



FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
KYTAROVÝ DSP MULTIEFEKT

Vypracoval: Bc. Lukáš Čížek

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Pavlíček, Ph.D.

Plzeň 2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš ČÍŽEK**
Osobní číslo: **E16N0038P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Kytarový DSP multiefekt**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Měřením a rozborem určete požadované parametry navrhovaného zařízení.
2. Podle získaných parametrů vyberte vývojový kit vhodný pro realizaci kytarového DSP multiefektu a navrhnete celkovou koncepci zpracování signálu včetně vhodných AD a DA převodníků, předzesilovačů a filtrů.
3. Navrženou koncepci realizujte.
4. Dané zařízení otestujte, ověřte parametry a vytvořte SW pro demonstraci funkce zařízení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

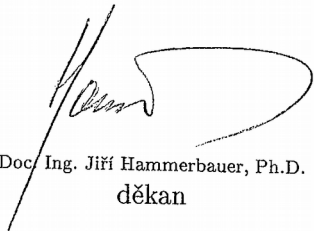
Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vladimír Pavlíček, Ph.D.

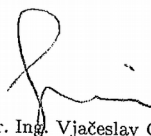
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 24. května 2018


Doc. Ing. Jirí Hammerbauer, Ph.D.
děkan

L.S.


Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh a konstrukci prototypu digitální efektové jednotky určené pro elektrofonickou kytaru, tzv. multiefektu. Multiefekt je postaven na základě vývojového kitu Nucleo-F767ZI od výrobce ST Microelectronics a audio kodeku PCM3060 výrobce Texas Instruments. Navržené zařízení je schopno zpracovávat signál z elektrofonické kytary a jeho výstup je možné propojit přímo se vstupem nástrojového zesilovače. Začátek práce pojednává o vývoji elektrofonické kytary, pokračuje popisem funkce elektrofonické kytary a končí rozbořem parametrů kytarového signálu. Další část práce se podrobně zabývá návrhem a konstrukcí prototypu multiefektu. Následuje část, kde jsou popsány základní algoritmy audio efektů. Práce je zakončena rozbořem parametrů navrženého prototypu a jejich srovnáním s komerčními řešeními.

Klíčová slova

ARM, audio, DSP, efekt, hudba, kytara, STM32

Abstract

The diploma thesis is focused on the design of a digital effect prototype unit that is intended for use with electric guitar. Similar devices are commonly called as multi-effects. The multi-effect is based on the Nucleo-F767ZI development kit from ST Microelectronics and audio codec PCM3060 from Texas Instruments. An electric guitar can be connected directly to the multi-effect input and the multi-effect output can be connected directly to the instrument amplifier. The first part of the thesis is about electric guitar history and development, continues with the description of electric guitar function and ends with description parameters of electric guitar signal. Next part of the thesis deals with the design of the multi-effect prototype. The third part is about basic audio effects algorithms. The last part of the thesis deals with parameters of designed multi-effect prototype and compare them to commercial products.

Keywords

ARM, audio, DSP, effect, guitar, music, nucleo, STM32

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Jako autor této diplomové práce prohlašuji, že jsem práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu literatury, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že jsem neporušil autorská práva třetích osob a že všechny software použité při řešení této diplomové práce je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 23. května 2018

Bc. Lukáš Čížek

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Vladimíru Pavlíčkovi, Ph.D., který mi byl při řešení této práce velmi nápomocen. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Kristovi, Ph.D., za pomoc a cenné rady týkající se procesorů výrobce ST Microelectronics, a panu Ing. Stanislavu Bouzkovi a panu Ing. Oldřichu Turečkovi, Ph.D. za pomoc při měření parametrů elektrofonických kytar a zesilovačů. Nesmím také zapomenout poděkovat firmě STMicroelectronics za poskytnutí vývojových kitů, jež jsem použil při řešení této diplomové práce.

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Elektrofonická kytara.....	2
2.1 Signál elektrofonické kytary.....	2
2.2 Parametry kytarového signálu.....	4
2.3 Stanovení parametrů multiefektu.....	6
3 Koncepce multiefektu.....	8
3.1 Blokové schéma.....	9
3.2 Použité komunikační sběrnice.....	12
4 Návrh obvodů multiefektu.....	15
4.1 Napájecí obvody.....	15
4.2 Vstupní obvody.....	16
4.3 Audio kodek.....	18
4.4 Výstupní obvody.....	19
4.5 Ovládací obvody.....	23
5 Konstrukce multiefektu.....	26
5.1 Rozmístění součástek a signálů.....	27
5.2 Rozvod napájení a zemnění.....	27
5.3 Mechanická konstrukce a šasi.....	28
6 Software multiefektu.....	30
7 Kytarové efekty.....	31
7.1 Efekty zkreslení.....	31
7.2 Modulační efekty.....	36
7.3 Efekty dozvuku.....	44
7.4 Ostatní efekty.....	47
8 Parametry a vlastnosti multiefektu.....	50
9 Závěr.....	58
10 Použitá literatura.....	59

Seznam použitých symbolů a zkratek

AC	Alternate Current (<i>střídavý proud</i>)
ADC	Analog to Digital Converter (<i>analogově-digitální převodník</i>)
DAC	Digital to Analog Converter (<i>digitálně-analogový převodník</i>)
DC	Direct Current (<i>stejnoseměrný proud</i>)
DPS	Deska Plošných Spojů
DSP	Digital Signal Processor (<i>digitální signálový procesor</i>)
DMIPS	Dhrystone Million Instructions Per Secons (<i>Dhrystone milion instrukcí za vteřinu</i>)
DR	Dynamic Range (<i>dynamický rozsah</i>)
FPU	Float Point Unit (<i>výpočetní jednotka pro operace s desetinnou čárkou</i>)
GPIO	General Purpose Input Output (<i>jednotka vstupu a výstupu pro všeobecné využití</i>)
HB	Humbucker
HW	Hardware (<i>fyzické vybavení</i>)
I2S	Inter-IC Sound (<i>sériové rozhraní pro přenos audio signálu</i>)
LCD	Liquid Crystal Display (<i>zobrazovač pracující na bázi tekutých krystalů</i>)
LED	Light Emithing Diode (<i>světelná dioda</i>)
MCU	Micro Controller Unit (<i>mikrokontrolér</i>)

NF	Nízkofrekvenční
PLL	Phase Locked Loop (<i>fázový závěs</i>)
RAM	Random Access Memory (<i>operační paměť</i>)
SC	Single coil
SAI	Serial Audio Interface (<i>sériové audio rozhraní</i>)
SPI	Serial Peripheral Interface (<i>sériové periferní rozhraní</i>)
SW	Software (<i>programové vybavení</i>)
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (<i>univerzální asynchronní přijímač-vysílač</i>)
VF	Vysokofrekvenční

1 Úvod

V dnešní době je na trhu nespočet možností při výběru a sestavování kytarové aparatury. Je důležité mít na paměti, že každá součást audio řetězce elektrofonické kytary má nezanedbatelný vliv na výsledný zvukový projev. Dodnes u profesionálních i amatérských kytaristů převažuje řešení, kdy je mezi elektrofonickou kytaru a nástrojový zesilovač připojen tzv. pedalboard. Jedná se o platformu, jež obsahuje různé efektové jednotky, tzv. efektové pedály. [7] [9] [10] [11]

Toto řešení vychází z dob minulých, kdy kytarové zesilovače byly konstruovány na základě obvodů s elektronkami, což přinášelo různá úskalí. Největším z nich je vznik zkreslení, které je u různých hudebních stylů žádané, ale vlivem koncepce starých elektronkových aparátů, bylo možné zkreslení dosáhnout až při velkých hlasitostech. Tento problém se řešil např. právě tak, že se o požadované zkreslení starala efektová jednotka zapojená mezi elektrofonickou kytaru a nástrojový zesilovač. V minulosti byly tyto efektové jednotky čistě analogové, případně využívaly různých elektromechanických měničů pro získání dalších typů efektů. Analogový pedalboard je však velmi nákladné řešení, protože cena kvalitních efektových jednotek se pohybuje řádově v tisících Kč, ale také je složité na převoz a manipulaci. Nelze také opomenout to, že je vhodné tyto jednotky napájet galvanicky oddělenými zdroji, aby nedošlo ke vzniku zemních smyček, což se může projevit např. zvýšeným šumem nebo pískáním superponovaným k původnímu signálu. Navíc, pokud člověk požaduje jiný typ zvuku nebo jiný efekt, musí některou část tohoto audio řetězce fyzicky vyměnit. [7] [9] [10] [11]

Proto se v minulých letech začaly objevovat plně digitální systémy, umožňující nejen realizaci nejrůznějších efektů, ale také simulování chování kytarových aparátů a reproboden. Tyto systémy mají daleko širší zvukové možnosti, univerzálnější použití, menší rozměry i hmotnost. Lze tedy očekávat, že se v budoucnosti bude ubírat trend kytarových efektů i zesilovačů právě směrem plně digitálních systémů. Cílem této diplomové práce je právě návrh a konstrukce prototypu zařízení vhodného pro realizaci digitální efektové jednotky - tzv. multieffektu. [7] [9] [10] [11]

2 Elektrofonická kytara

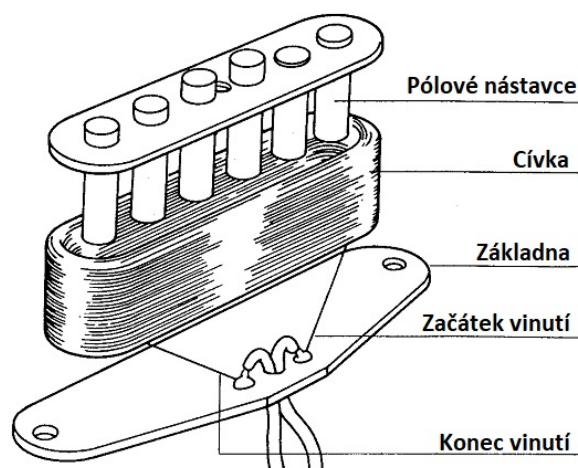
Fragmenty nástrojů nebo alespoň zmínky o nástroji podobného kytáře lze datovat až 4 000 let zpět v naší historii. Kytara se jako specifický druh hudebního nástroje vyvinula ze starověkých drnkacích nástrojů, přičemž dnešní podobu získala akustická kytara na konci 18. století. Od té doby rostla její popularita a kytara byla využívána v rozličných hudebních stylech a uskupeních, nejčastěji však pouze jako doprovodný nástroj ke zpěvu. Na začátku 20. století se kytara začala používat i v orchestrech či jako sólový nástroj a objevil se problém s nízkou hlasitostí akustické kytary. [9] [10]

Proto bylo podniknuto mnoho pokusů, jak vyrobit hlasitější kytaru. Vývoj se nejprve ubíral vylepšením konstrukce kytary vkládáním mechanických rezonátorů do jejího těla, čímž vznikly tzv. rezofonické kytary - dobra. Hlasitost těchto nástrojů však stále byla pro některé účely nedostatečná, a tak se začalo experimentovat se snímači a zesilovači konstruovanými speciálně pro kytaru. To vedlo ke vzniku elektrofonické kytary (často označované jako elektrické kytary), přičemž první skutečnou prakticky použitelnou elektrofonickou kytaru vyvinula společnost Rickenbacker na začátku 30. let 20. století. Do současné podoby se elektrofonická kytara formovala mezi 40. a 50. lety 20. století, přičemž největšího rozmachu dosáhla mezi 60. a 70. lety 20. století. [9] [10]

2.1 Signál elektrofonické kytary

V průběhu minulých let bylo vyvinuto mnoho systémů snímání kmitů strun elektrofonické kytary, jejichž funkce využívá rozličných fyzikálních principů. Prvním a dodnes nejrozšířenějším typem snímačů jsou pasivní magnetické snímače, ale existují i systémy pracující se snímači využívajícími piezoelektrického jevu. Velmi zřídka se lze setkat i se snímači optickými. [9] [10]

Pasivní magnetické snímače se skládají z cívky, magnetů (pólových nástavců) a dalších konstrukčních prvků, které drží jednotlivé části snímače pohromadě a umožňují montáž snímače do těla elektrofonické kytary. Konstrukce nejjednoduššího typu pasivního magnetického snímače (tzv. single-coil) je znázorněna na obrázku 1. [25]

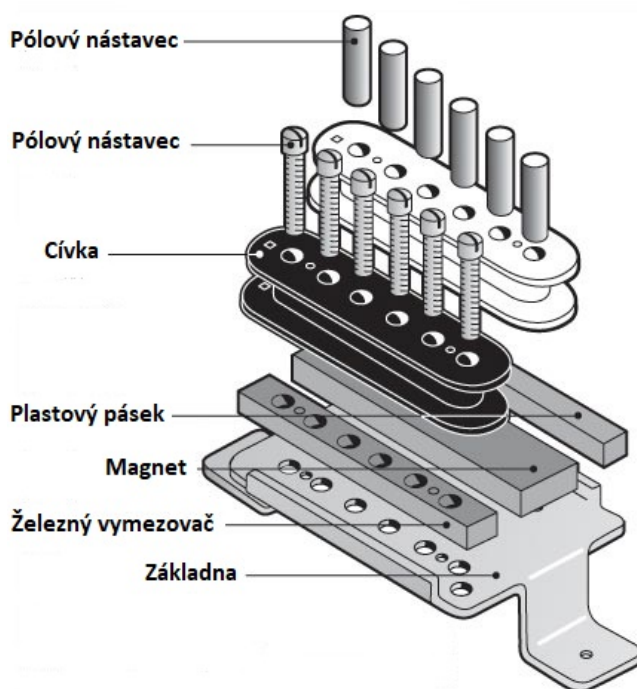


Obr. 1 - Konstrukce snímače typu single-coil, převzato s úpravami z [36]

