatě pouhým součtem odrazů v prostoru. Jako nejjednodušší řešení by se mohlo zdát použití více delayů dohromady. Problém však je v množství použitých zpomalovacích obvodů a v jejich přesném nastavení. Při realizaci se zkoumá impulzní charakteristika vybraného prostoru. Algoritmus (obvod) reverbu se snaží napodobit jeho odezvu na jednotkový impulz. V praxi se používá kombinace různých filtrů jako hřebenový filtr (comb filter) a širokopásmový filtr (allpass filter). Oba mají nekonečnou impulzní odezvu (IIR, Infinite Impulse Response), tedy "neořezávají" frekvenční pásmo. Filtry posouvají fázi a zpožďují signál. Tento posun je frekvenčně závislý, což koreluje s reálným prostorem. [1]

Jeden z prvních algoritmů byl koncem sedmdesátých let navržen J. A. Moorerem, který použil šest hřebenových filtrů a jeden širokopásmový filtr. Signál vstupuje nejprve do čtyř paralelně zapojených hřebenových filtrů, které vytvoří blízké odrazy. Každý filtr zpozdí signál o jiný čas, obvykle 20-50ms, a tím je napodoben odraz zvuku v prostoru. Je důležité, aby tyto časy byly nesoudělitelné. Výstupní signály těchto filtrů jsou smíchány prvním širokopásmovým filtrem a následně v druhém širokopásmovém filtru, který přidá pocit vzdálených odrazů. Zpoždění obou filtrů se obvykle pohybuje od tří do dvaceti milisekund. [1] [9]



Obr. 1. 5.: Násobení odrazů zvukových vln v uzavřeném prostoru

Existuje další množství pokročilých algoritmů, jak reverbu dosáhnout. Kombinují se filtry s různými charakteristikami, mění se jejich počet a způsob zavedení zpětné vazby. Využívají se například filtry s neexponenciální impulzovou charakteristikou (NEDCF, Non-Exponentially Decaying Comb Filter), filtry s omezenou impulzní odezvou (FIR, Finite Impulse Response), a mnohé další varianty.

Možnosti ovládní:

Time, Size – hloubka dozvuku

Predelay – zpoždění blízkých odrazů

Balance, Mix – poměr mezi vstupním a efektovaným zvukem

[1] [9]

1.6. Pitch shift, octaver a detune

Tyto pedály řeší hudebníkům problematiku, kdy není po ruce další hudebník, který by daný part zahrál. Jedná se tedy o efekty, které k zahráným tónům přidávají tóny další. Z názvu je jasné, že efekt se známkou Octaver, bude přidávat k našemu zahránému tónu první nebo druhou vyšší či nižší oktávu. Pitch shift zvládne to samé jako octaver, ale dovoluje nastavit přidané tóny přesně po půltónech. Detune naopak přidává tón mírně rozladěný a s malým zpožděním. [1]

První částí blokového zapojení pitch shifteru je detekce frekvence vstupního signálu. Jeden přístup řešení využívá rychlou Fourierovu transformaci (FFT, Fast Fourier Transform). Tento algoritmus umožní v krátkém čase zjistit základní frekvenci signálu (tón). Poznamenejme, že FFT mimo jiné nedává příliš mnoho přesných informací o harmonických, protože je založena na zjednodušení vstupních informací. Problematické se stává detekování základního tónu při hraní akordů, proto se většinou používá při jednohlasých linkách. Po detekci následuje transpozice signálu. U analogových zařízení, například u magnetofonové pásky, se postupuje jednoduchým dvounásobným nebo čtyřnásobným zpomalením. Tím se nahraný tón posune o jednu nebo dvě oktávy níž. Obdobně se postupuje u digitálních zařízení, kde magnetofonovou pásku představuje paměť A/D převodníku. Dvounásobným zmenšením vzorkovací frekvence dosáhneme tedy stejného výsledku. Signál vzorkovaný v A/D převodníku frekvencí 44,1 kHz stačí pustit do D/A převodníku taktovaného na 22,05 kHz a dostaneme tón, který je o oktávu níž. Protože se ale rychlost vzorkování zpomalila, bude i zpomalené čtení dat. To se v praxi dá vyřešit přeskočením každého druhého vzorku v mezipaměti a máme tedy i správné načasování jednotlivých vzorků. Při záznamu nám v paměti zaberou nízké oktávy poloviční místo oproti tónu původnímu, vysoké oktávy budou mít v paměti místo dvounásobné.

Možnosti ovládání:

Pitch – posun tónu, půltónech nebo v centech

Mix, Balance – poměr vstupního a efektovaného zvuku

Key, Scale – automatická tvorba harmonie

Delay – u efektů detune, zpoždění tónu

[1] [9]

1.7. Chorus

Budeme-li chtít říci o efektu že je „poznávací značkou“ kytary, bude krom zkrácení řeč jednoznačně o efektu typu chorus. Jak už může být z názvu patrné, tento efekt se snaží vnést do zvuku více hlasů, tedy dojem že více hráčů hraje tu samou pasáž s velmi podobným avšak nepatrně odlišným charakterem zvuku. Každý hráč má oproti ostatním nepatrně rozladěný nástroj, je nepatrně rychlejší nebo pomalejší v tempu hry, ale výsledek je bohatý šťavnatý zvuk. [1]

Základem efektu chorus je jako u efektu flanger zpožďovací linka a její zpoždění se pohybuje v rozmezí 20-50 ms (zdravý člověk zaznamená zpoždění až kolem 60ms).

Zpoždovací článek je však v tomto případě více zásadní než rozladění. Doba zpoždění je řízena nízkofrekvenčním generátorem LFO a je jako u předchozích efektů v řádech jednotek hertzů. U přístrojů pro profesionální použití bývá více zpoždovacích linek, které jsou vzájemně nezávislé. Někdy lze také nalézt LFO, který ovládá poměr mezi již naefektovaným zvukem a vstupním nedotčeným. To do efektu vnese dojem kolísání jednotlivých hlasů a výsledný zvuk je realističtější. U těchto efektů není standardní přivádět výstupní signál zpětnou vazbou na vstup, kde je přičten ke vstupnímu signálu, ale je to také jedna z možností jak dát efektu specifický charakter.

Možnosti ovládání:

Depth – hloubka efektu

Speed – rychlost LFO

EQ, filtr – zvýraznění určitých pásem

Mix – výstupní poměr vstupního a výstupního signálu

Feedback – ovládání zpětné vazby

[1] [9]

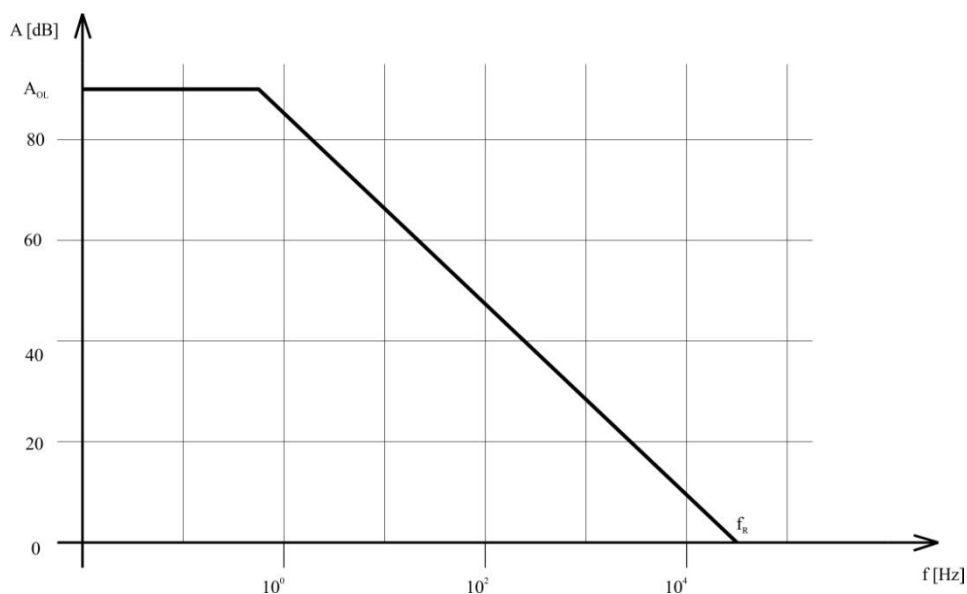
2. Operační zesilovač

Operační zesilovač je polovodičová součástka vyráběná formou integrovaných obvodů vyznačující se velkým napěťovým zesílením vstupního rozdílového napětí. Napěťové zesílení A_U je bezrozměrná hodnota a zpravidla se pohybuje v řádech 10^4 až 10^9 . Operační zesilovače zesilují jak stejnosměrné tak i střídavé signály. [3]

2.1. Teorie operačních zesilovačů

Podle použitých tranzistorů rozdělujeme operační zesilovače do několika kategorií. První a zároveň nejstarší skupinou, jsou bipolární OZ. Základem je bipolární tranzistor. Tato skupina je nejpoužívanější a používá se především pro zesilování stejnosměrných a střídavých nízkofrekvenčních signálů. Další skupina operačních zesilovačů využívá unipolární tranzistor JFET (s vodivým hradlem). Je charakteristický vysokou vstupní impedancí. Do třetí kategorie OZ patří zapojení s unipolárním MOSFET tranzistorem. Tyto zesilovače jsou charakteristické velmi vysokým odporem, přibližují se tak ideálnímu OZ. Používají se zejména pro vysokofrekvenční aplikace. [3]

Zesílení střídavých signálů je kmitočtově závislé, tzn. že se zvyšujícím se kmitočtem klesá zesílení. Pro případ této práce, zesilovače, které budou mít na starost předzesílení signálu, který bude následně vzorkován v A/D převodníku procesoru, modifikován a opět vzorkován v D/A převodníku, se budeme bavit o maximálním kmitočtu daným lidským sluchem a to je 20kHz. U operačních zesilovačů se zavádí kmitočtová kompenzace pomocí externích pasivních součástek. Většina OZ tuto kompenzaci má integrovanou v součástce, ale tato kompenzace je nastavena na největší možné zesílení a to znamená na nízký zlomový kmitočet zesílení. Vnější kompenzace je tedy téměř nevyhnutelná i v tomto případě i za cenu menšího zesílení. [3]



Obr. 2. 1.: Frekvenční charakteristika operačního zesilovače

Zesilovač by také neměl zatěžovat předcházející obvody, tedy měl by mít vysokou vstupní impedanci ideálně nekonečnou. To však nelze úplně splnit, ale reálně se k této hranici OZ alespoň přibližují. Zesílení OZ by také nemělo být závislé na připojení zátěže. Ideálně by tedy měla být výstupní impedance nulová. Reálně se k této hodnotě OZ přibližují. [3]