Pasivní magnetické snímače pracují na principu magnetické indukce. Magnety nebo pólové nástavce jsou umístěny pod jednotlivými strunami a budí magnetický tok, který prostupuje do strun a uzavírá se skrze cívku snímače. V případě, že se rozechvěje struna, dojde ke změnám magnetického toku, který prochází cívkou snímače, a v cívce se indukuje napětí. [13] [25]

Problémem je, že v cívce snímače se indukuje napětí i v případě, že skrze ní prostupuje magnetický tok, který nevybudily magnety snímače, ale např. síťový rozvod. Proto jsou snímače typu single-coil náchylné na snímání brumů a dalšího rušení. Výrobci hledali způsob, jak tento nedostatek odstranit, a tak byl v roce 1957 vyvinut ve firmě Gibson snímač typu humbucker. [13] [25]

Snímače typu humbucker se v podstatě skládají za dvou snímačů typu single-coil. Ty jsou umístěny vedle sebe a mají navzájem opačný směr vinutí i opačnou orientaci magnetického pole pólových nástavců. Vinutí obou polovin snímače se obvykle zapojuje do série, ale je možné i spojení paralelní. Obrácená polarita magnetického pole způsobí, že se do cívek indukuje napětí v protifázi, ale vlivem opačného směru vinutí dojde k otočení fáze. Výsledné napětí na výstupu je dáno součtem napětí obou cívek. V případě, že do snímače zasahuje vnější magnetický tok (rušení), neuplatní se otočená polarita magnetů, rušivé napětí se indukuje do cívek se stejnou fází, ale vlivem antisériového zapojení vinutí se navzájem odečte. Proto tyto snímače dosahují vyššího výstupního napětí při nižší citlivosti na vnější rušení. Obrázek 2 znázorňuje konstrukci tohoto typu snímače. [13]

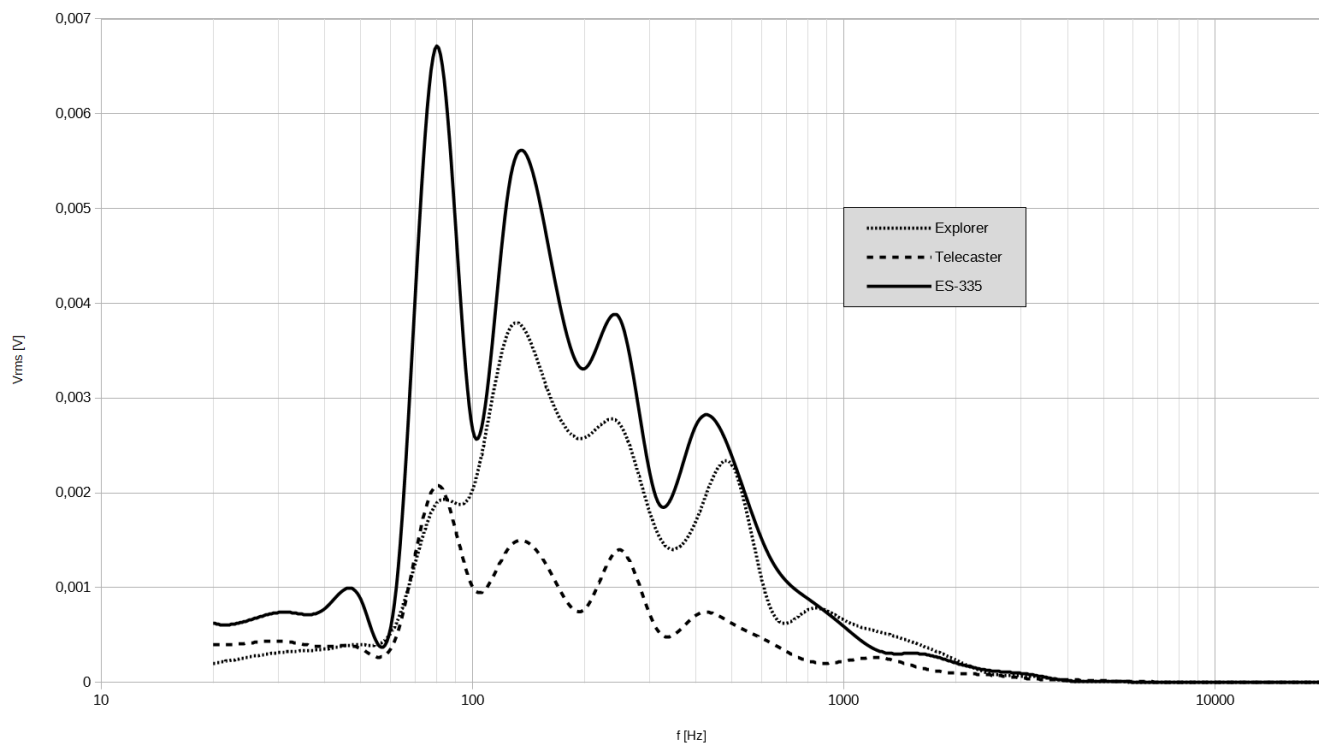


Obr. 2 - Konstrukce snímače typu humbucker, převzato s úpravami z [2]

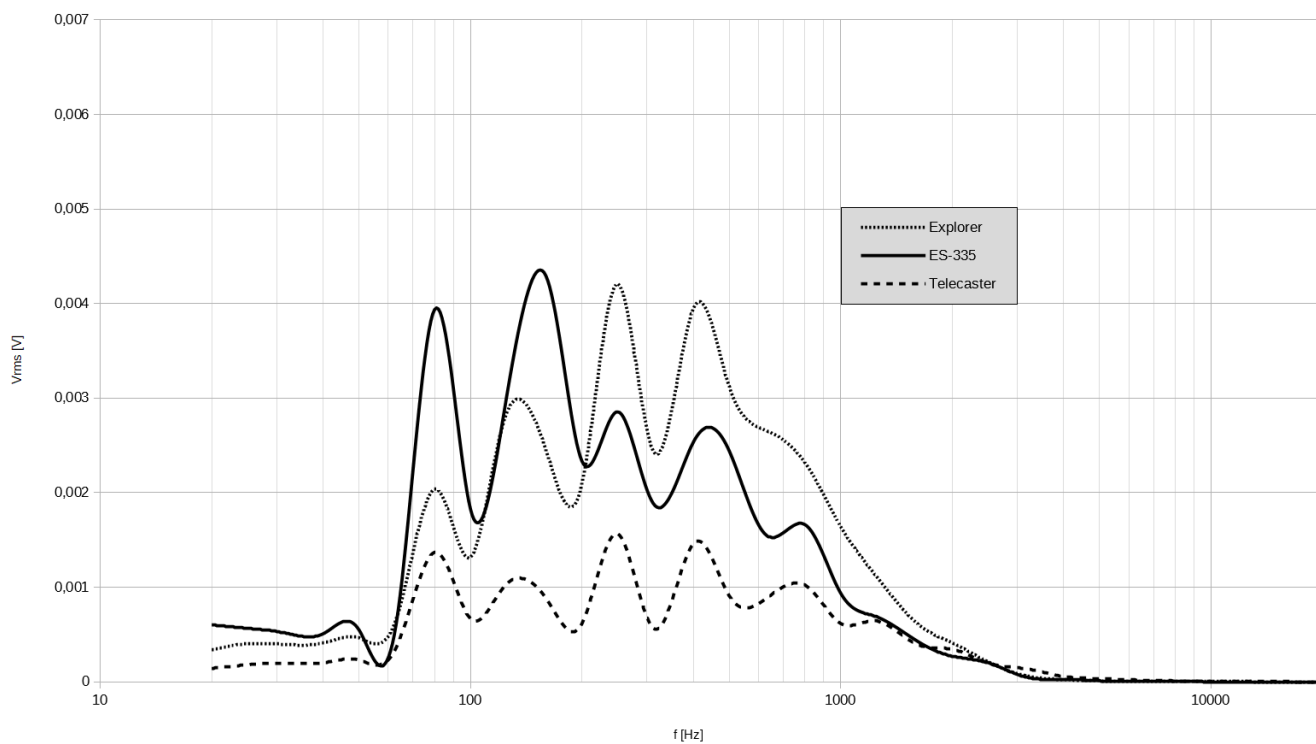
2.2 Parametry kytarového signálu

Před zahájením návrhu multieffektu bylo potřeba stanovit parametry kytarového signálu, zejména jeho dynamický a frekvenční rozsah. Problém je, že signál elektrofonické kytary není nijak standardizován a dokonce ani výrobci snímačů neuvádějí charakteristiky k prodávaným snímačům. Proto bylo nutné provést měření a potřebné parametry zjistit.

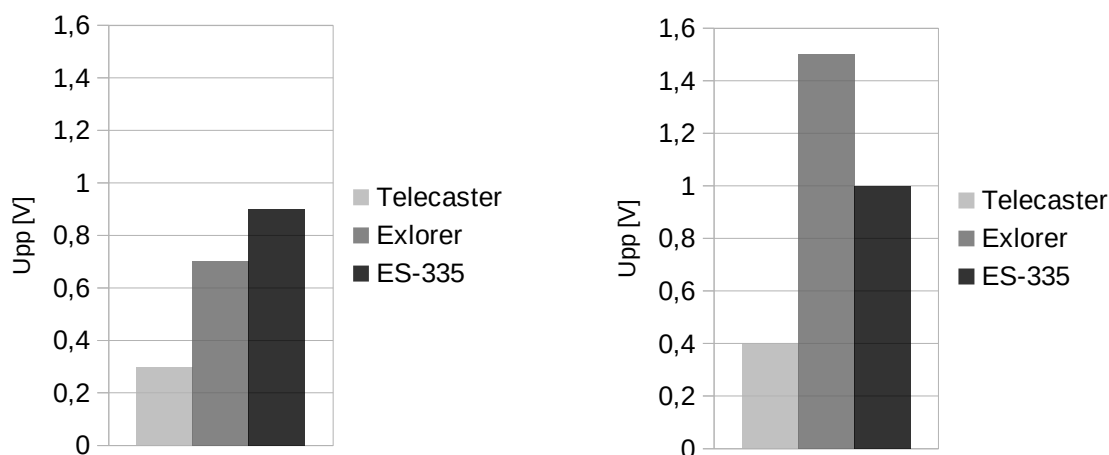
Pro měření byly zapůjčeny tři elektrofonické kytary. První byly měřeny parametry signálu kytary typu Gibson Explorer od výrobce Bach se snímači humbucker výrobce RM Pickups, poté kytary typu Gibson ES-335 od výrobce Cort s továrními humbucker snímači a nakonec kytary typu Fender Telecaster od výrobce Squier se snímači single-coil výrobce RM Pickups. Měření probíhalo na přístroji Audio Precision APX500. Po dobu nahrávání byl hrán na všechny nástroje stejný akordový postup a to zvláště na krkový a kobylkový snímač. Ze získaných nahrávek byla spočtena frekvenční spektra a určen dynamický rozsah. Obrázky 3 a 4 znázorňují porovnání spekter jednotlivých modelů kytar (pozn. pro větší názornost charakteristik byla použita třetinooktávová filtrace výsledků a lineární zobrazení osy napětí). Obrázek 5 znázorňuje porovnání změřených amplitud výstupního signálu jednotlivých nástrojů.



Obr. 3 - Frekvenční spektrum - krkové snímače



Obr. 4 - Frekvenční spektrum - kobyolkové snímače



Obr. 5 - Porovnání amplitud výstupního signálu měřených nástrojů
(krkové snímače vlevo, kobyolkové snímače vpravo)

2.3 Stanovení parametrů multieffektu

Měření bylo zjištěno, že výstupní signál elektrofonické kytary se nalézá v pásmu od přibližně 50 Hz do 5 kHz. Horní hranice pásma je důležitá pro stanovení požadavků na vzorkovací frekvenci AD převodníku a pro nastavení parametrů antialiasing filtru. Jistou komplikací je, že do této oblasti zasahuje i problematika psychoakustiky a lidského vnímání. Nelze tedy jednoznačně určit frekvenční pásmo, které je nutné zpracovat, aby nedošlo k slyšitelné degradaci signálu. Z hlediska lidského vnímání by bylo ideální zpracovávat celé slyšitelné spektrum bez vzniku zkreslení signálu. Takové řešení by vyžadovalo vysokou vzorkovací frekvenci, součástky s nízkým šumem, mnohabitové AD a DA převodníky, což by bylo velmi nákladné.

Kromě frekvenčních spekter výstupních signálů byly měřeny i jeho amplitudy. Zjistilo se, že u snímačů s vysokou citlivostí (viz obrázek 5 - kobyolkový snímač kytary typu Explorer) může výstupní napětí dosahovat i 1,5 Vpp. Kromě amplitud výstupního signálu bylo měřeno i výstupní napětí se ztlumenými strunami. To v podstatě udává úroveň šumu a lze tedy říci jaké minimální napětí na výstupu odpovídá užitečnému signálu. Problémem je, že úroveň šumu a dalších ruchů je u elektrofonických kytar silně závislá na okolním prostředí, a nelze ji tedy jednoznačně určit. V podmínkách laboratoře se šum pohyboval řádově v jednotkách mVpp. Úroveň šumu a maximální hodnota výstupního napětí kytary klade požadavky na dynamický rozsah a počet bitů AD a DA převodníku.

Na základě výše uvedených skutečností byly zvoleny následující minimální požadavky na parametry multieffektu:

1. Frekvenční rozsah vstupního signálu 100 Hz až 10 kHz
2. Frekvenční rozsah výstupního signálu 100 Hz až 16 kHz
3. Dynamický rozsah 60 dB (resp. 2 mVpp až 2 Vpp), viz vztah 1
4. Rozlišení minimálně 12 bitů (platí pro audio ADC/DAC s referencí o napětí 5V), viz vztah 2

$$(1) \quad DR = 20 \log \frac{U_{max}}{U_{min}} = 20 \log \frac{2}{2 \cdot 10^{-3}} = 60 \text{ dB}$$

$$(2) \quad B = 20 \log_2 \frac{U_{ref}}{U_{min}} = 20 \log_2 \frac{5}{2 \cdot 10^{-3}} = 11,29 \Rightarrow 12 \text{ bitů}$$

Ve vztahu 1 DR značí dynamický rozsah, U_{max} maximální špičkové napětí, jež musí být schopný efekt zpracovat bez zkreslení, U_{min} udává napětí odpovídající úrovni šumu obsaženého v signálu elektrofonické kytary. Ve vztahu 2 písmenko B vyjadřuje minimální počet bitů ADC/DAC, U_{ref} referenční napětí ADC/DAC a U_{min} totéž, co ve vztahu předchozím.

3 Koncepte multieffektu

Na základě minimálních požadavků na parametry multieffektu byla zvolena následující koncepce. Multieffekt byl postaven na vývojovém kitu, ke kterému se připojila základní deska. Základní deska obsahuje obvody pro vyhlazení, odrušení a rozvod napájení, obvody pro zpracování audio signálu a obvody pro interakci s uživatelem. Před začátkem vlastního návrhu bylo nutné vybrat vhodný vývojový kit a obvod pro převod analogového audio signálu do číslicové podoby.

Výběr vývojového kitu byl podmíněn několika podstatnými faktory. Vývojový kit musel nést MCU (Micro Controller Unit), který umožňuje komunikaci přes některé ze standardních rozhraní pro přenos audio signálu. Dalším požadavkem byl dostatečný výkon procesoru pro zpracování audio signálu a podpora DSP (Digital Signal Processing) operací. V potaz bylo nutné vzít také počet pinů pro připojení prvků umožňujících interakci s uživatelem. S přihlédnutím k nabitým zkušenostem s MCU od výrobce ST Microelectronics byl pro tuto aplikaci zvolen vývojový kit Nucleo-F767ZI. Tento kit je osazen MCU STM32F767ZI, jehož jádrem je 32-bitový procesor Cortex-M7 architektury ARM. Tento MCU disponuje 512 KB RAM (Random Access Memory), 2 MB Flash paměti, FPU (Float Point Unit), SAI (Serial Audio interface) a je schopen pracovat s taktovací frekvencí jádra až 216 MHz, kdy dosahuje až 462 DMIPS (Dhrystone Million Instructions Per Second). Tento MCU tedy splňuje výše zmíněné požadavky. [27] [28]

Dále bylo nutné zvolit koncepci převodu analogového audio signálu do číslicové podoby a naopak. Interní ADC (Analog to Digital Converter) a DAC (Digital to Analog Converter) MCU nemají vhodné parametry pro tuto aplikaci a proto bylo nutné řešit převod signálu pomocí externího obvodu. Nakonec byl pro tuto aplikaci zvolen obvod PCM3060 od výrobce Texas Instruments, který byl vybrán na základě kompromisu mezi vlastnostmi a cenou. Tento obvod v sobě integruje rychlý 24 bitový audio ADC a DAC, antialiasing filtr a interpolační výstupní filtr. Kodek umožňuje komunikaci přes rozhraní I2S (Inter IC Sound), které podporuje i SAI rozhraní ve zvoleném MCU. S tímto kodekem lze dosáhnout vzorkovací frekvence až 96 kHz. To by pro účel kytarového multieffektu mělo být dostačující. [32]

Aby bylo možné zpracovat audio signál z elektrofonické kytary, je nutné vývojový kit i audio kodek doplnit dalšími podpůrnými obvody. Tyto obvody jsou realizovány na základě operačních zesilovačů a proto bylo nutné zvolit i vhodný typ operačního zesilovače. Pro tuto aplikaci byl zvolen integrovaný obvod TL072CP od výrobce Texas Instruments. Tento obvod v sobě integruje dva nízkošumové operační zesilovače. Výhodou je také to, že je tento integrovaný obvod poměrně levný a dostupný, ale hlavně má vlivem technologie JFET vysokou vstupní impedanci. Tak tedy nepřetěžuje výstup elektronické kytary, což by se projevilo snížením rozkmitu výstupního signálu kytary a úbytkem vyšších frekvencí v jeho spektru. Nevýhodou může být vyšší harmonické zkreslení (THD) při nadměrném zatížení výstupu operačního zesilovače. To však lze eliminovat vhodným návrhem zapojení. Z katalogového listu je patrné, že není vhodné výstup těchto operačních zesilovačů zatěžovat impedancí nižší, než 1 k Ω . [23] [24] [34]

Nízkošumové operační zesilovače byly zvoleny proto, aby nedošlo k degradaci rozlišení audio kodeku. Aby toto opatření nepřišlo na zmar, byly do analogových obvodů signálové cesty použity výhradně metalizované rezistory. Ty totiž vykazují nižší šumová napětí než běžnější uhlíkové rezistory. Další výhodou je, že metalizované rezistory lze zakoupit i v řadách přesnějších, než je běžně používaná řada E12. To je důležité u citlivých analogových obvodů, neboť se jejich parametry nebudou tak výrazně lišit od parametrů vypočtených při návrhu. Nevýhodou metalizovaných rezistorů však je jejich vyšší cena. Proto do digitálních obvodů byly použity rezistory uhlíkové. [3] [17] [18]

3.1 Blokové schéma

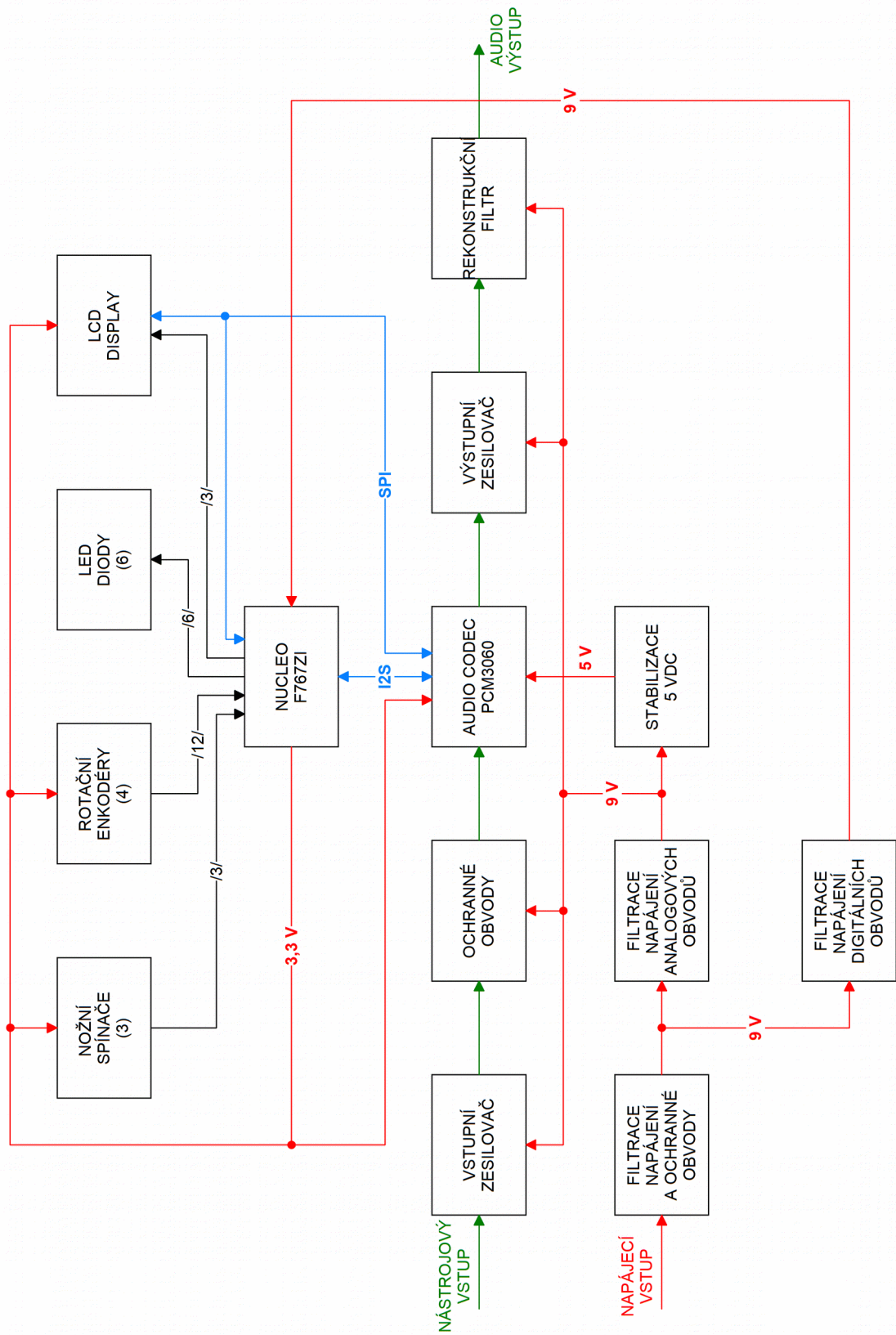
Po zvolení klíčových komponent pro realizaci multieffektu bylo nakresleno blokové schéma, jež lze vidět na obrázku 6. Celé schéma lze rozdělit do čtyř základních částí (napájení, zpracování audio signálu, vývojový kit a ovládací prvky).

Multieffekt je koncipován pro napájení z externího stabilizovaného zdroje 9 V, který se standardně používá pro napájení efektových jednotek v audio řetězci elektrofonické kytary. Za vstupem napájení následuje blok filtrace a ochranných obvodů. Cílem tohoto bloku je zamezit vniku NF (nizkofrekvenčního) rušení vlivem zvlnění napájecího napětí externího zdroje. Mimo to obsahuje také ochranu proti přepólování zdroje. Za tímto

blokem je napájení rozděleno na napájení analogových a digitálních obvodů. Blok filtrace napájení v každé napájecí větvi má za úkol zamezit přenosu VF (vysokofrekvenčního) rušení z číslicové části multieffektu do části analogové. Pro napájení analogových obvodů je použito napětí 9 V, které umožňuje dostatečný rozkmit výstupního napětí operačních zesilovačů použitých v jednotlivých blocích zpracování analogového audio signálu. Z větve 9 V pro napájení analogových obvodů je pomocí lineárního stabilizátoru sníženo napětí na 5 V pro napájení audio kodeku. Napětí 3,3 V pro napájení číslicových obvodů, LCD zobrazovače, audio kodeku a ovládacích prvků je získáno pomocí lineárního stabilizátoru, který je osazen na použitém vývojovém kitu. [11] [28]

Signál z elektrofonické kytary je přiveden na vstupní zesilovač. Ten má za úkol impedančně přizpůsobit vstup signálu a zesílit vstupní signál pro další zpracování. Dále následuje blok s ochrannými obvody, který zajišťuje ochranu audio kodeku v případě, že se ke vstupu připojí nástroj s příliš silnými snímači, případně bude multieffektu předřazen předzesilovač nebo jiná efektová jednotka. Audio kodek se stará o převod analogového signálu na digitální a zpět. Konfigurace kodeku probíhá pomocí SPI (Serial Peripheral Interface) rozhraní a data se přenášejí pomocí rozhraní I2S (Inter-IC Sound). Za výstup audio kodeku je zařazen výstupní zesilovač, který má za úkol impedančně přizpůsobit vstup rekonstrukčního filtru a výstup audio kodeku. Rekonstrukční filtr slouží k potlačení vyšších harmonických z výstupního signálu.

K vývojovému kitu jsou připojeny 4 rotační enkodéry s integrovanými tlačítky. Spolu s LCD zobrazovačem komunikujícím s vývojovým kitem přes rozhraní SPI by tak mělo být možné jednoduše konfigurovat parametry multieffektu i za ztížených podmínek, jaké jsou např. při koncertech nebo zkouškách hudebních uskupení. Dále jsou k vývojovému kitu připojeny tři nožní spínače. Ty slouží k možnosti aktivovat a deaktivovat některý z nastavených efektů během hry. Šestice LED diod signalizuje, který z efektů je aktivní.



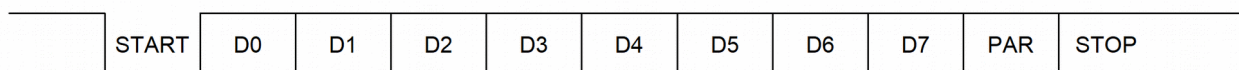
Obr. 6 - Blokové schéma

3.2 Použité komunikační sběrnice

V multieffektu se vyskytuje trojice komunikačních rozhraní. Pro základní výpis informací na terminál počítače při ladění programu je použito rozhraní UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). K práci s LCD zobrazovačem a konfiguraci parametrů audio kodeku slouží rozhraní SPI. Pro přenos audio dat mezi kodekem a vývojovým kitem je použito rozhraní I2S.