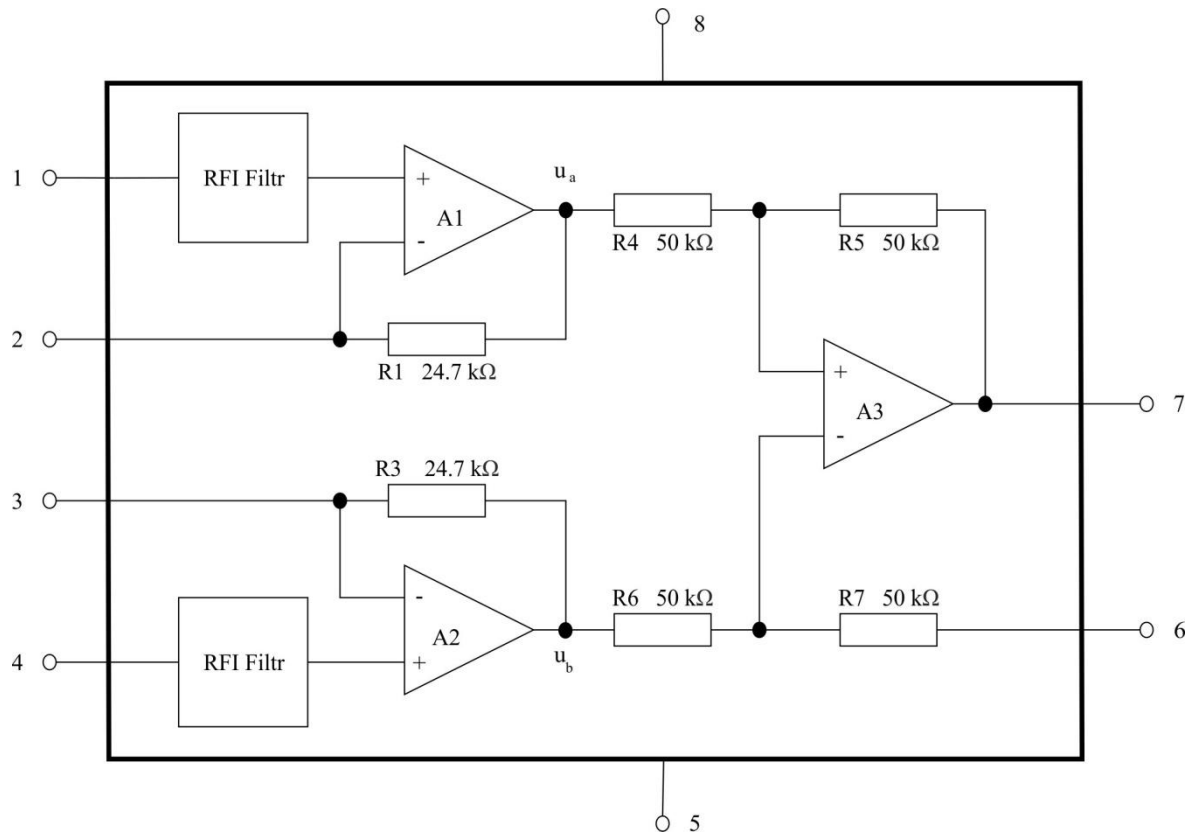
2.2. Přístrojový zesilovač

Přístrojový zesilovač je charakteristické zapojení, které se vyznačuje velkým vstupním odporem a velkým potlačením souhlasného signálu. Z tohoto důvodu je použit v této práci jako vstupní zesilovač. Vstupní zesilovač má za úkol vstupní signál zpracovat

pro další operace následujících obvodů. A/D převodník procesoru FV-1 může pracovat s maximální okamžitou hodnotou signálu 3.3 V, takže vstupní zesilovač má za úkol zesílit vstupní signál tak, aby byl signál převodníkem optimálně zpracován. [3]

Napájení obvodu je symetrických ± 5 V, takže na pinu 8 je přivedeno napětí +5 V a na pinu 5 napětí -5 V. K napájecím svorkám připojíme přes zem keramické kondenzátory 100nF, které zaručí, že při odběrových špičkách bude mít obvod dost energie pro správnou funkci a nezpůsobí tím nelineární zkreslení signálu. [3]

Ze znalosti operačních sítí můžeme odvodit výstupní napětí přístrojového zesilovače. Napětí na pinu 1 označme jako napětí u_1 a napětí na pinu 4 jako u_2 . U použitého integrovaného obvodu na svorky 2 a 3 připojujeme rezistor, který určuje výsledné zesílení obvodu. Označme ho jako R_2 . [3]



Obr. 2. 2.: Vnitřní schéma obvodu INA836 – přístrojový zesilovač se vstupními filtry

$$u_a = u_1 * \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right) - u_2 * \left(\frac{R_1}{R_2}\right)$$

$$u_b = u_2 * \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) - u_1 * \left(\frac{R_3}{R_2}\right)$$

$$u_o = -u_a * \left(\frac{R_5}{R_4}\right) + u_b * \left[\left(\frac{R_7}{R_6 + R_7}\right) * \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right)\right]$$

po úpravě dostáváme vztah:

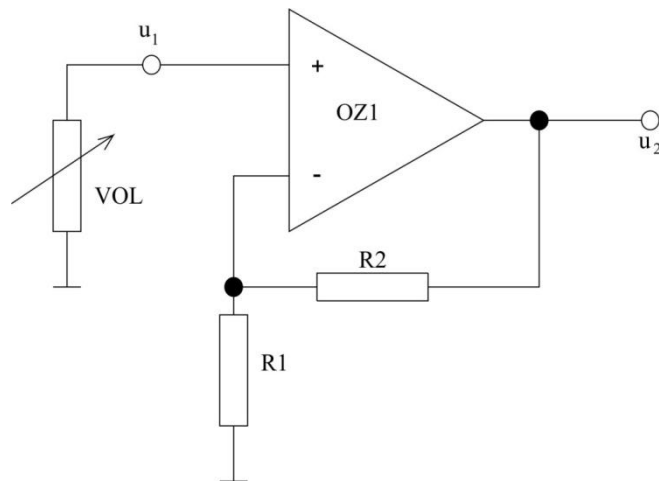
$$u_0 = G * (u_2 - u_1)$$

$$G = 1 + \left(\frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_2} \right)$$

Pro ušetření místa na desce plošných spojů (DPS) je použit integrovaný obvod řady INA826. Maximální možné napájecí napětí je $\pm 18 \text{ V}$, to postačuje účelu této desky, protože obvod je napájen symetrickými $\pm 5 \text{ V}$. Vstupní impedance se blíží ideálnímu zesilovači a činí $100 \text{ k}\Omega$ a maximální amplituda vstupního signálu $\pm 40 \text{ V}$ je výrazně nižší než je předpokládaná hodnota – řádově desetiny voltu. Limitující vstupní proud je 8 mA , takže před vstupní obvody není třeba zapojovat rezistor, který by omezoval proud do vstupních obvodů. Napěťový offset zesilovače je $150 \mu\text{V}$, což by mělo být pro tuto aplikaci dostačující. Vstupy obvodu INA826 jsou vybaveny filtry RFI (radio frequency interference), které eliminují vstup vysokých radiových kmitočtů do operačních zesilovačů. Z frekvenční charakteristiky je podle požadovaného kmitočtového pásma $20 \text{ Hz} - 20 \text{ kHz}$ odvozeno maximální možné nastavení zesílení $A_U = 1000$ [1] ($\sim 40 \text{ dB}$). [6]

2.3. Neinvertující zesilovač

Neinvertující zesilovač je jedno ze základních zapojení s operačními zesilovači. V této práci plní úkol výstupního zesilovače. Výstupní zesilovač má za úkol již zpracovaný signál zesílit takovým způsobem, aby následující obvody, jako například koncový zesilovač, mohly signál zpracovat. Slabý výstupní signál by požadoval velké zesílení koncového zesilovače, což může znamenat, že bude i více zesílen šum a výrazně se může zhoršit kvalita signálu. Pro tuto práci je použit lineární OZ SA5534AD, který vykazuje nízký šum. Pro optimální nastavení je před operačním zesilovačem potenciometr (VOL) s logaritmickým průběhem, kterým lze nastavit úroveň výstupního zesílení. Aby bylo možné ovládat oba výstupní kanály současně, je použit stereo potenciometr. Logaritmický potenciometr je použit, protože lidské ucho vnímá intenzitu zvuku také logaritmicky. [3] [7]



Obr. 2. 3.: Neinvertující zapojení operačního zesilovače s regulací vstupního signálu

Pro neinvertující zapojení operačního zesilovače platí vztah:

$$u_2 = u_1 * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$A_U = \frac{u_2}{u_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

[3] [7]

3. Digitální a analogové systémy

Je třeba říci, že nejvhodnější zařízení pro hudební aplikace a především pro zařízení, které pracují se zvukem elektrické kytary, by měly být zcela analogové. Každý zkušenější hudebník většinou hledá kvalitní zvuk, sice co se z historického hlediska týče v zastaralé, ale kvalitní elektronice, která využívá pro zpracování signálu především elektronek. V současné době se od těchto obvodů opouští při tvorbě efektových modulů a zpracovávají se digitální technologií. Digitální zpracování efektových modulů přináší větší možnosti integrace, ale konstruktéři se ve většině případů snaží napodobovat chování digitálních efektů a snaží se přibližovat charakterům zvuku analogových elektronkových předzesilovačů a efektů.

Od mého vedoucího práce jsem dostal na výběr mezi digitálními obvody, které jsou specializované pro tento druh aplikací a v praxi se používají. Je to obvod od firmy Spin Semiconductor mikroprocesor FV-1 Reverb a mikroprocesor DSP-1K Audio procesor od firmy Wavefront Semiconductor.