UART

UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) je sériové rozhraní určené pro přenos dat mezi dvěma systémy. Přenos dat je realizován dvěma vodiči, jedním pro odesílání dat a druhým pro jejich příjem. To umožňuje plně duplexní přenos dat bez možnosti vzniku kolize. Synchronizace vysílače a přijímače je znaková, odvozuje se tedy od začátku vysílání každého znaku a není zde přenášen synchronizační signál. Proto je důležité, aby vysílač i přijímač měly nastavenou stejnou komunikační rychlost. [35]



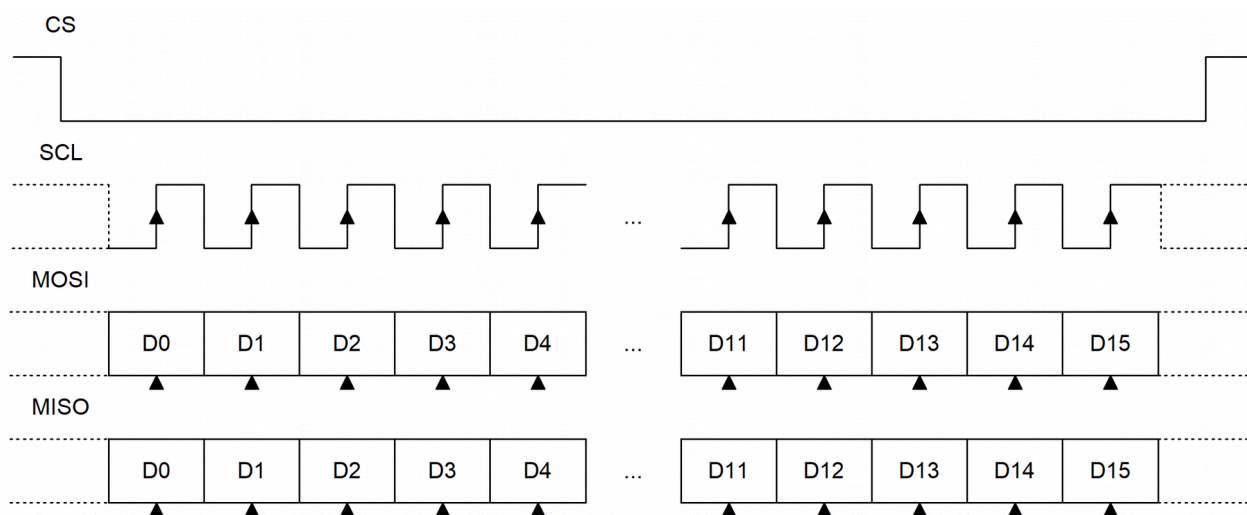
Obr. 7 - Časový průběh signálu komunikace UART

Pokud komunikace neprobíhá, je na obou vodičích úroveň odpovídající log. 1. Začátek komunikace je indikován START bitem (pokles signálu na úroveň odpovídající log. 0), který typicky následuje osm datových bitů D0 až D7. Za datovými bity se odesílá STOP bit (odpovídající log. 1). Mezi poslední bit odesílaných dat a stop bit může být vložen paritní bit (PAR), který lze použít pro rozpoznání vzniku chyby při komunikaci. [35]

SPI

SPI (Serial Peripheral Interface) je sériové rozhraní určené pro přenos dat mezi nadřazeným systémem a několika systémy podřízenými. Přenos dat je realizován třemi vodiči, dvěma datovými vodiči (MOSI a MISO) a třetím vodičem pro synchronizaci komunikace (SCL). Kromě těchto tří vodičů je potřeba ke všem podřazeným systémům připojit ještě signál pro jejich selekci (CS). Nadřazený systém se označuje jako master

a jeho úkolem je výběr systému podřazeného, který se označuje jako slave, a generování synchronizačních impulzů. Výhodou tohoto řešení je, že není potřeba nastavovat shodnou komunikační rychlost u všech systémů a že lze obsloužit komunikaci s více systémy bez možnosti vzniku kolize. [33]



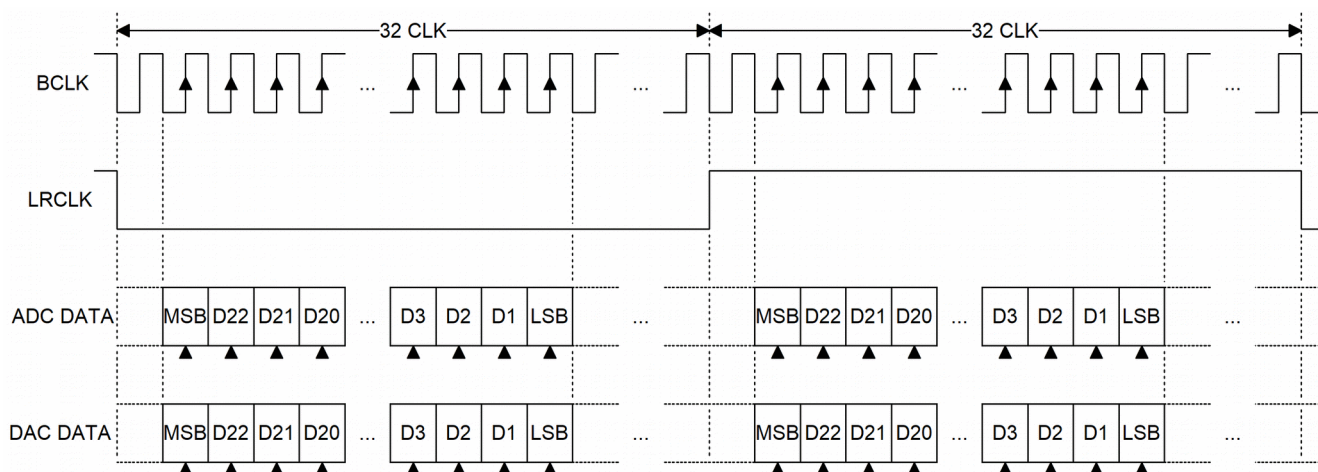
Obr. 8 - Časový průběh signálů komunikace SPI

Před začátkem komunikace master vybere slave, se kterým bude komunikovat tak, že příslušný signál CS nastaví do úrovně log. 0. Poté začne master generovat hodinový signál SCL a následně master (vodič MOSI) i slave (vodič MISO) odesílají data. Po odeslání všech dat master přestane generovat hodinový signál a nastaví signál CS daného slave na úroveň odpovídající log. 1. V tento moment je komunikace ukončena. Pomocí SPI se typicky odesílají datové rámce o délce 8 nebo 16 bitů. V nastavení SPI periferie lze zvolit, zda se data považují za platná při náběžné nebo sestupné hraně signálu SCL. [33]

I2S

I2S (Inter IC sound) je sériové rozhraní určené pro přenos audio datového signálu mezi dvěma systémy. Přenos dat je realizován čtyřmi vodiči, jedním vodičem pro synchronizaci komunikace (BCLK), druhým vodičem pro informaci o tom, jestli se přenáší levý nebo pravý kanál (LRCLK) a dvěma vodiči datovými (ADC a DAC DATA). Kromě výše zmíněných vodičů bývají systémy propojeny také vodičem MCLK, který slouží k přenosu

taktovacího signálu mezi I2S periferií MCU a audio kodekem, resp. audio AD a DA převodníkem. Komunikace je opět typu master-slave. Systém typu master má za úkol generovat signály BCLK a LRCLK, popř. i signál MCLK. [31]



Obr. 9 - Časový průběh signálů komunikace I2S

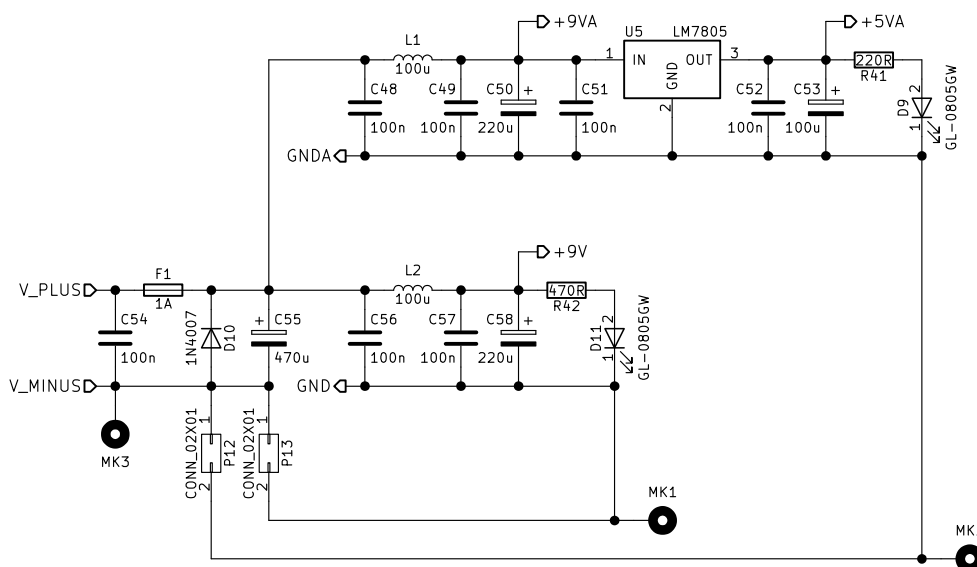
Komunikace začíná odesláním dat levého audio kanálu. To je indikováno tím, že se změní hodnota LRCLK do úrovně odpovídající log. 0. Následuje jeden impulz signálu BCLK, aby slave zařízení přečetlo stav na sběrnici a připravilo se na příjem dat. Poté je s každým dalším impulzem odeslán jeden datový bit. Maximální možná délka předávaných dat je 32 bitů, ale lze odesílat i kratší datové úseky, typicky o délce 16 nebo 24 bitů (viz obrázek 9). Po odeslání dat levého kanálu je změněn stav signálu LRCLK do úrovně odpovídající log. 1 a následně se tento proces opakuje i pro přenos dat pravého audio kanálu. Je patrné, že frekvence signálu LRCLK odpovídá vzorkovací frekvenci použitého audio převodníku. Pokud je potřeba generovat i signál MCLK, je důležité brát v potaz, že jeho frekvence musí být patřičným násobkem (typicky 128, 256 nebo 512) požadované vzorkovací frekvence. [31]

4 Návrh obvodů multieffektu

Z obvodového hlediska lze multieffekt rozdělit na několik základních obvodových celků, a to na napájecí obvody, vstupní obvody, obvody audio kodeku, výstupní obvody a na obvody určené pro interakci s uživatelem.

4.1 Napájecí obvody

Vzhledem ke kompatibilitě se standardními napájecími zdroji pro napájení efektových jednotek v audiořetězci elektrofonické kytary je napájení multieffektu přizpůsobeno pro připojení ke zdroji s napětím 9 V DC přes napájecí konektor jack 2,1 mm. Na obrázku číslo 10 je znázorněno schéma napájecí části multieffektu.



Obr. 10 - Napájecí obvody multieffektu

Aby se zamezilo přenosu VF rušení mezi digitálními a analogovými obvody, bylo by ideální napájení realizovat pomocí dvou galvanicky oddělených zdrojů. V tomto případě by to však znamenalo poměrně komplikované řešení a proto byl zvolen následující kompromis. Co nejbližší vstupu napájení jsou odděleny dvě větve, z nichž první slouží pro napájení analogových obvodů (9VA a 5VA) a druhá pro napájení číslicových obvodů (9V). Toto řešení by samo o sobě však nemuselo být dostatečně účinné a proto jsou obě větve odděleny přes dvě odrušovací tlumivky L1 a L2, navíc jsou zde zapojeny blokovací

kondenzátory 100 nF. Krom potlačení přenosu rušení mezi analogovými a číslicovými obvody toto řešení zajišťuje i potlačení rušení vyšších frekvencí od dalších zařízení připojených k stejnému externímu zdroji napájení. Z důvodu zamezení vzniku rušivých napětí přímo v napájecí části multieffektu byl použit pro stabilizaci napětí 5 V (5VA) lineární stabilizátor LM7805.

Elektrolytické kondenzátory C50, C55 a C58 slouží jako zásobníky energie pro potlačení rušení 100 Hz, které by mohlo vnikat do obvodů multieffektu při nedostatečné filtraci výstupního napětí externího napájecího zdroje. Další důležitou součástí napájecích obvodů je také ochrana proti připojení zdroje s opačnou polaritou napětí, kterou zajišťuje dioda D10 a trubičková pojistka F1. Pro možnost hledání chyb na prototypu multieffektu byla implementována možnost odpojení analogové i digitální země pomocí jumperů P12 a P13.

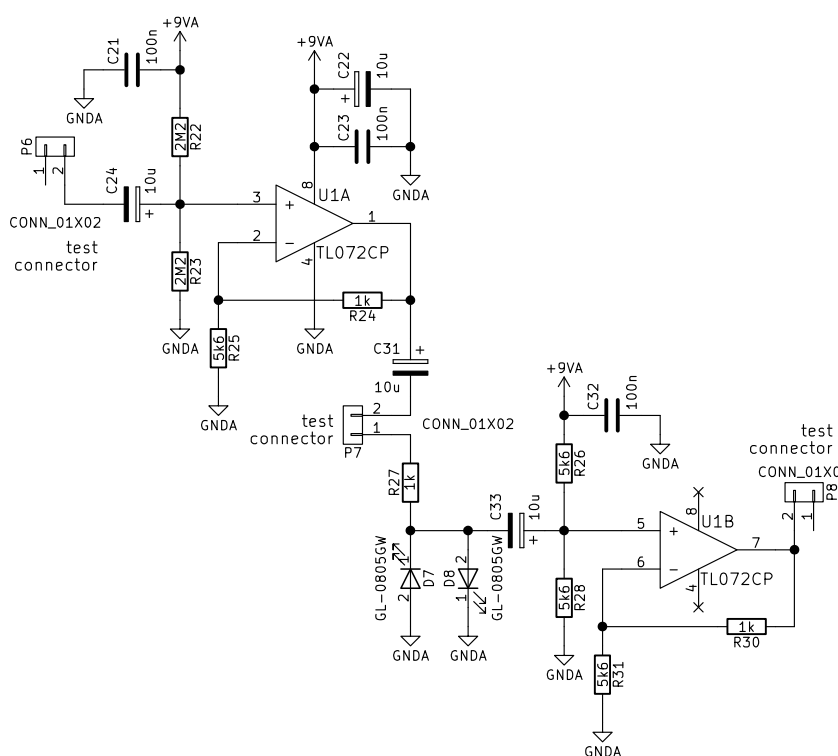
4.2 Vstupní obvody

Vstupní obvody mají za úkol impedančně přizpůsobit vstup pro elektrofonickou kytaru, zesílit vstupní signál pro další zpracování a zajistit ochranu audio kodeku proti přepětím, jež mohou vzniknout např. bude-li multieffektu předřazena jiná efekťová jednotka nebo bude-li ke vstupu připojena kytara osazená snímači s příliš vysokým výstupem. Schéma vstupních obvodů je znázorněno na obrázku 11.

Nástrojový vstup multieffektu je realizován audio konektorem jack 6,3 mm mono, který se v podobných aplikacích zcela běžně používá. Výhodou je, že kromě připojení elektrofonické kytary umožňuje připojení i jiných typů nástrojů pomocí standardní kabeláže. Za vstupem multieffektu následuje vazební kondenzátor C24 a odporový dělič z rezistorů R22 a R23. Tento dělič impedančně přizpůsobuje vstup multieffektu a zároveň napěťově posouvá signál z elektrofonické kytary tak, aby bylo možné zesílit obě polarity vstupního signálu pomocí jednostranně napájeného operačního zesilovače U1A. Ochrana proti přepětí je realizována rezistorem R27 a dvojicí LED diod D7 a D8. Při osazení LED diod GL-0805GW obvod limituje signál při napětí přibližně 4,2 V_{pp}. Rezistor R27 spolu s rezistory R26 a R28 tvoří napěťový dělič, který snižuje rozkmit vstupního signálu. Tento dělič je však nutný pro napěťové posunutí signálu tak, aby bylo možné zesílit obě

jeho polarity. Z výsledků měření provedených v kapitole 2 je patrné, že signál kytary má rozkmit vhodný pro zpracování použitým audio kodekem bez nutnosti signál zesilovat nebo zeslabovat. Proto je zisk obou zesilovačů nastaven tak, aby vstupní obvody měli zesílení rovné 1. Výpočet celkového zesílení vstupních obvodů je patrný ze vztahu 3 (pozn. je zanedbán vliv vstupního děliče a vazebních kapacit).

$$(3) \quad A_{U1A} + A_D + A_{U1B} = \left(1 + \frac{R_{24}}{R_{25}}\right) \frac{R_{27} \frac{R_{26} R_{28}}{R_{26} + R_{28}}}{R_{27} + \frac{R_{26} R_{28}}{R_{26} + R_{28}}} \left(1 + \frac{R_{30}}{R_{31}}\right) = \left(1 + \frac{1}{5,6}\right) \frac{1,2,8}{1+2,8} \left(1 + \frac{1}{5,6}\right) = 1,02$$

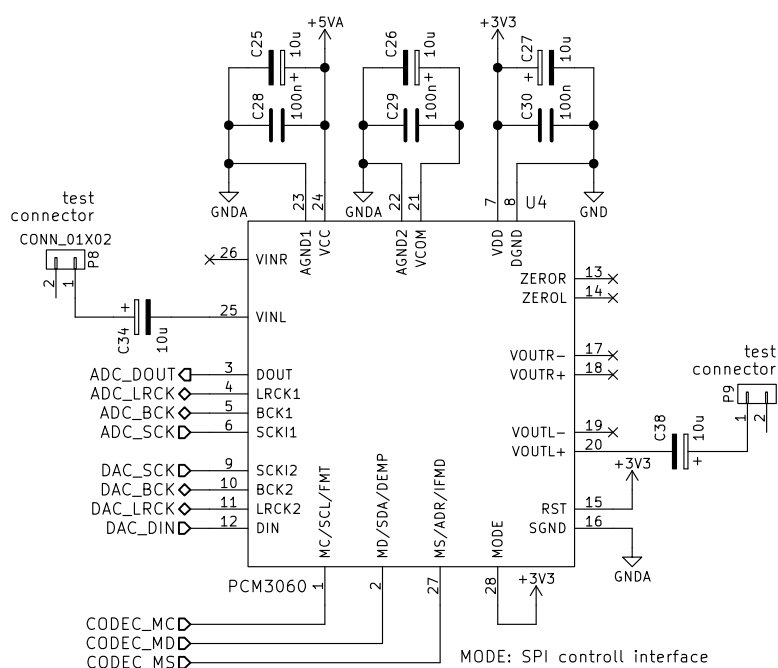


Obr. 11 - Vstupní obvody multieffektu

Aby se zamezilo vniku VF rušení do audio signálu, jsou k napájení napěťových děličů i operačního zesilovače připojeny blokovací kondenzátory o kapacitě 100 nF. Pro možnost hledání chyb a měření parametrů vstupních obvodů na prototypu multieffektu jsou jednotlivé funkční části odděleny pomocí propojek P6, P7 a P8. Propojka P6 připojuje nástrojový vstup ke vstupním obvodům a propojka P8 propojuje vstupní obvody s audio kodekem.

4.3 Audio kodek

Audio kodek má za úkol převod analogového signálu elektrofonické kytary do číslicové podoby a následně převod signálu generovaného MCU z podoby číslicové do analogové. Zapojení audio kodeku PCM3060 vychází z katalogového listu, viz obrázek 12. Vzhledem k aplikaci není použit kodek v konfiguraci pro zpracování stereo signálu, ale je použit pouze levý audio kanál pro vstup i výstup. Podle doporučení výrobce obvodu je vstup i výstup pravého kanálu nezapojen.

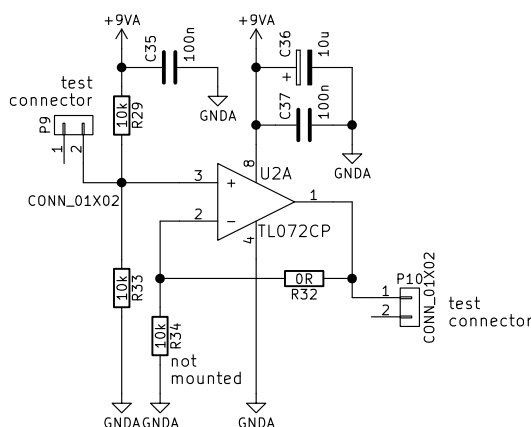


Obr. 12 - Audio kodek

Pomocí propojky P8 jsou připojeny vstupní obvody ke vstupu audio kodeku a propojkou P9 je připojen výstup kodeku k obvodům výstupním. Kodek vyžaduje oddělené napájení 3,3 V DC pro digitální část a 5 V DC pro část analogovou. Opět jsou zde zapojeny 100 nF blokovací kondenzátory, aby se zamezilo vniknutí VF rušení do signálové cesty, navíc jsou podle doporučení výrobce doplněny elektrolytickými kondenzátory 10 uF pro omezení vlivu NF rušení na zpracováváný signál. Připojením pinu MODE k napájecímu napětí 3,3 V DC bylo nastaveno, že konfigurace audio kodeku probíhá pomocí rozhraní SPI. Komunikace s ADC i DAC s MCU probíhá pomocí dvojice na sobě nezávislých I2S rozhraní.

4.4 Výstupní obvody

Hlavním úkolem výstupních obvodů je odstranění vyšších frekvenčních složek ze spektra signálu, který je na výstupu DAC audio kodeku. Výstupní obvody lze vzhledem k jejich funkci rozdělit na dvě části. První částí je výstupní buffer (obrázek 13) a částí druhou je rekonstrukční filtr (obrázek 14).



Obr. 13 - Výstupní buffer

Výstupní buffer má za úkol impedančně přizpůsobit vysokoimpedanční výstup DAC audio kodeku pro vstup rekonstrukčního filtru. Pomocí propojky P9 je výstup DAC audio kodeku připojen ke vstupu výstupního bufferu a pomocí propojky P10 je výstup bufferu propojen se vstupem rekonstrukčního filtru. Napěťový dělič z rezistorů R29 a R33 posouvá napěťově signál z audio kodeku tak, aby jej bylo možné dále zpracovat pomocí jednostranně napájených operačních zesilovačů U2 a U3. Ze schématu na obrázku 13 je patrné, že se jedná o neinvertující zesilovač, ale protože není osazen rezistor R34 a zpětnovazební rezistor R32 je nahrazen SMD propojkou, je zesílení tohoto zesilovače rovné 1 (viz vztah 4). Obvod tedy pracuje jako napěťový sledovač. Toto řešení však umožňuje nastavit zesílení výstupních obvodů v případě, že by bylo potřeba zesílit výstupní signál z DAC audio kodeku pro další zpracování.

$$(4) \quad A_u = 1 + \frac{R_{32}}{R_{34}} = 1 + \frac{0}{\infty} = 1$$

Hlavním úkolem rekonstrukčního filtru je odstranit ze spektra výstupního signálu vyšší harmonické, jež by mohly způsobit vznik intermodulačního zkreslení v kytarovém zesilovači, kterému bude multieffekt předřazen.

Na začátku návrhu bylo zvoleno, že filtr bude postaven na základě tří operačních zesilovačů v zapojení Sallen Key a bude realizovat dolní propust šestého řádu s Chybeshevovou aproximací dosahující zvlnění K_p 3 dB v propustném pásmu. Dále bylo rozhodnuto, že mezní kmitočet f_p navrhované dolní propusti bude 24 kHz a na kmitočtu f_s 28 kHz bude filtr dosahovat útlumu K_s 10 dB. Tyto hodnoty byly zvoleny proto, aby filtr nedegradoval signál ve slyšitelném pásmu, což může být důležité u některých typů efektů. Poté byly zvoleny hodnoty kondenzátorů tak, aby se jmenovitý odpor rezistorů v zapojení na obrázku 14 pohyboval řádově v jednotkách k Ω . Rezistory totiž nesmějí mít příliš nízký jmenovitý odpor proto, aby se nepřetěžoval výstup použitých operačních zesilovačů. Naopak příliš vysoká hodnota odporu může degradovat signál z hlediska šumu. Návrh dále probíhal podle výpočtu popsaného níže. [3] [17] [18] [21]

$$(5) \quad R_{35} = \frac{a_1 C_{41} + \sqrt{a_1^2 C_{41}^2 - 4 b_1 C_{44} C_{41}}}{4 \pi f_p C_{44} C_{41}} = \dots = 5728,55 \Omega$$

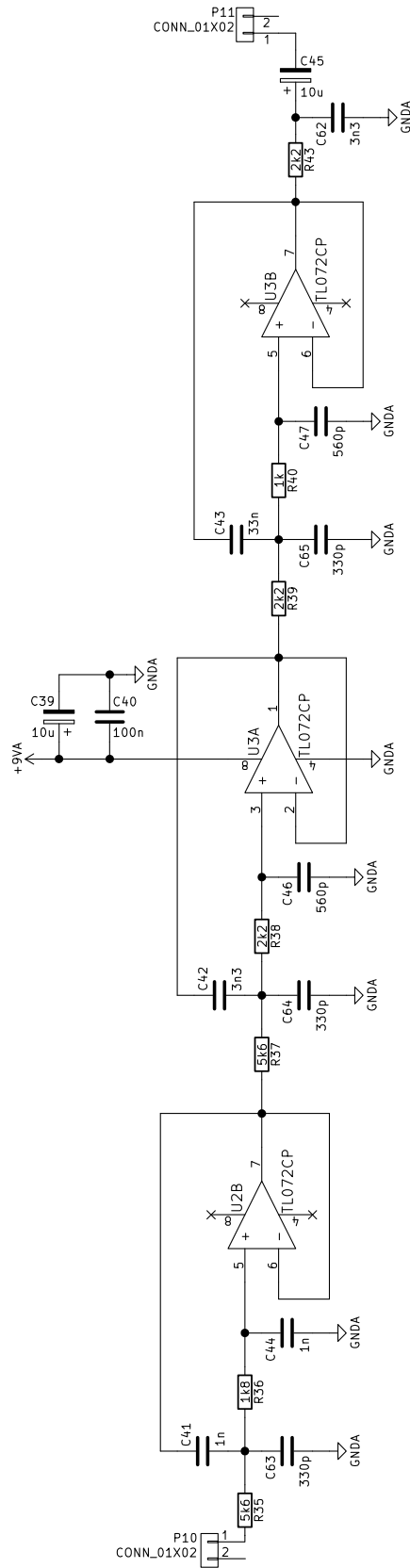
$$(6) \quad R_{36} = \frac{a_1 C_{41} - \sqrt{a_1^2 C_{41}^2 - 4 b_1 C_{44} C_{41}}}{4 \pi f_p C_{44} C_{41}} = \dots = 1760,95 \Omega$$

$$(7) \quad R_{37} = \frac{a_2 C_{46} + \sqrt{a_2^2 C_{46}^2 - 4 b_2 C_{42} C_{46}}}{4 \pi f_p C_{42} C_{46}} = \dots = 5567,86 \Omega$$

$$(8) \quad R_{38} = \frac{a_2 C_{46} - \sqrt{a_2^2 C_{46}^2 - 4 b_2 C_{42} C_{46}}}{4 \pi f_p C_{42} C_{46}} = \dots = 2678,47 \Omega$$