3.1. DSP procesor FV-1 Reverb

Digitální signálový procesor FV-1 Reverb od firmy Spin Semiconductor je kompletní řešení zpracování signálu v jednom integrovaném obvodu. K dispozici jsou dva A/D a D/A převodníky a s obvodem může být zacházeno ve zpracovávajícím řetězci jako s kterýmkoliv jiným analogovým obvodem. Přístup je k šestnácti programům, z toho osm je uloženo přímo v ROM paměti v integrovaném obvodu a projektant může využít externí EEPROM. Se třemi vstupy potenciometrů mohou parametry programu proměnných pracovat v reálném čase. Potenciometry se mohou nastavit parametry jako rozklad času v dozvuku, hloubka efektu, rychlost dozvuku a další možnosti závislé na typu použitého efektu. Tyto vstupy jsou k dispozici jako koeficienty programu a mohou být použity nezávisle na sobě. Bohatá sada instrukcí umožňuje uživatelům programovat efekty všeho druhu. S pokyny jako LOG a EXP, mohou uživatelé snadno programovat audio expanzní nebo rutinní komprese. Integrované digitální LFO(nízkofrekvenční generátor) a rampa generátory umožňují programování efektů typu chorus, flanger nebo pitch shift. [4]

3.2. DSP-1K Audio procesor

DSP-1K Audio procesor od firmy Wavefront Semiconductor je rychlý signálový procesor s nízkou spotřebou energie optimalizovaný pro filtrování signálu, ekvalizaci a pro dynamické zpracování signálů. Velká délka slova zaručuje jednoduchou a přesnou tvorbu algoritmů pro audio signály a jiné dynamické aplikace, které vyžadují vysoký dynamický rozsah. Mikroprocesor umožňuje díky integrovanému regulátoru pracovat na napájecím napětí 3.3V nebo 5V. DSP-1KM podporuje tři způsoby ovládání rozhraní: sériové a paralelní s hostitelským mikroprocesorem nebo režim „stand-alone“ automatického čtení ze sériové paměti PROM. Umožňuje také čtení a zápis vnitřních instrukcí na paměť RAM, datovou paměť RAM a čtení a zápis do univerzálních registrů. Mikroprocesor disponuje čtyřmi vstupy a čtyřmi výstupy. Každý výstupní a vstupní obvod zahrnuje také tzv. „peak-meter“(měřič špičkového napětí), ze kterého lze číst a dále lze tyto data zpracovávat. Výběr údajů, které budou čteny nebo zapsány se provádí kombinací adresy a nastavení řídicích instrukcí. [8]

3.3. Rozhodnutí o výsledném obvodu

Závěrem lze říci, že nejlepším řešením je použít obvod smíšený s analogovými i digitálními obvody, protože uživatel požaduje co největší kvality a změny parametrů

v reálném čase. S operacemi se signálem je všestrannější digitální obvod, který je možno kdykoli přeprogramovat. Použití analogových obvodů by efekt byl oproti digitálním obvodům pevně daný a tudíž statický bez možností rozsáhlejších úprav či kompletnímu představení.

Z tohoto důvodu lépe vychází obvod společnosti Spin Semiconductor FV-1 Reverb. Disponuje A/D a D/A převodníky a proměnnými vstupy, které lze ovládat v reálném čase. Použití analogových potenciometrů je velice důmyslné a daleko přesnější než digitální imitace těchto prvků. Samozřejmě velikou předností je i využití externí paměti EEPROM, která odstraňuje nutnost programovat mikroprocesor a tudíž odpadá potřeba speciálních zařízení pro tento mikroprocesor, protože na programování paměti EEPROM postačí jednoduché a levné vybavení. Mikroprocesor od firmy Wavefront Semiconductor disponuje čtyřmi vstupy a čtyřmi výstupy, které by v této práci pravděpodobně nebyly využity. Mikroprocesor FV-1 Reverb je přeci jen navrhnout pro přesně tento druh aplikací a lze předpokládat, že výsledný efekt bude kvalitnější.

4. DSP procesory

Jestli je možné označit jeden z obvodů v této práci za nejdůležitější, budeme se bavit právě o DSP procesoru. DSP procesor má za úkol modulovat vstupní signál podle požadovaných způsobů, které byly popsány v kapitole „Audio efekty“. [2]

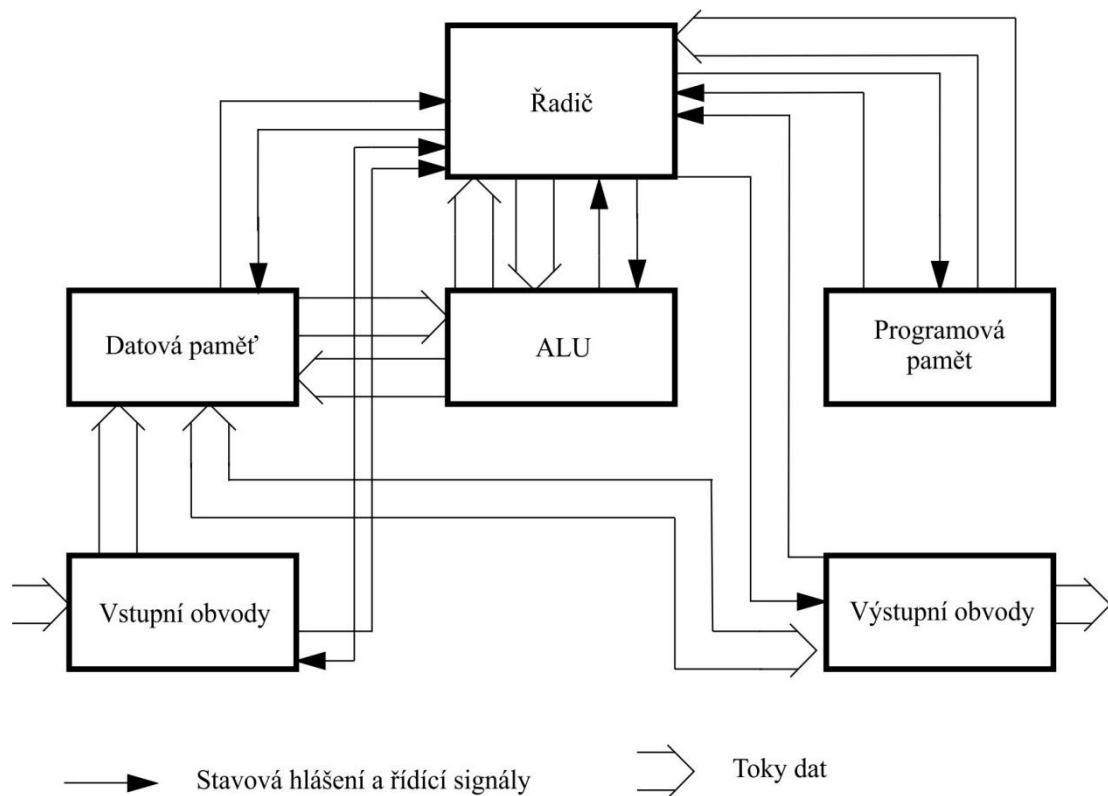
Digitální signálové procesory jsou specializované pro práci s analogovými signály. Jedním z hlavních důvodů k vytvoření a používání DSP procesorů je fakt, že analogové obvody, které jsou schopny zpracovat signál, jsou výrazně složitější na zpracování z hlediska návrhu, nastavení a provedení. Nejvýraznější výhodou DSP procesorů je jejich jednoduché představení a možnost různých i rozsáhlejších modifikací, což u analogových obvodů lze provést jen velmi těžko. Z ekonomického hlediska můžeme i přihlédnout k cenám DSP procesorům a možnostem integrace dalších obvodů přímo na čip procesoru. [2]

4.1. Architektura DSP procesorů

Digitální signálové procesory využívají zejména předlohu Harvardské architektury. Harvardská architektura využívá fyzického rozdělení datové a programové paměti. Je tedy nutné zavést samostatnou sběrnici pro data a samostatnou sběrnici pro paměť programu oproti rozšířené architektuře Von Neumana, která využívá jednu sběrnici, na které procesor

komunikuje s pamětí programu a pamětí dat. To zaručuje rychlejší komunikaci a je tudíž vhodnější pro aplikace, které vyžadují operace v reálném čase. Paměti mohou být naprosto odlišné, mohou mít různou délku slova, časování, technologii a způsob adresování. [2]

Z pohledu rychlosti mikroprocesorů se jejich výkon v posledních letech zněkolikanásobil v poměru k rychlosti přístupové doby hlavní paměti. Je tedy tendence redukovat počet přístupů do hlavní paměti. Řešením je paměť s velmi krátkou přístupovou dobou zvaná cache. S větší rychlostí paměti cache se však snižuje i její kapacita, takže kvantum informací, které pojme, je výrazně méně než v paměti hlavní. [2]



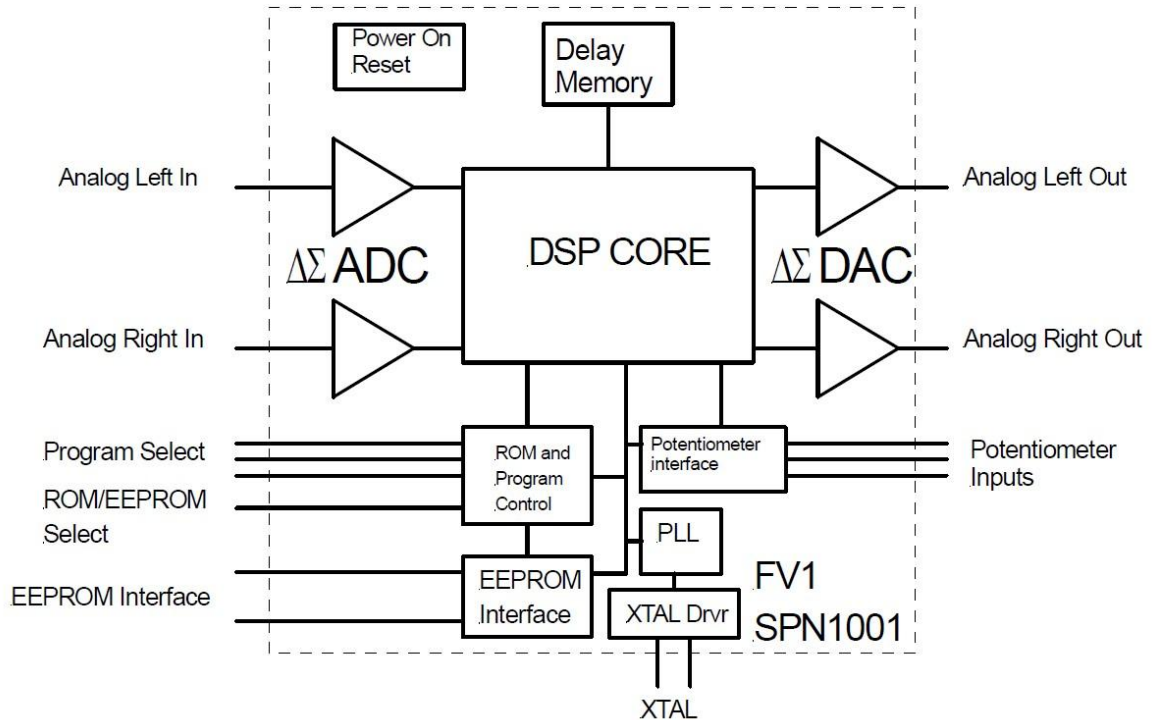
Obr. 4. 1.: Blokové schéma Harvardské architektury

4.2. Vlastnosti FV-1 Reverb a obvodové řešení

Jak už bylo řečeno procesor FV-1 Reverb je produktem firmy Spin Semiconductor. Jako jeden z mnoha signálových procesorů je založen na Harvardské architektuře a je tedy schopný provádět výpočetní operace rychleji. Jádro DSP FV-1 poskytuje mnoho pokročilých funkcí a instrukcí, které umožňují vytvořit pokročilé programy. Jádro se skládá z MAC/ALU jednotky, kde jsou logaritmické a exponenciální funkce uskutečněné bloky LOG a EXP. Na obr. 3. 3. 2. si můžeme povšimnout, že funkce LOG a EXP nejsou součástí ALU. Tato struktura, kdy složité aritmetické operace jsou konstruovány mimo ALU, umožňuje výpočet složitých operací bez asistence ALU. Výsledkem je zvýšení

výkonnosti mikropočítače. Jádro mikroprocesoru má k dispozici 32 bank registrů oddělené od zpoždovací paměti RAM, nízkofrekvenčního oscilátoru (LFO) a ramp generátorů, které mohou nahradit adresování paměti. [4]

Pozn.: Ramp generátor je funkční generátor, který dokáže zvýšit úroveň výstupního napětí.