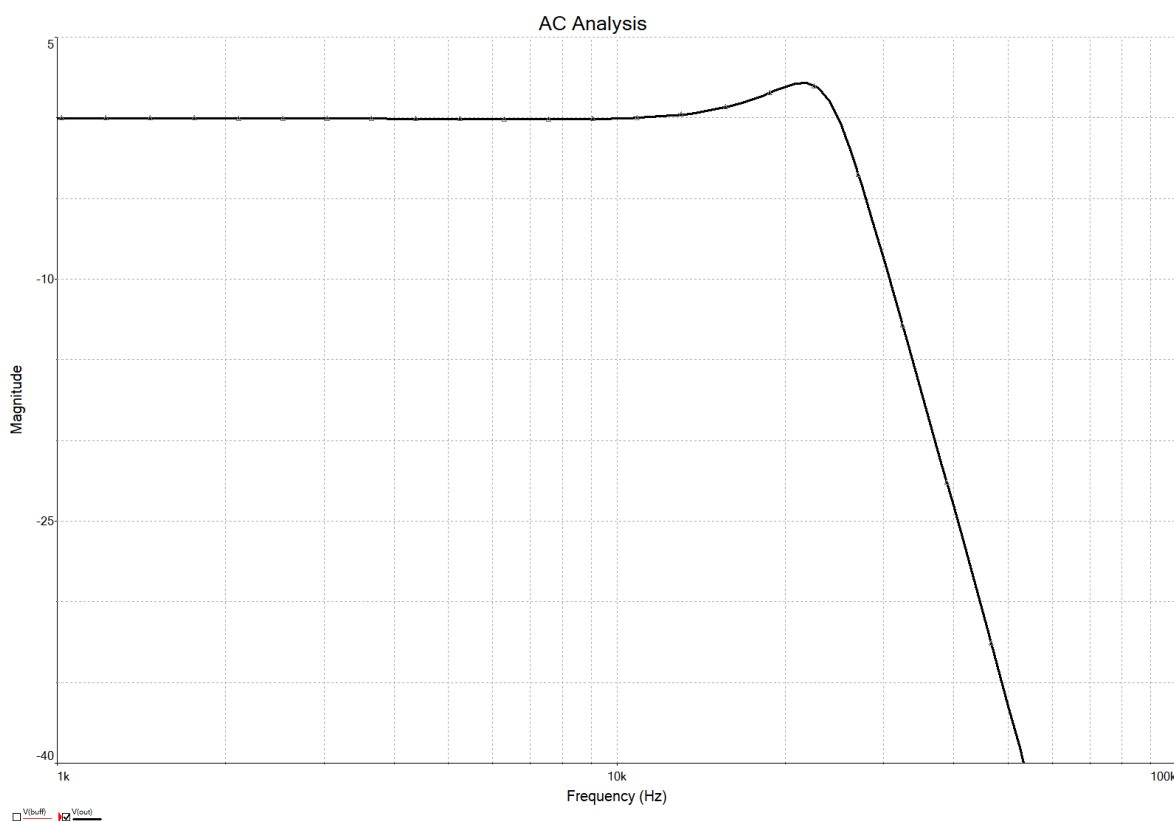
$$(9) \quad R_{39} = \frac{a_3 C_{47} + \sqrt{a_3^2 C_{47}^2 - 4 b_3 C_{43} C_{47}}}{4 \pi f_p C_{43} C_{47}} = \dots = 2187,32 \Omega$$

$$(10) \quad R_{40} = \frac{a_3 C_{47} - \sqrt{a_3^2 C_{47}^2 - 4 b_3 C_{43} C_{47}}}{4 \pi f_p C_{43} C_{47}} = \dots = 931,36 \Omega$$



Obr. 14 - Rekonstrukční filtr

Na základě výpočtů byly zvoleny nejbližší jmenovité hodnoty z elektrotechnických řad hodnot a byla provedena simulace zapojení filtru, z níž byly získány frekvenční charakteristiky filtru. Ukázalo se, že navržený filtr při přechodu z propustného do blokujícího dosahuje vyššího zvlnění, než bylo stanoveno. Proto bylo zapojení modifikováno a doplněno a kondenzátory C63, C64 a C65 a dále rozšířeno o jednoduchý filtr typu dolní propust na výstupu realizovaný pasivním RC článkem (R53 a C62). Výsledné zapojení rekonstrukčního filtru je znázorněno na obrázku 14. Výsledky simulace tohoto zapojení jsou k vidění na obrázku 15. Takový filtr již vyhovuje účelu rekonstrukce kytarového signálu.

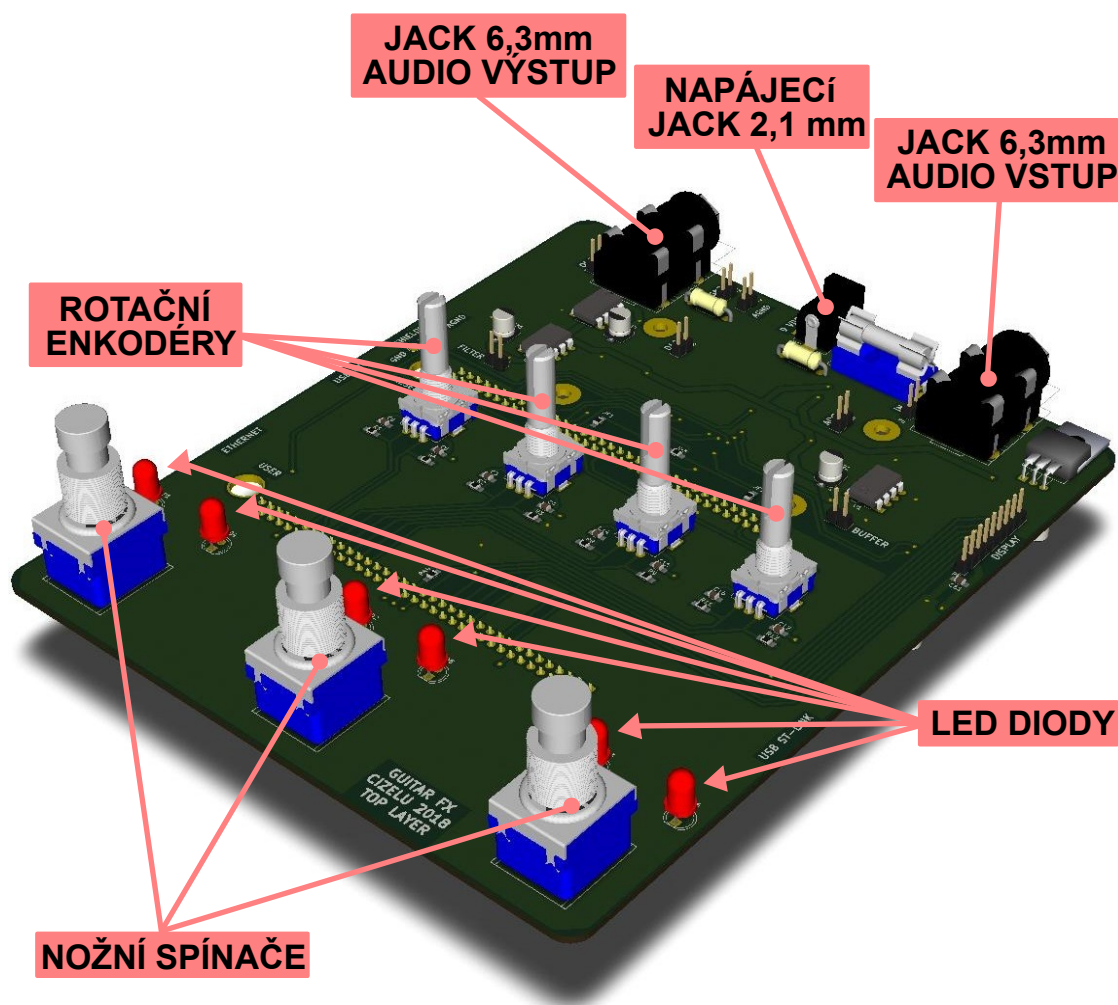


Obr. 15 - Frekvenční charakteristika navrženého filtru (simulace)

Kromě střídavé analýzy pro zjištění frekvenční parametrů navrženého filtru byla provedena i tranzientní analýza, kde byl zkoumán výstup filtru při buzení vstupu obdélníkovým signálem o různých amplitudách. Tato analýza ukázala, že by simulované zapojení mělo být stabilní a nemělo by dojít k limitaci signálu ani při plném rozkmitu výstupu DAC uvnitř audio kodeku.

4.5 Ovládací obvody

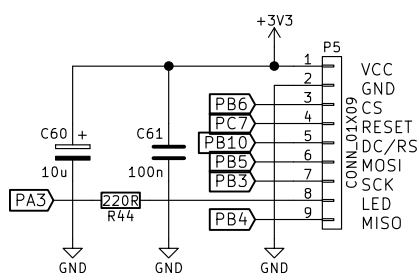
K tomu, aby bylo možné s multieffektem v reálných podmínkách pracovat, tedy vypínat a zapínat jednotlivé efekty, měnit jejich typ a nastavovat jejich parametry, je multieffekt doplněn o prvky umožňující interakci s uživatelem. Je důležité, aby se s multieffektem dalo jednoduše a rychle pracovat, zejména pokud bude využit při vystoupení nebo zkoušce hudebního uskupení. Proto byl při návrhu brán zřetel na to, aby ovládání multieffektu nebylo příliš komplikované, aby bylo jednoduché a intuitivní. Rozmístění ovládacích prvků, konektorů a dalších klíčových komponent je patrné z obrázku číslo 16 (pozn. na obrázku není vykreslen LCD zobrazovač, který není integrální součástí navržené DPS).



Obr. 16 - Navržený plošný spoj (3D pohled)

Na zadní straně multieffektu jsou po stranách umístěny konektory jack 6,3 mm sloužící k zapojení multieffektu do signálové cesty mezi elektrofonickou kytaru a nástrojový zesilovač. Na zadní straně multieffektu je také umístěn napájecí konektor jack 2,1 mm.

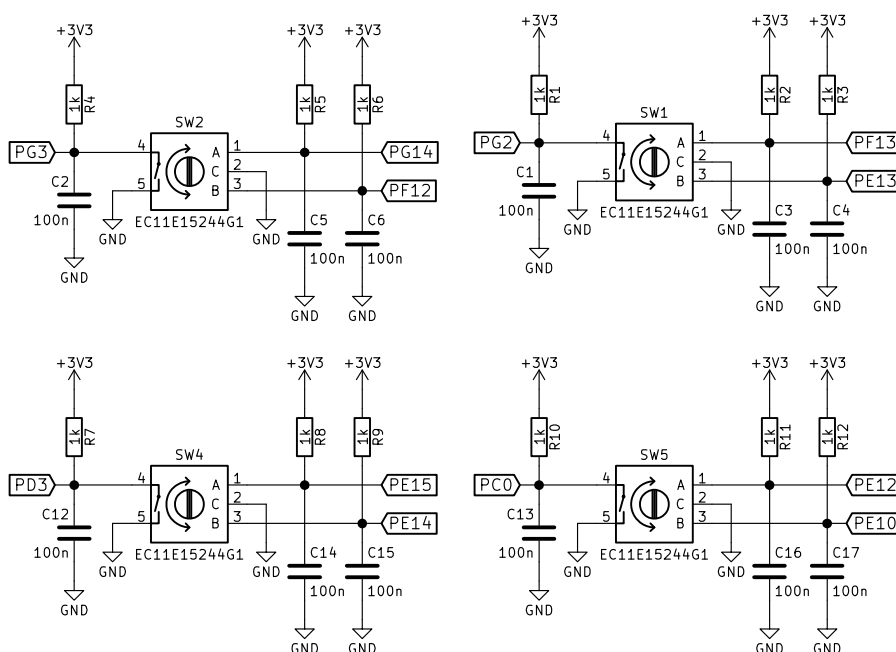
Aby uživatel mohl přehledně pracovat s nastavením multieffektu, je jeho součástí bezdotykový LCD zobrazovač s úhlopříčkou 2,2 palce a rozlišením 240x320 pixelů. Na LCD zobrazovači je osazen řadič ILI9341, který umožňuje komunikaci po rozhraní SPI. Zapojení tohoto displaye je znázorněno na obrázku 17. Na display se vypisují informace o nastavených efektech, případně detaily o konkrétním nastavení daného efektu či informace o celkovém nastavení multieffektu.



Obr. 17 - Schéma konektoru pro připojení LCD zobrazovače

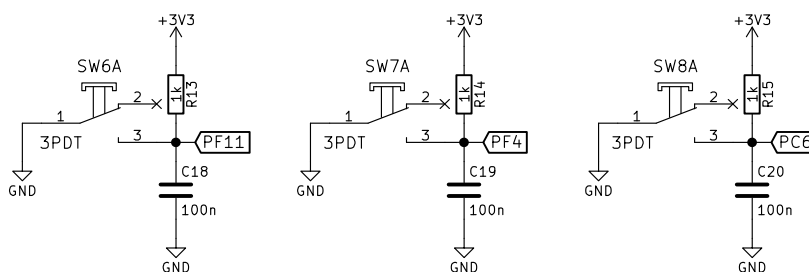
Pod LCD zobrazovačem jsou osazeny čtyři rotační enkodéry s integrovaným tlačítkem. Ty umožňují měnit nastavené efekty a jejich parametry. Zapojení enkodérů je znázorněno na obrázku 18.

Po připojení multieffektu k napájení se na LCD zobrazovač vykreslí hlavní obrazovka. Stisknutím některého z enkodérů se zobrazí nastavení příslušného efektu, případně celého multieffektu. Otáčením jednotlivými enkodéry lze následně měnit typ efektu a jeho parametry. I v tomto menu lze využít enkodérů jako tlačítek. Po stisknutí prvního enkodéru dojde k uložení nastavených parametrů do flash paměti MCU a vykreslí se opět hlavní obrazovka. Stisknutím druhého a třetího enkodéru je možné listovat obrazovkami nastavení daného efektu. Pokud dojde ke stisknutí čtvrtého enkodéru, opustí se obrazovka nastavení efektu, resp. multieffektu, a zobrazí se opět hlavní obrazovka s přehledem nastavených efektů.

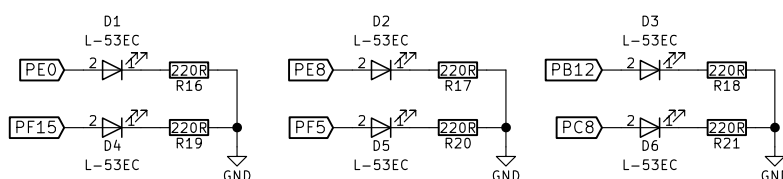


Obr. 18 - Připojení enkodérů k MCU

Dále je na spodní straně multieffektu osazena trojice robustních nožních přepínačů. Ty slouží k aktivování/deaktivování nastavených efektů při hraní, kdy hudebník nemá k dispozici volné ruce. Informaci o tom, který efekt je právě aktivní hudebníkovi kromě LCD zobrazovače poskytuje šestice LED diod. Aby je bylo možné použít i pro další účely (např. zobrazení nastavení času u efektu delay), jsou připojeny přímo k vývodům MCU.