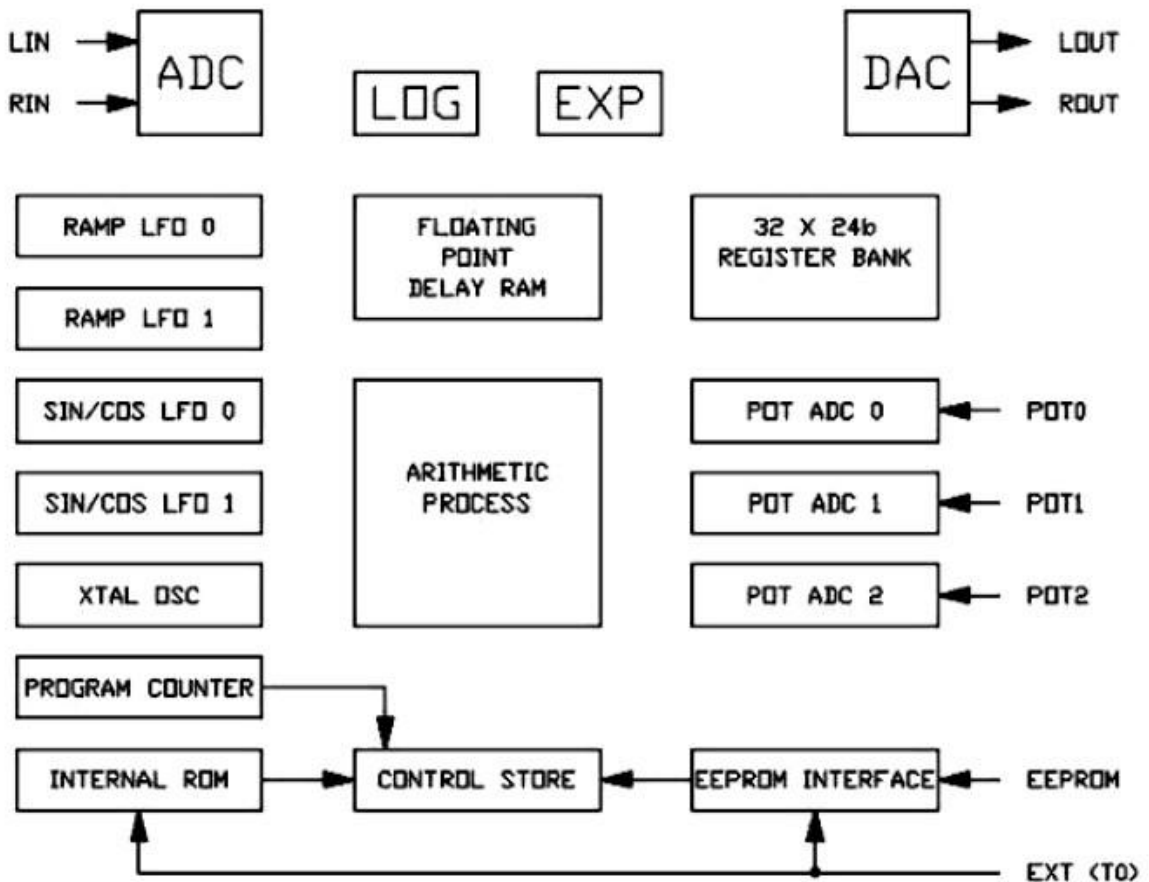


Obr. 4. 2.: Vnitřní struktura rozhraní FV-1 Reverb

4.2.1. Aritmeticko-logická jednotka (ALU)

Už z názvu bloku je parné, že se stará o většinu aritmetických a logických operací jako je součet, rozdíl, součin, podíl, negace a mnoho dalších. Nemá však za úkol složitější operace jako logaritmické a exponenciální funkce, které mají na starost samostatné bloky LOG a EXP. Tomuto bloku se obecně říká MAC jednotka (multiply and accumulate). Tento obvod nepatří sice do obvodů ALU, ale jsou jeho součástí. Výsledky těchto operací jsou ukládány do speciálního akumulátoru, kde jsou k dispozici pro další zpracování. ALU je srdcem celého mikročipu, která má přístup k datům A/D převodníku, zpoždovací paměti RAM, bankám registrů, k rozhraní vstupů potenciometru a blokům LFO. Stará se také o dodávání dat výstupnímu převodníku D/A, zapisovat do paměti a do bloků LFO. Pro své operace má k dispozici 32 registrů o délce slova 24 bitů. Registry jsou výhodné v případech, kdy ALU potřebuje data jen krátkodobě uložit. Přístupová doba k registrům je totiž výrazně kratší, než při zapisování a čtení z RAM paměti. ALU je řízena především

z vnitřní paměti ROM nebo z externí EEPROM paměti. Mezi těmito dvěma přístupy rozhoduje operátor (uživatel, hudebník). [2] [4]



Obr. 4.2.1. : Vnitřní struktura procesoru FV-1 Reverb

4.2.2. Vstupní a výstupní obvody

Vstupní a výstupní zpracování analogových signálů (na Obr. 3. 3. 1. DAC a ADC) mají na starosti dva 24 bitové převodníky A/D. Veškeré zpracování se provádí ve 24-bitovém lineárním formátu, to znamená, že kvantizační hladiny mají mezi sebou konstantní rozdíl napětí. Počet kvantizačních hladin lze spočítat z jednoduchého vzorce $X = 2^n$, kde n udává počet bitů A/D převodníku. Kvantizačních hladin je tedy $2^{24} = 16\,777\,216$. Při maximálním rozkmitu vstupního signálu (6 V) je rozdíl mezi hladinami $35,76\mu\text{V}$. Podle datasheetu je před vstup LIN a RIN sériově zapojen kondenzátor $1\mu\text{F}$, pro oddělení stejnosměrné složky a rezistor $1\text{k}\Omega$, který omezuje vstupní proud do A/D. Za vstupní D/A převodník je zapojen filtr typu horní propust, který odděluje frekvence nižší než 5Hz (frekvence LFO) a filtr dolní propust se zlomovou frekvencí $f_z = 72\,343\text{ Hz}$, který odděluje od signálu vysoké frekvenční složky (tzv. kvantizační šum), který byl způsoben digitálním zpracováním signálu. [2] [4]

Rozhraní vstupních analogových signálů od potenciometrů pracuje na 9-bitovém A/D převodníku. Kvantizačních hladin, zde to znamená počet možných hodnot na vstupu, je $x_p = 2^9$ a tedy každým potenciometrem lze nastavit 512 možných hodnot. Napěťový rozdíl kvantizačních hladin není podstatný. [4]

Výběr efektů je z katalogového listu navrhnout třemi klasickými spínači, je tedy možné 2^3 kombinací, tedy výběr jednoho z osmi efektů. Toto řešení výběru je však nepraktické, protože při přechodu z vybraného efektu číslo osm na efekt číslo jedna, by uživatel musel sešlápnout všechny tři tlačítka a nemohl by se plně soustředit na hru. Zvolil jsem tedy řešení, kdy každému efektu bude přidělena priorita podle toho, jak je efekt často používán. Například s efektem reverb se většinou hrají doprovodné party a je využíván tedy častěji než efekty flanger nebo chorus, které použije kytarista při melodických linkách nebo přímo v sólové hře, takže těm bude přiřazena vyšší priorita. Reverb tedy může být zapnutý prakticky pořád, ale v okamžiku sóla bude stačit hudebníkovi jedno sešlápnutí tlačítka, při změně z doprovodu na sólo a naopak. Tento princip v obvodu realizuje prioritní kodér s označením SN54HC148. [5]

Prioritní kodér je číslicový obvod, který má 2^n vstupů a n výstupů. Podle toho, jaký vstup s největší prioritou je aktivní, obvod nastaví výstupní bity. Pro přehled kombinací je uvedena na tab. 4. 2. 2. funkční tabulkou. Vstupy jsou aktivní při úrovni logické nuly, z tabulky je tedy zřejmé, že nejvyšší prioritu má vstup číslo sedm a výstupní kombinace je 000, nejnižší priorita je přiřazena vstupu nula a výstupní kombinací je 111. Bit EI (Eneable Input) určuje, zda se vstupními bity pracuje, takže při EI roven logické 1 nezáleží na kombinaci s vstupními bity a obvod generuje na výstupu kombinaci 111. [5]

INPUTS									OUTPUTS				
EI	0	1	2	3	4	5	6	7	A2	A1	A0	GS	EO
H	X	X	X	X	X	X	X	X	H	H	H	H	H
L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L
L	X	X	X	X	X	X	X	L	L	L	L	L	H
L	X	X	X	X	X	X	L	H	L	L	H	L	H
L	X	X	X	X	X	L	H	H	L	H	L	L	H
L	X	X	X	L	H	H	H	H	H	L	L	L	H
L	X	X	L	H	H	H	H	H	H	L	H	L	H
L	X	L	H	H	H	H	H	H	H	H	L	L	H
L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H

Tab. 4. 2. 2.: Funkční tabulka prioritního kodéru SN54HC148 [5]