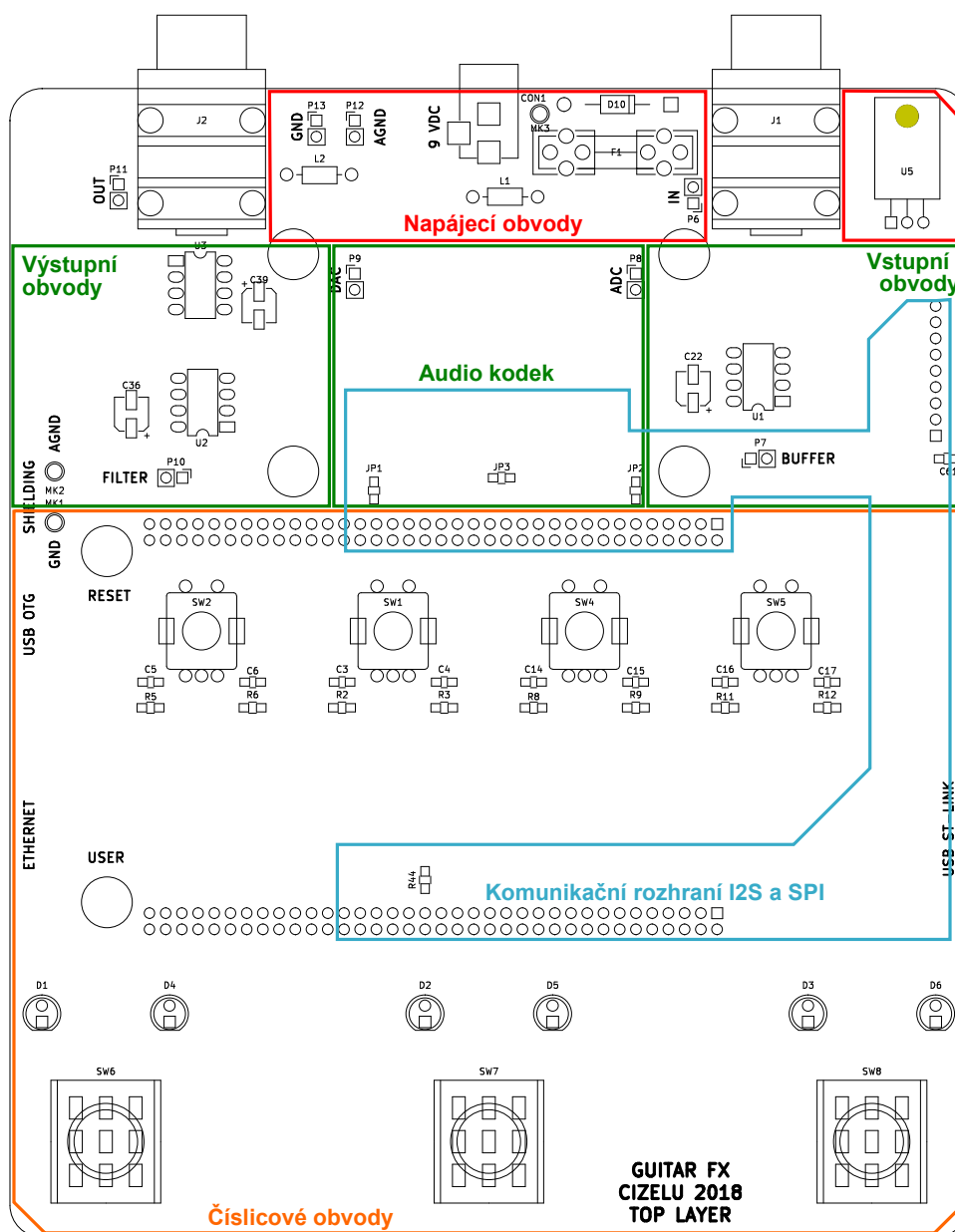
Obr. 19 - Připojení nožních spínačů k MCU



Obr. 20 - Připojení LED diod k MCU

5 Konstrukce multieffektu

Pro návrh zapojení i desky plošných spojů byl použit návrhový systém KiCad EDA. Ideální by bylo, kdyby byl multieffekt konstruován s pomocí čtyřvrstvého plošného spoje, ale vzhledem k finančním možnostem bylo rozhodnuto, že multieffekt bude konstruován na plošném spoji dvouvrstvé. Při návrhu plošného spoje byl brán ohled na minimalizaci možnosti vniku rušení a zemních smyček.



Obr. 21 - Rozmístění základních bloků na DPS multieffektu

5.1 Rozmístění součástek a signálů

Rozmístění součástek na plošném spoji bylo ovlivněno vazbou na design zařízení, který je do velké míry uzpůsoben pro pohodlné a intuitivní ovládání. Mimo jiné také bylo nutné brát v potaz možnost uchycení plošného spoje do šasi multieffektu tak, aby byla zajištěna dostatečná mechanická odolnost (podrobněji viz kapitola 5.3).

Z obrázku 21 je patrné, že základní deska multieffektu byla rozdělena na digitální, analogovou a napájecí část. Jednotlivé části jsou od sebe odděleny jak z hlediska napájení (viz kapitola 4.1), tak plochami rozlité mědi. Toto řešení snižuje možnost přenosu rušení do analogových obvodů. Dalším důležitým opatřením pro snížení rušení je také umístění komunikačních sběrnic. Ty sice vedou k audio kodeku, čímž se přibližují i k analogovým obvodům, ale to je nutné pro vlastní funkci zařízení. Aby se zamezilo přenosu rušení, jsou sběrnice vedeny v co největší možné vzdálenosti od analogových obvodů a od ostatních signálů jsou odděleny zemními plochami nebo alespoň zemními vodiči. [38]

5.2 Rozvod napájení a zemnění

V kapitole 5.3 bylo popsáno rozdělení napájení pro číslicové a analogové obvody. Toto opatření však může pozbýt významu, pokud by se pokazil návrh plošného spoje z hlediska provedení napájení. Proto byla provedena následující opatření.

V části plošného spoje, kde jsou umístěné digitální obvody, bylo napájení realizováno pomocí polygonů (tzv. rozlité mědi). Na vrchní straně plošného spoje je vrstva s potenciálem 3,3 V DC a na spodní straně plošného spoje je vrstva s potenciálem země pro číslicové obvody. Toto řešení má pozitivní vliv na parazitní indukčnosti vodivých spojů, čímž minimalizuje zvlnění napájecího napětí vlivem impulzního proudového odběru digitálních obvodů. Navíc toto řešení pomáhá vytvořit deskový kondenzátor mezi oběma vrstvami, což napomáhá filtraci VF rušení. [38]

V části analogových obvodů je na obou stranách desky rozlita měď s potenciálem země pro napájení analogových obvodů. Kladné napájení bylo realizováno tzv. paprskovým rozvodem, kdy je ke každému klíčovému prvku (v tomto případě

k operačním zesilovačům a audio kodeku) vedeno napájení ze společného bodu, který se nachází v napájecí části multieffektu. Toto řešení je výhodné z důvodu, že zemní plocha pomáhá minimalizovat přeslechy mezi vodiči a také částečně funguje jako stínění proti rušení. [38]

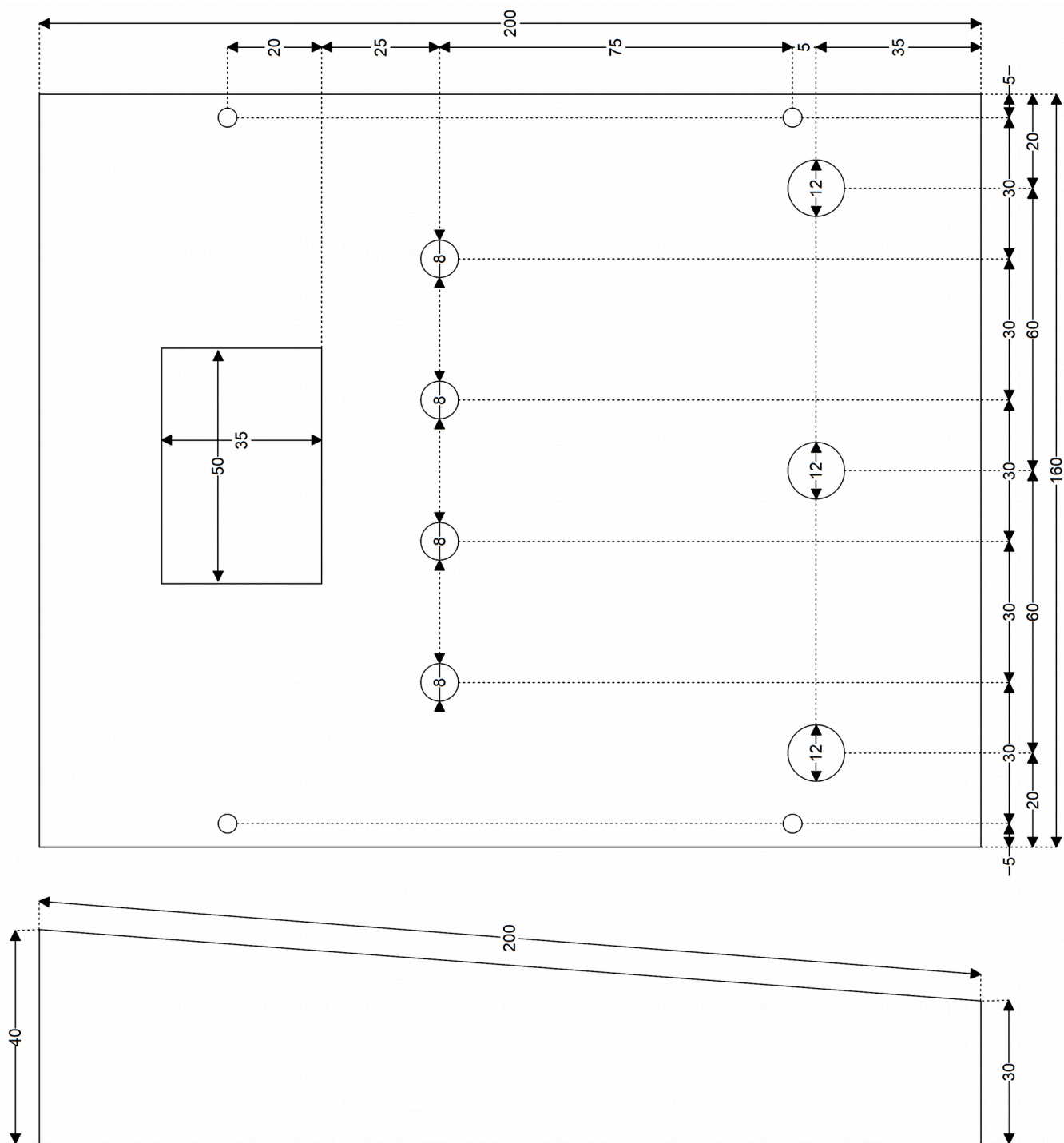
5.3 Mechanická konstrukce a šasi

Multieffekt se skládá z trojice plošných spojů - z LCD zobrazovače, základní desky multieffektu a vývojového kitu. Display je připevněn k multieffektu pomocí čtyř distančních sloupků se závity M3 a pomocí plochého kabelu je připojen k základní desce multieffektu. Vývojový kit je připojen k základní desce pomocí signálových konektorových lišt. Ty mimo propojení elektrických signálů zajišťují i dostatečné mechanické upevnění kitu k základní desce.

Jak bylo zmíněno výše, předpokládá se, že multieffekt bude při nasazení ovládan nohou hudebníka. Při návrhu plošného spoje i šasi tedy bylo nutné vymyslet, jak plošný spoj k šasi uchytit tak, aby nedocházelo k přenosu sil na plošný spoj. To by totiž způsobovalo mechanické deformace, které by po čase užívání mohly zavinit porušení pájených spojů součástek. Proto je k šasi plošný spoj připevněn pomocí nožních spínačů a konektorů Jack 6,3 mm. To zajišťuje, že na plošný spoj nebudou působit mechanické síly při ovládní nohou, ale ani při zapojování/odpojování multieffektu z/do audio řetězce elektrofonické kytary.

Aby byl efekt stabilní a nepřevracel se při ovládní nohou, je důležité, aby bylo šasi co nejnižší. Proto byl plošný spoj navržen tak, aby byl vývojový kit a LCD zobrazovač co nejbližší zadní části. To umožňuje udělat nižší přední část šasi a snížit tak pravděpodobnost převrácení multieffektu při sešlápnutí nožních spínačů. Tento tvar je navíc výhodný i z důvodu lepší čitelnosti displaye při vystoupení a lepší ergonomičnosti multieffektu v domácím studiu, kdy multieffekt bude s největší pravděpodobností umístěn na stole. Náčrt šasi multieffektu je znázorněn na obrázku 22. Vlastní šasi bylo vyrobeno z pozinkovaného plechu o tloušťce 2 mm, z něhož byly ohnuty dva profily ve tvaru písmene U. Ty byly sešroubovány proti sobě pomocí šroubů M3. Toto řešení je dostatečně odolné, aby se nedeformovalo pod vahou hudebníka a nehrozilo tak poškození plošného spoje

uvnitř. Šasi kromě mechanické odolnosti multieffektu zajišťuje i stínění obvodů před elektromagnetickým rušením a proto je elektricky připojeno k zemnímu potenciálu co nejbližší napájecího vstupu. [38]



Obr. 22 - Náčrt šasi multieffektu

6 Software multiefektu

Program pro MCU STM32F767ZI osazeném na použitém vývojovém kitu Nucleo byl napsán v jazyce C s využitím knihoven CubeMX přímo od výrobce procesoru ST Microelectronics. Pro psaní kódu i ladění programu bylo využito vývojové prostředí Atollic TrueSTUDIO for STM32 9.0.0. Napsaný program zajišťuje inicializaci MCU, audio kodeku a LCD zobrazovače. Dále připravuje univerzální rozhraní, nad kterým je možné realizovat audio efekty.