4.2.3. Counter store

Blok counter store obsahuje vždy jeden z osmi programů uložených ve vnitřní paměti ROM nebo v externí paměti EEPROM. Každá instrukce má šířku slova 32 bitů. Každá instrukce obsahuje adresu v paměti, koeficienty a řídicí informace podle požadavků konkrétního pokynu. Instrukce také mohou současně zahrnovat několik operací. Z tohoto důvodu je mikroprocesor FV-1 velmi výkonným a efektivním zařízením oproti ostatním DSP. [4]

4.2.4. Zpožd'ovací paměť RAM

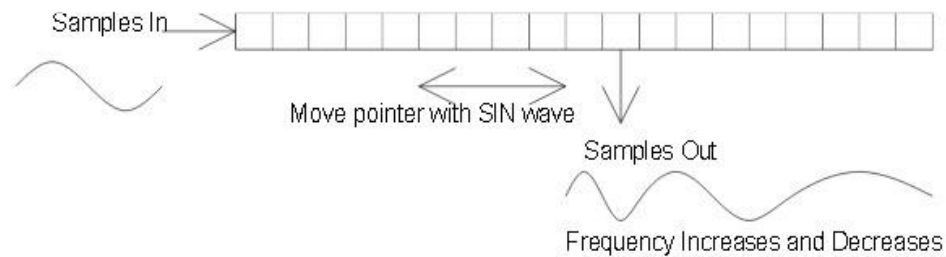
Signály jsou zpožd'ovány ve zpožd'ovací paměti RAM s plovoucí čárkou, pro větší efektivitu. Adresa pro zpožd'ovací paměť se vypočítá z počítadla vzorků a relativní adresy, která je dodávána instrukcí programu nebo přímo z LFO generátoru spojené s patřičnými instrukcemi. To umožňuje ukazatelům, které přistupují k datům v rámci RAM, se automaticky dekrementovat v každém cyklu. Speciální instrukce ke skokům na každý prvek zpožd'ovací paměti v každém kroku tudíž není nutný. [4]

4.2.5. SIN LFO

Základem pro modulační efekty jako jsou chorus nebo flanger je LFO. Účelem nízkofrekvenčních generátorů je modulovat ukazatel ve zpožd'ovací paměti RAM nahoru nebo dolů a tím dosáhnout efektů jako je chorus nebo pitch shift. FV-1 Reverb je vybaven dvěma sinusovými generátory a dvěma generátory ramp. [4]

Budeme-li chtít vytvořit efekt typu chorus, využijeme sinusového generátoru. Jak je popsáno v teorii efektů, chorus doplňuje vstupní signál o signál zpožděný a mírně frekvenčně posunutý (rozladěný). Využijeme ukazatelů ve zpožd'ovací paměti. Kdybychom ukazatel ve zpožd'ovací paměti nijak nemodulovali, získali bychom jen zpožděnou kopii původního a zpoždění by záviselo na počtu vzorků mezi vstupem a ukazatelem. V případě že se budeme s každým taktem přibližovat ke vstupním vzorkům (ukazatel musí přeskočit nějaké vzorky v paměti), bude se výstupnímu signálu zvyšovat frekvence. V opačném případě, kdy se ukazatel pohybuje v paměti směrem od vstupních vzorků, by se výstupní frekvence signálu prodlužovala, protože bychom jednotlivé vzorky přečetli více než jednou. Sinusový generátor řídí tyto dva pohyby ukazatele v paměti nahoru a dolů, které jsou závislé na frekvenci LFO. Při sejmutí výstupního průběhu osciloskopem bychom viděli, že původní signál zvyšuje svou frekvenci v první půlperiodě

LFO a v druhé části periody svou frekvenci snižuje. Velikost kroku ukazatele je závislé na amplitudě LFO, tím pádem musí být splněna podmínka, kdy amplituda generátoru nesmí přesáhnout velikost adresového prostoru RAM paměti. Pro příklad když amplituda generátoru se bude pohybovat v rozmezí +/- 1024, musí být velikost zpoždovací paměti větší než 2048 a ukazatel by měl při prvním taktu umístěn uprostřed zpoždovací paměti. [4]



Obr. 4. 2. 5: Pohyb ukazatele v závislosti na SIN LFO

Je zde malý zbývající problém a to, jak řešit skutečnost, že obvykle nebude modulovaný ukazatel odskakovat o celý počet vzorků. To znamená, že budeme chtít interpolovat mezi sousedními body ke generování chorusového výstupu. Můžeme si pomoci výstupem SIN generátoru, kdy jeho nižší bity předáme na adresu ukazatele a můžeme tyto bity použít jako interpolační koeficient. Lineární interpolace má vztah:

$$\text{Vzorek}[N] * (K-1) + \text{Vzorek}[N + 1] * K$$

K je nižší hodnota výstupu SIN generátoru a je považována za nižší nebo rovna jedné. Rovnice pro výpočet koeficientu pro konkrétní frekvence LFO pro SIN generátor s použitím instrukce WLDS je:

$$K_f = 2^{17} * \frac{2 * \pi * f}{R}$$

f – frekvence LFO

R – vzorkovací frekvence

Pro frekvenční rozsah 0 – 20 kHz při vzorkovací frekvenci 32,768 kHz nabývá K_f hodnot od 0 do 511. Rovnice pro výpočet koeficientu amplitudy pro dané zpoždění s využitím příkazu WLDS je:

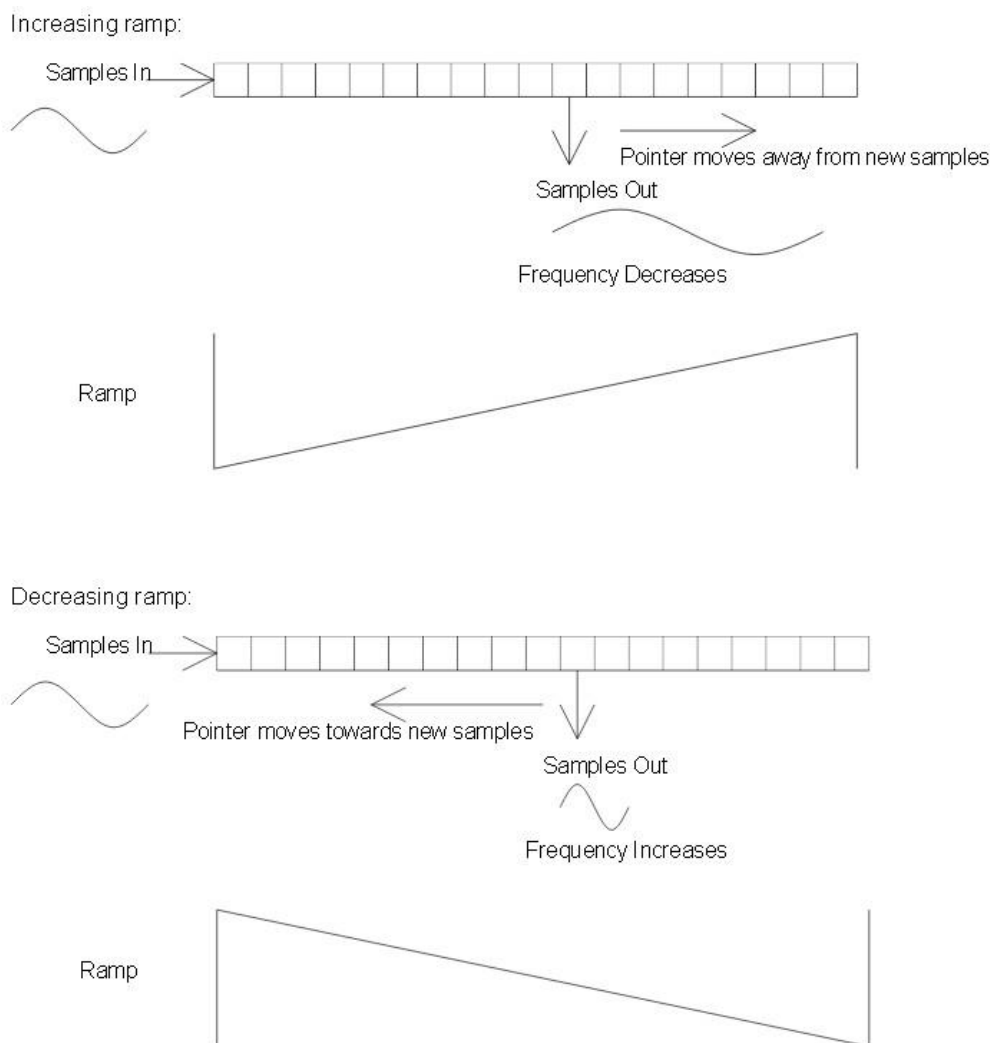
$$K_a = \frac{N * 32768}{16385}$$

N – délka zpoždění v počtu vzorků

[4]

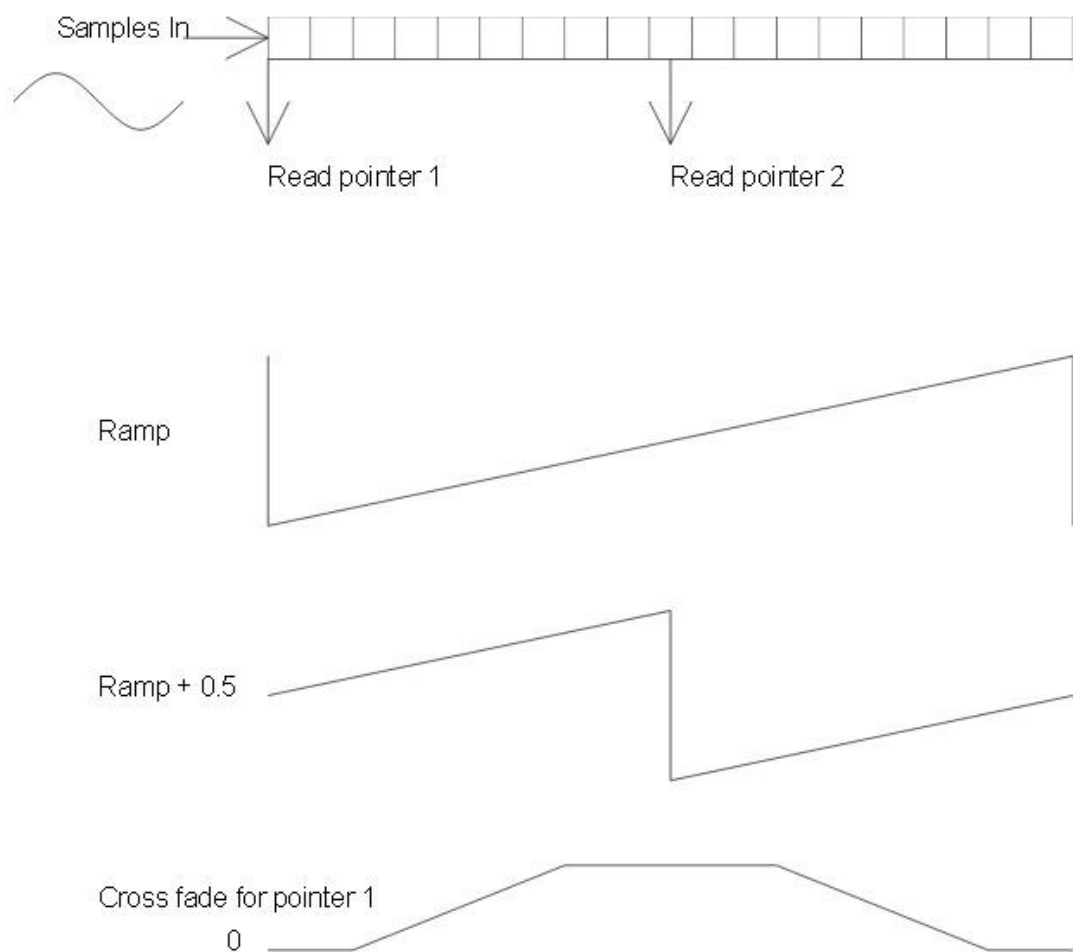
4.2.6. RAMP LFO

Generátory RAMP LFO jsou zejména využívány při programování efektů typu pitch shift při zvyšování i snižování frekvence. Jak bylo řečeno v předchozí kapitole, když se ukazatel pohybuje směrem ke vstupním vzorkům nebo od nich, má to vliv na výstupní frekvenci signálu. Problém je ten, že ukazatel by odskakoval tak dlouho, až by nedorazil na jeden konec paměti. Potřebovali bychom tedy, aby věděl, že je na jednom z konců paměti, vrátil se a pokračoval znovu v původní činnosti. RAMP generátor je narozdíl od SIN LFO vždy pozitivní a nabývá hodnot od nuly do svého vybraného maxima 4095, 2047, 1023 nebo 511, takže přidává offset k výchozí adrese ukazatele zpoždovací paměti. Při zvyšování RAMP generátoru se tedy ukazatel pohybuje směrem od přicházejících vzorků a výsledný efekt je tedy snižování frekvence (pitch down) a při pohybu ukazatele opačným směrem, tedy k přicházejícím vzorkům, je frekvence zvyšována (pitch up). [4]



Obr. 4. 2. 6a: Pohyb ukazatele zpoždovací paměti v závislosti na RAMP LFO

I přesto, že se tento způsob generování vlny používá pro efekty pitch shift a podobné, je výhodné využít dvou ukazatelů, protože při posunu ukazatele z jednoho konce paměti na druhý, můžeme slyšet diskontinuitu „cvaknutí“. Princip použití dvou ukazatelů spočívá v jejich vzájemném posunu o poloviční počet vzorků (například pitch shift down bude generován odstupem 1024 vzorků, tak mezi ukazateli bude při každém cyklu rozestup 512 vzorků) a čtení ukazatele, který je nejbližší středu paměti, čili nejdále od jednoho z konců paměti. To však sebou nese podobný problém při přeskokování z jednoho ukazatele na druhý, takže bychom chtěli, aby byl přechod mezi jednotlivými ukazateli plynulý. RAMP generátor může poskytnout oba ukazatele a cross-fade koeficienty pro přechod mezi ukazateli. Představíme-li si, že RAMP LFO jde od nuly do 1.0, vrátí se zpět na počátek a znovu jde od nuly, jako například 0...0.1...0.2... a tak dále až do 0.9...1.0...0...0.1, pak můžeme vytvořit druhý ukazatel pouhým přidáním 0.5 k aktuálnímu ukazateli. Cross-fade koeficient lze odvodit z jedné pozice ukazatele ve zpoždovací paměti, kdy na koncích paměti nabývá hodnoty 0 a uprostřed 1. [4]



Obr. 4. 2. 6b.: RAMP generátor a cross-fade koeficient

Jak je vidět z obrázku 4. 2. 6b., je čtecí ukazatel č. 1 na konci zpoždovací paměti resp. na začátku (ukazatel přechází z jednoho konce paměti na druhý čili 1.0...0) a čtecí ukazatel č. 2 uprostřed paměti. Koeficient k použití druhého ukazatele je 1. Nyní může nastat podobný problém jako u SIN LFO, že ukazatel nebude odkazovat na celý vzorek, takže je nutné opět zavést interpolační vztah. Opět jako u SIN LFO použijeme část bitů pro určení offsetu adresy. Interpolujeme nejprve ukazatele č. 1, k ukazateli č. 2 přičteme poloviční počet vzorků (rozdíl mezi ukazateli) a také ho lineárně interpolujeme a následně využijeme cross-fade koeficient k představení ze čtení na zápis a naopak.

Výpočet koeficientu pro pitch up :

$$C = 2^{14} * (2^N - 1)$$

a pro koeficient pro pitch down:

$$C = 2^{14} * (1 - 2^{-N})$$

N – požadovaný rozsah pitch shift [4]

5. Struktura programu pro FV-1

Pro programování DSP procesoru FV-1 Reverb vyvinula firma Spin Semiconductor vlastní freeware software s názvem SpinAsm, kde programátor má možnost přiřadit jednotlivým programům pořadí v jakém budou uloženy, odpadá tím starost s částí ručně psaného programu, a samozřejmě je i generování souborů *.hex. Vývojové prostředí je tedy volně přístupné na webových stránkách společnosti Spin Semiconductor společně s kompletní sadou osmi programů včetně souboru *.hex. Mimo tohoto balíčku jsou přístupné i jednotlivé vylepšení základních algoritmů nebo základy pro tvorbu nových algoritmů, jako například ekvalizace zvuku nebo aktivní výhybka pro reproduktory. [4]

5.1. Hlavička a první kroky

Prvním krokem v psaní programu je vhodné začínat deklarováním paměti a konstant. Deklarování paměti je sice možné téměř v jakémkoliv místě programu, avšak umístěním hned na začátku umožňuje programátorovi se lépe orientovat a monitorovat různé nežádoucí konflikty. Deklarování konstant značně ulehčí programátorovi psaní programu, protože může využívat odkazů na deklarované konstanty v rámci celého programu a program bude přehlednější. Jednorázové nastavení, jako je povolování činnosti LFO nebo vymazání obsahu registrů, by mělo být prováděno před prací s jednotlivými

bloky a logicky by to měly být jedny z prvních příkazů v programu za deklarováním paměti a konstant. Jména jednotlivých konstant jsou omezená jmény, která již jsou přednastaveny pro názvy registrů, potenciometrů apod. Pro přehlednost v programu je možné jako v klasickém assembleru vložit komentář, kde začátek komentáře vždy začíná středníkem. Není nutné zavádět prohlášení konce nebo jiné identifikátory konce programu. Všechna klíčová slova, operační kódy nejsou citlivá na velká a malá písmena, obvykle se vše píše malým písmem a velkým písmem jsou psány důležité komentáře. [4]

5.2. Tělo programu

Tělo programu (body code) závisí především na typu efektu, který se snaží programátor napsat. Vývojový diagram bude tedy pro každý program relativně individuální. V programovacím jazyku spin-assembler se používá především tříoperandových instrukcí, jako například: sečti obsah reg0 s obsahem reg1 a výsledek ulož do akumulátoru. Používání těchto jednoduchých instrukcí sice zvyšuje složitost programu, ale zvyšuje také rychlost programu, protože ALU není zatížena složitými výpočty. [4]

Jelikož FV-1 Reverb má k dispozici vstupy pro dva analogové a vstupy pro dva analogové výstupy, bylo by namísto prvními instrukcemi říci s jakými vstupy (levý nebo pravý) bude pracovat a také v jakém poměru. Zcela jednoznačně můžeme říci, že každý program bude chtít uživatel ovládat, a proto se nechá považovat za nutnost v každém programu nastavení potenciometrů. Potenciometry mají reálně lineární průběh, který však není vždy zcela vhodný pro ovládání jednotlivých funkcí, ale lze ho programově upravit, abychom dosáhli průběhu pro program potřebný. Část programu věnovaná práci s potenciometry záleží na typu efektu. Například u efektu delay bude programátor pracovat s potenciometrem hned na začátku programu, kdy bude zjišťovat, jakou hodnotu zpoždění uživatel nastavil a bude pracovat s hodnotou dalšího potenciometru, ale až na konci kdy bude chtít vědět poměr vstupního a zpožděného signálu. V dalším bloku se pravděpodobně bude pracovat s LFO. Podle potenciometru určí frekvenci LFO a může určovat výchozí pozici ukazatele zpožďovací paměti. Pak bude zřejmě následovat čtení ze zpožďovací paměti a v případě programování více efektů následuje jejich sloučení a zapsání do registru D/A převodníku. [4]

5.3. Základní instrukce SpinAsm

V programovacím jazyku pro FV-1 Reverb od firmy Spin Semiconductor je k dispozici 28 instrukcí. Instrukce nesmí být příliš dlouhé, aby ALU nebyla zatěžována složitými a zdoluhavými výpočty, proto jsou instrukce tří operandové, tedy zpracují obsah první jednotky s druhou jednotkou (registry) a uloží do třetí (zpravidla do akumulátoru ACC). Nemá smysl zde rozepisovat každou instrukci, a tak se zmíním pouze o instrukcích, které se používají téměř v každém programu. [4]

- **equ**
přiřazení jména registrům
používá se pro odkazování na registry pro lepší přehlednost
syntaxe: equ jméno jméno_registru
- **mem**
definuje délku zpoždovací paměti
syntaxe: mem jméno_oddílu_paměti počet_vzorků_v_paměti
- **rdax**
přečte obsah registru, vynásobí koeficientem x a přičte k hodnotě ACC
syntaxe: rdax jméno_registru, x
- **wrax**
zapiše do registru obsah ACC a vynásobí akumulátor koeficientem x
syntaxe: wrax jméno_registru, x
- **wra**
zapiše hodnotu akumulátoru do zpoždovací paměti a vynásobí ACC koeficientem x
syntaxe: wra definovaná_paměť, x
- **wlds**
načítání LFO
syntaxe: wlds jméno_generátoru, frekvence, amplituda
pozn.: Jména generátorů jsou již předdefinovaná (sin0, sin1, rmp0 a rmp1).
Hodnota frekvence je číslo o devíti bitech a amplituda hodnota o patnácti bitech.
- **rdfx**
odečte obsah registru od obsahu ACC, k výsledku přičte koeficient x a zapiše do ACC
syntaxe: rdfx jméno_registru, x

- **mulx**
vynásobí obsah ACC a registru a zapíše do ACC
syntaxe: mulx jméno_registru
- **rmpa**
přečte hodnotu zpoždovací paměti na základě ukazatele, vynásobí x a přičte k ACC
syntaxe: rmpa x
- **sof**
vynásobí obsah akumulátoru x a přičtou k výsledku konstantu K a uloží do ACC
syntaxe: sof x, K
- **skp**
přeskočí se N instrukcí, pokud je splněna podmínka
syntaxe: skp podmínka, počet_instrukcí
pozn.: podmínky jsou předdefinovány
- **kódy podmínek pro příkaz skp**
run – akceptuje příkaz skp pouze při prvním cyklu programu
zro – obsah akumulátoru je roven nule
neg – obsah ACC je záporný
gez – pokud je obsah ACC větší nebo roven nule

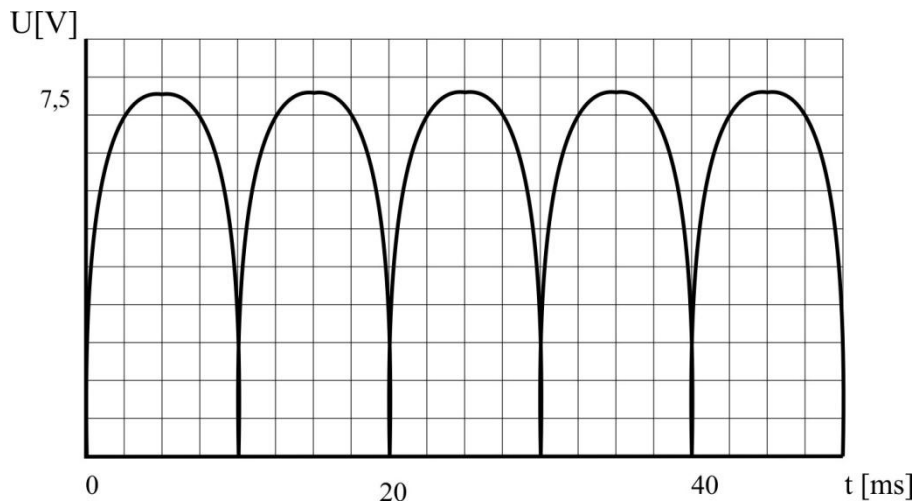
[4]

6. Napájecí zdroj

Napájecí zdroj je určen k napájení z běžné rozvodné sítě střídavého napětí o frekvenci 50 Hz a napětí 230V. Deska efektového modulu požaduje napájení stejnosměrným napětím ± 5 V pro analogový systém, tedy operační zesilovače, a stejnosměrné napětí +3.3 V pro digitální obvody, tedy procesor, prioritní kodér a paměť EEPROM.

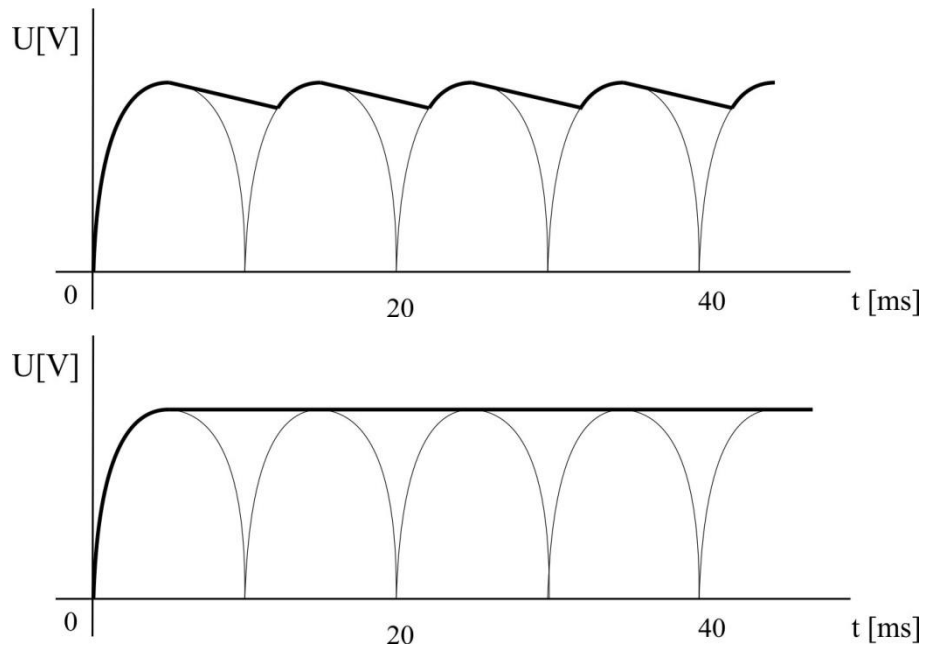
Prvním článkem v obvodu je transformátor EI 38. EI znamená, že jádro transformátoru je složeno z plechů ve tvaru E a I. Výkon použitého transformátoru je 4,5 VA. Proto, abychom dosáhli symetrického napájení analogových obvodů ± 5 V, jsou sekundární vinutí dvě. Na výstup transformátoru je zapojen diodový můstkový usměrňovač tzv. Graetzův můstek. Toto zapojení využívá dvou párů usměrňovacích diod, přičemž každý pár pracuje vždy v jedné půllně v propustném a druhý pár v závěrném směru, tím

využíváme všechnu energii ze síťového rozvodu. Průběh napětí na výstupu Graetzovo můstku můžeme vidět na Obr. 6a.



Obr. 6a.: Usměrněné napětí Graetzovým můstkem

Je na první pohled jasné, že takový průběh, kdy napětí kolísá mezi 0 V a 7,5 V, není dostačující. Obvody by kolem poloviny periody přestávaly pracovat. Za můstkem jsou stabilizátory napětí. Integrovaný obvod 7805 pro kladné napětí a 7905 pro záporné napětí. Mezi stabilizátory a Graetzovým můstkem je umístěn filtr tvořený sítí kondenzátorů o relativně velké kapacitě, která akumulují energii pro stabilizátory. V první části půlperiody vzrůstá na můstku napětí a kondenzátor se nabíjí a akumuluje energii. V druhé části půlperiody napětí na můstku klesá a kondenzátor se začíná vybíjet. Nyní tedy předává svou energii stabilizátorům napětí, které kolísající napětí na kondenzátorové síti vyhladí do konstantního průběhu. Na Obr. 6b. je znázorněn průběh na kondenzátorové síti a následně na stabilizátoru napětí. O konstantní napětí 3.3 V, kterým jsou napájeny digitální obvody, se stará obvod LF33CV. U stabilizátorů jsou umístěny kondenzátory na vstupní a výstupní svorky o kapacitě 10 nF. Tyto kondenzátory musí být umístěny co nejbližší k integrovanému obvodu a má za úkol poskytnout stabilizátoru energii v momentu, kdy dojde v napájeném obvodu k proudovým špičkám a hrozí zakolísání stabilizovaného napětí. Do obvodu je ještě zařazena LED dioda, která je určena k indikaci napětí na stabilizátoru 7805 a 7905. Zhasnutá LED tedy indikuje poruchu.



Obr. 6b.: Průběh výše znázorňuje napětí na filtračních kondenzátorech, další průběh je napětí na výstupu stabilizátorů

7. Porovnání s elektronikou dostupnou na trhu

Pro porovnání výsledného zvuku jsem měl k dispozici dva efekty typu delay.

První efekt byl od firmy Electro-Harmonix s označením Memory Toy, který zastupoval analogové zpracování efektů. K jeho ovládání jsou k dispozici tři potenciometry: Delay, Feedback a Mix. Jako spěšření je zaveden spínač pro chorusovou modulaci. Je velkou nevýhodou, že chorusová modulace se nedá nijak ovládat a je tak značně jednoduchá. To je dáno tím, že efekt je analogově zpracovaný a nebylo tak tolik prostoru pro realizaci modulace ve větším rozsahu, jako by to mohlo být u digitálních systémů. S porovnáním kvality efektu delay je srovnatelný se zpracováním této práce a není velký znatelný rozdíl mezi poslechem.

Můžeme tedy považovat výsledný zpracovaný modul za velmi uspokojivý, protože dosažení čistého, nezašuměného a především realistického zvuku bylo cílem této práce. V porovnání s analogovým systémem, bylo také dokázáno, že digitální systém umožňuje mnohem větších modifikací, které jsou u analogových systému téměř nemožné nebo jsou velmi omezené.

Druhým efektem je delay / reverb od firmy Behringer s označením DR400. Efekt je zpracovaný digitálně a umožňuje použít modul jako delay nebo reverb nebo použít tyto dva efekty současně. Produkty firmy Behringer jsou určeny spíše začínajícím hudebníkům, a porovnání této práce je porovnáno s nižší kategorií efektových modulů. Nicméně v při

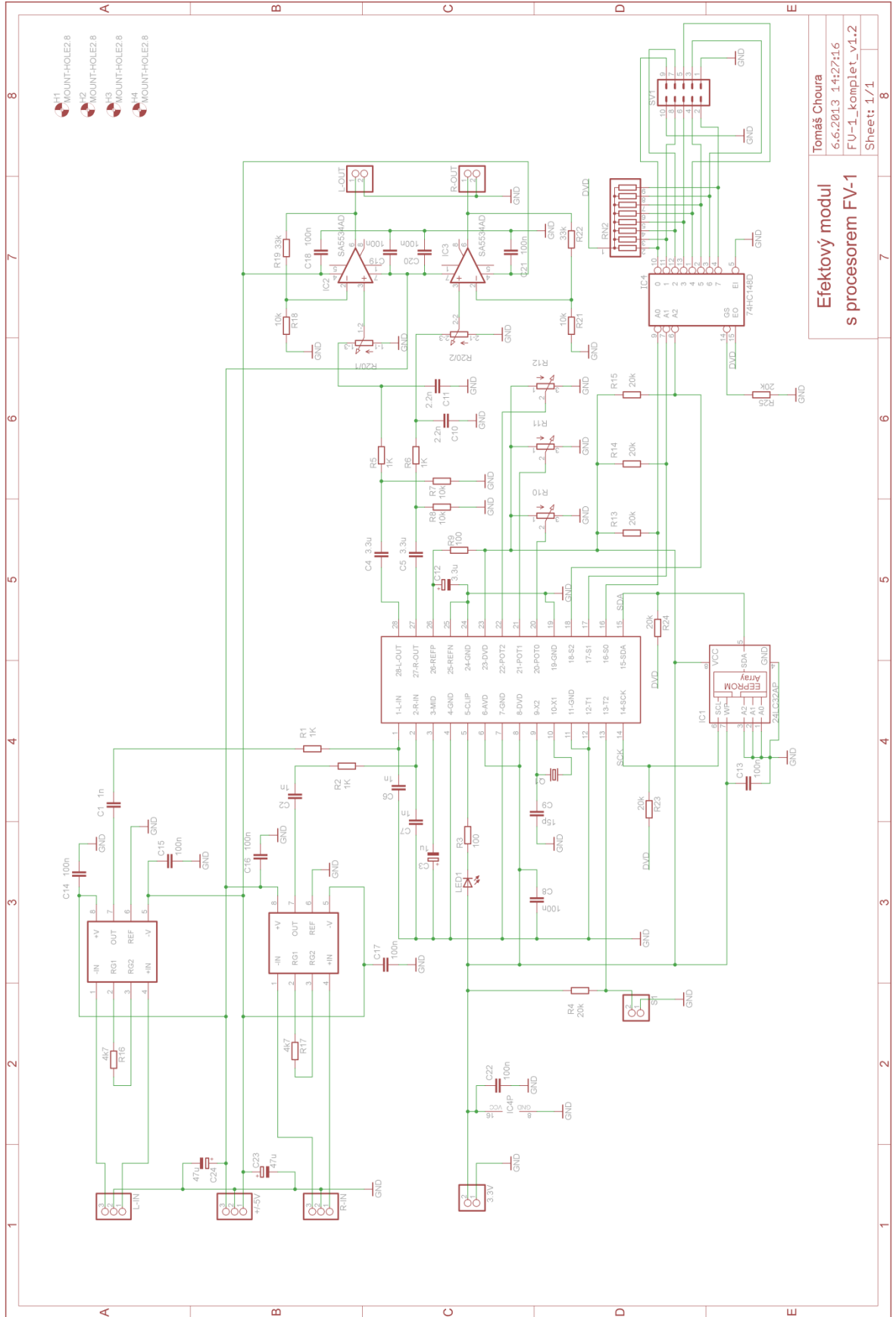
porovnání těchto dvou efektů jsem zjistil, že zpracování efektu delay/reverb v této práci je o poznání příjemnější, než u efektového modulu DR400. Zvuk ozvěny je mnohem barevnější a zřetelnější i při imitacích většího prostoru. Dalším příjemným zjištěním bylo, že modul s FV-1 Reverb nevykazoval do zvuku šum. Přisuzuji to zpracováním samostatné desky s napájecím obvodem, který je mírně předimenzován a dokáže tak energeticky pokrýt i proudové špičky na desce efektového modulu.

Závěrem této práce můžu s odhodláním říci, že výsledek mé práce není pouhým návrhem, který by nenašel uplatnění mezi hudebníky a troufl bych si i tvrdit, že by se mohl líbit i zkušenějším hráčům, kteří už nehledají jen efektový modul, ale hledají charakteristický zvuk, který by definoval pomyslnou značku nahrávky.

8. Seznam použité literatury

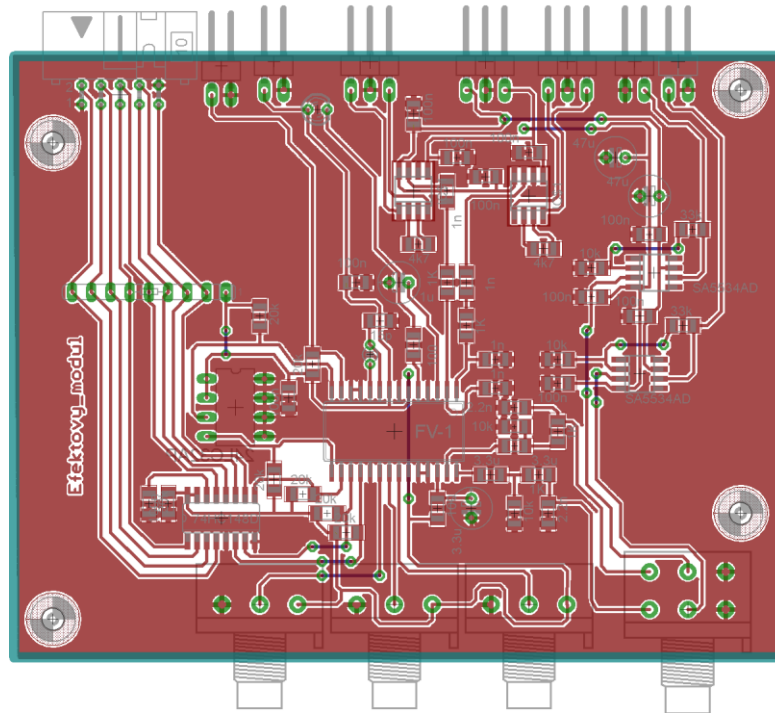
1. Vlachý, Václav, *Praxe zvukové techniky*. Jihlava: Muzikus, 2008. 3. dopl. vyd. ISBN 978-80-86253-46-5
2. Pinker, Jiří, *Mikroprocesory a počítače*. Praha: BEN, 2008. 1. dotisk 1. vyd. ISBN 978-80-7300-110-0
3. Pinker, Jiří; Koucký, Václav. *Analogové elektronické systémy*. Plzeň: ZČU, 2004. ISBN 80-7082-506-5.
4. Spin Semiconductor. [online]. [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.spinsemi.com/>
5. 74HC148. [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/>
6. INA826. [online]. [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/>
7. SA5534AD. [online]. [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/>
8. DSP-1K. [online]. [cit. 2012-10-15]. Dostupné z: <http://www.wavefrontsemi.com/>
9. Jak pracují efekty. [online]. [cit. 2013-02-02]. Dostupné z: <http://www.muzikus.cz/>

Příloha

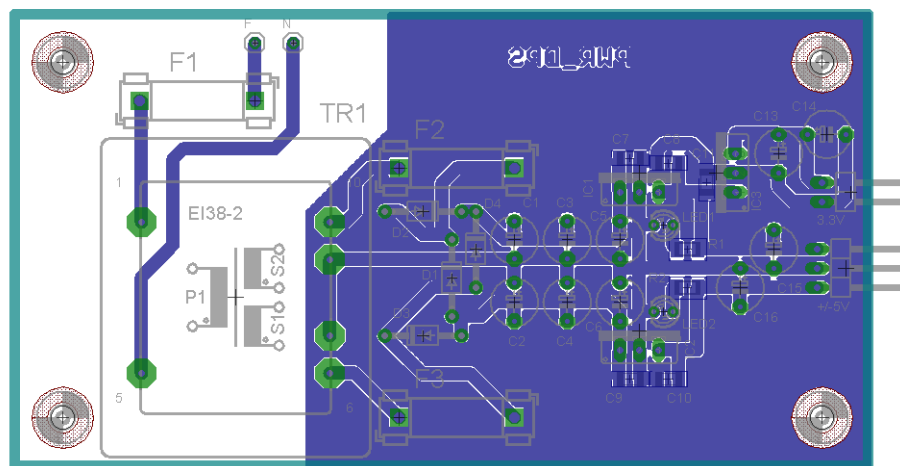


Tomáš Choura
6.6.2013 14:27:16
FU-1_komplet_v1.2
Sheet: 1/1

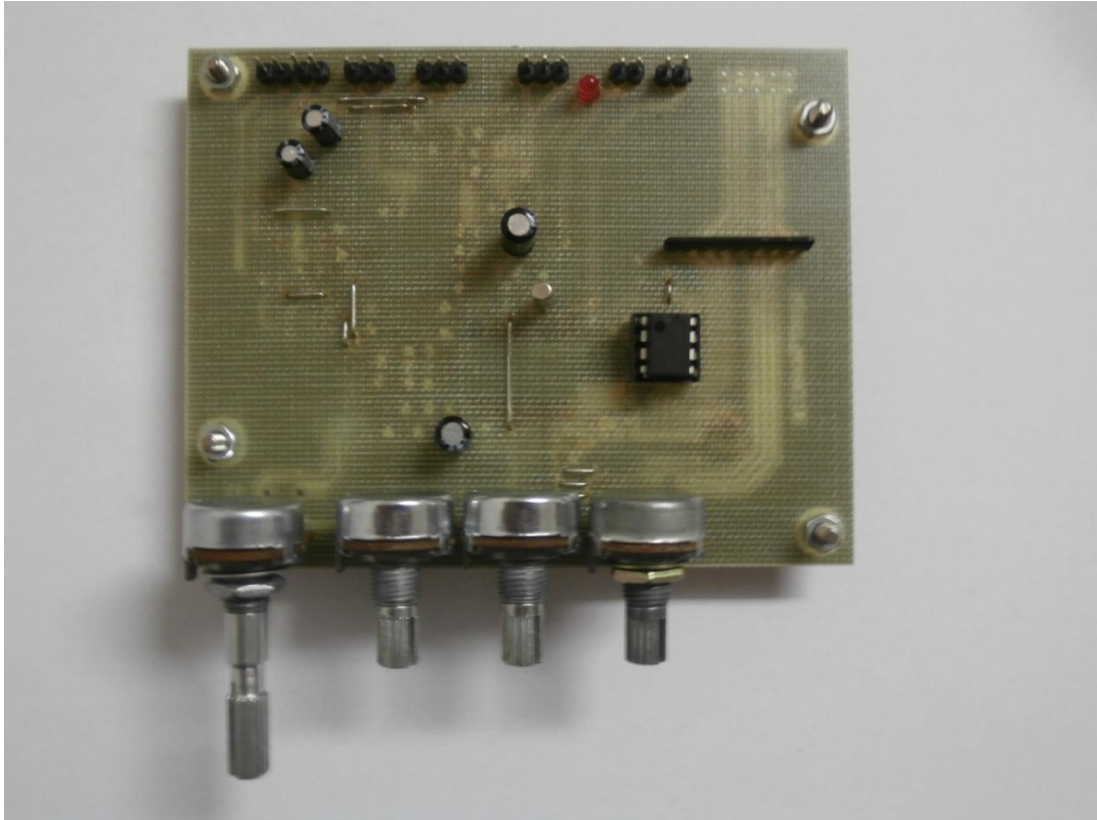
**Efektový modul
s procesorem FV-1**



DPS1: Deska plošného spoje efektového modulu



DPS2: Deska plošného spoje napájacieho zdroja



Obr. 9a: Fotografie DPS efektového modulu



Obr. 9b: Fotografie DPS napájecího zdroje