V rámci inicializace jsou nastaveny jednotky PLL, UART, SPI, SAI, GPIO a DMA. PLL jednotka je nastavena tak, aby jádro procesoru pracovalo na maximální frekvenci 216 MHz a aby byly generovány taktovací signály o patřičné frekvenci pro dosažení požadovaných komunikačních rychlostí na použitých komunikačních rozhraní. Pomocí periferie UART je zajištěn výpis informací o stavu multiefektu. Přes rozhraní SPI je inicializován audio kodek a dále je přes něj ovládán LCD zobrazovač. Periferie SAI zajišťuje komunikaci s audio kodekem pomocí rozhraní I2S, která je řízena DMA řadičem.

Rozhraní pro práci s efekty je umožněno pomocí tří globálních datových struktur, do nichž se předávají informace o použitém efektu a jeho parametrech. V závislosti na jedinečném ID efektu je v každém průchodu cyklu hlavní smyčky proveden jeden krok výpočtu aktivního efektu. Kromě výpočtu efektu je součástí hlavní smyčky programu také čítač průchodu cyklů. Ten slouží k řízení stavového automatu, který obsluhuje nožní spínače, enkodéry, LED diody a LCD zobrazovač. Toto řešení bylo zvoleno proto, aby nedocházelo k přetěžování procesoru vlivem obsluhy všech periférií při každém průchodu hlavní smyčkou.

V současné verzi SW není realizován žádný audio efekt, ale pouze tzv. transparentní režim. V tomto režimu dochází k převodu vstupního analogového signálu do číslicové podoby a zpět do analogové bez jakékoliv úpravy či zásahu. Jedná se o režim vhodný pro stanovení vlastností a parametrů navrženého řešení.

7 Kytarové efekty

Vývoj kytarových efektů šel ruku v ruce s vývojem kytarových zesilovačů, a tak se již ve třicátých letech bylo možné setkat s prvními kytarovými efekty, zpravidla realizovanými pomocí elektromechanických systémů. S dalším vývojem elektroniky se začalo od elektromechanických efektů upouštět. Překotný vývoj v této oblasti umožnil právě objev a rozšíření tranzistorů v šedesátých letech a v letech sedmdesátých i objev a rozšíření operačních zesilovačů ve formě monolitických integrovaných obvodů. [11] [12]

V dnešní době je k dispozici nepřeborné množství kytarových efektů od různých výrobců. Lze se setkat s efekty postavených čistě na analogových obvodech, tak i s efekty založených čistě na DSP platformě, případně na SW efektech, jež jsou často součástí různých nahrávacích programů. HW realizované efekty dnes mohou mít podobu kompaktních elektronických pedálů, multieftů nebo rackových modulů. [11] [12]

Zpravidla se efekty v audio řetězci elektrofonické kytary řadí tak, aby na začátku řetězce byly efekty zkreslení (např. overdrive nebo distortion), následovaly modulační efekty (např. chorus nebo flanger) a zakončovaly je efekty dozvuku (např. delay nebo reverb). [11] [12]

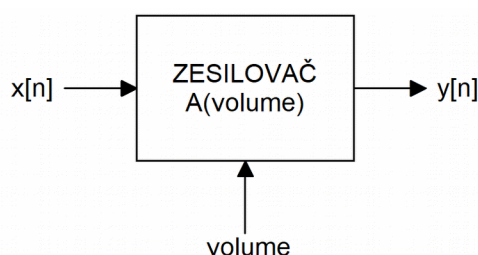
7.1 Efekty zkreslení

Efekty zkreslení mají za úkol upravit kytarový signál tak, aby výsledný signál byl podobný signálu, jež by vznikl při přebuzení kytarového zesilovače původním signálem. Zpravidla tyto efekty mají velmi jednoduché a tedy i levné obvodové řešení. Proto dodnes dominují v této oblasti analogové obvody. [19]

Boost

Efekty typu boost jsou obvodově nejjednoduššími efekty. Jejich úkolem není nic jiného, než zesílit původní signál bez vzniku zkreslení. Tento typ efektu se nejčastěji používá buď pro skokovou změnu hlasitosti nástroje nebo pro zesílení signálu na úroveň, která přebudí kytarový zesilovač, čímž hudebník získá požadované zkreslení. [5] [19]

Jak již bylo zmíněno, realizace tohoto typu efektu je velmi jednoduchá. Analogové efekty tohoto typu jsou zpravidla založeny na zesilovači s jedním tranzistorem nebo operačním zesilovačem. Jejich zisk se ovládá pomocí potenciometru s názvem Volume. Některé modely jsou vybaveny i tónovou clonou, která umožňuje jednoduchou ekvalizaci signálu. Ta se zpravidla ovládá potenciometrem s názvem Tone. Mezi zástupce těchto efektů patří efekt LPB-1 od výrobce Electro Harmonix, Super Hard On od výrobce ZVex nebo Effect EP Booster od výrobce Xotic. [5] [19]



Obr. 23 - Digitální realizace efektu boost

Z předešlého popisu efektu je patrné, že ani digitální realizace efektu boost není složitá, jak znázorňuje obrázek 23 a vztah 11. Vzorok vstupního signálu $x[n]$ je nutné pouze vynásobit konstantou odpovídající zesílení $A(volume)$, které je závislé na nastavení parametru $volume$. Tím se získají vzorky výstupního signálu $y[n]$.

$$(11) \quad y[n] = A(volume) x[n]$$

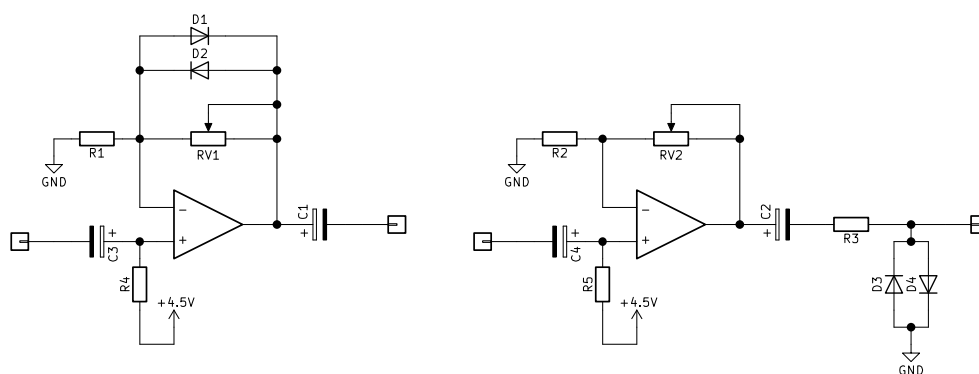
Overdrive, Distortion, Fuzz

Efekty typu overdrive, distortion nebo fuzz jsou schopny původní signál elektrofonické kytary nejen zesílit, jako tomu bylo u efektu typu boost, ale navíc umožňují původní signál zkreslit bez nutnosti přebuzovat nástrojový zesilovač. Toho se využívá pro rozšíření zvukových možností, které má muzikant k dispozici při vystoupení. Často se toho také využívá k získání zkresleného zvuku u aparátů, jež jej dosahují až při příliš velké hlasitosti [5] [19]

Effekt typu overdrive má za úkol, jak jeho název napovídá, simulovat zvuk přebuzeného elektronkového zesilovače. Analogová realizace tohoto efektu není příliš složitá, zpravidla se jedná o obvody postavené na základě jednoho nebo dvou operačních

zesilovačů. Typicky se zkreslení signálu vytváří pomocí diod zapojených ve zpětné vazbě operačního zesilovače v neinvertujícím zapojení. Tato metoda limitace signálu se označuje jako soft diode clipping, viz obrázek 24 (vlevo). Paralelně k diodám bývá zapojen potenciometr s názvem Gain pro možnost nastavení zisku zesilovače a tedy i míry zkreslení původního signálu. Efekty overdrive mají na výstupu další potenciometr pro regulaci hlasitosti efektu s názvem Volume. Některé modely jsou vybaveny i tónovou clonou, případně vícepásmovými korekcemi. Mezi zástupce těchto efektů patří např. efekt TS9 od výrobce Ibanez, OD1 od výrobce Boss nebo OCD V2 od výrobce Fulltone. [5] [19]

Effekt typu distortion má za úkol, jak jeho název napovídá, zkreslit signál elektrofonické kytary. Analogová realizace tohoto obvodu není příliš složitá, neboť jsou tyto efekty zpravidla založeny na jednom nebo dvou operačních zesilovačích, jako tomu je u efektů overdrive. Hlavní rozdíl mezi efektem overdrive a distortion však spočívá ve způsobu zkreslování původního signálu. Effekt typu distortion využívá ke zkreslení původního signálu antiparalelně zapojených diod proti zemi na výstupu neinvertujícího zesilovače. Tato metoda limitace signálu se označuje jako hard diode clipping, viz obrázek 24 (vpravo). Ve zpětné vazbě invertujícího zesilovače je umístěn potenciometr s názvem Gain, který slouží k nastavení zisku zesilovače a tedy i míry zkreslení původního signálu. Efekty distortion mívají na výstupu další potenciometr pro regulaci hlasitosti efektu s názvem Volume. Některé modely bývají navíc doplněny tónovou clonou nebo vícepásmovými korekcemi. Mezi zástupce těchto efektů patří např. efekt Rat od výrobce ProCo, Fat-Cat výrobce Ibanez nebo Guv'nor od výrobce Marshall. [5] [19]

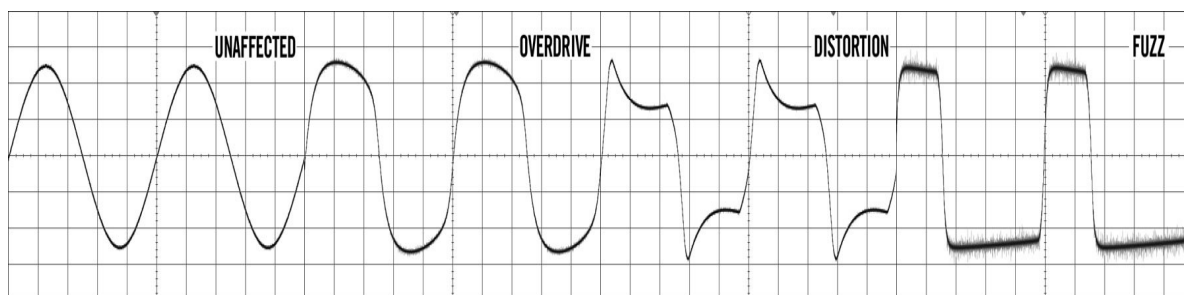


Obr. 24 - Soft diode clipping (overdrive) a Hard diode clipping (distortion)

Na obrázku 24 je principiální schéma efektů typu overdrive (vlevo) a distortion (vpravo). Kondenzátory C_1 až C_4 slouží jako vazební. Rezistory R_4 a R_5 slouží k posunu signálu do poloviny napájecího napětí (standardních 9 V DC). Rezistor R_3 chrání výstup operačního zesilovače v případě, že výstupní napětí operačního zesilovače překročí hodnotu prahového napětí diod D_3 a D_4 . U efektu distortion je zesílení dáno vztahem 12 bez ohledu na velikost vstupního napětí. Pokud signál překročí hodnotu prahového napětí diod D_3 a D_4 , dojde k jeho limitaci právě na hodnotu prahového napětí. Zesílení efektu overdrive pro signály o nižším napětí, než je prahové napětí diod, je dáno vztahem 12. Pokud je rozdíl napětí na vstupu a výstupu operačního zesilovače větší, než je prahové napětí diod, bude zesílení rovné 1. To se projeví omezením amplitudy výstupního signálu na hodnotu odpovídající amplitudě signálu vstupního.

$$(12) \quad A_u = 1 + \frac{RV_x}{R_x}$$

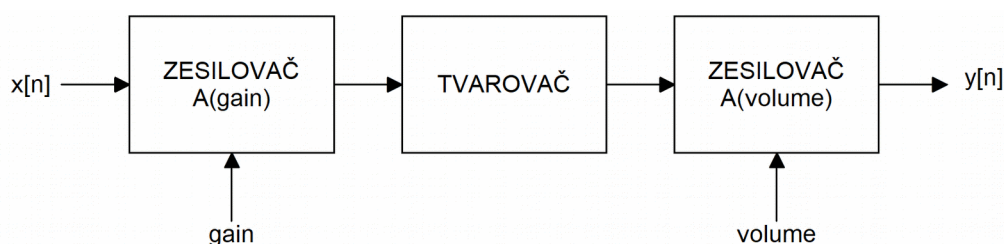
Efekt typu fuzz je svým způsobem specialita mezi zkreslujícími efekty. Mnoho hudebníků tvrdí, že tento efekt simuluje zvuk přebuzeného kytarového zesilovače s poškozeným reproduktorem. Analogová realizace efektu fuzz je poměrně jednoduchá, zpravidla se jedná o obvody postavené na základě dvou nebo tří tranzistorů, nejčastěji bipolárních. Efekty typu fuzz vytvářejí zkreslení dvěma způsoby. Prvním způsobem je nastavení pracovního bodu zesilovače s jedním tranzistorem tak, aby nepracoval v lineární oblasti převodní charakteristiky, což se projeví ořezem minimálně jedné půlvlny původního signálu. Druhý způsob, jak se v efektech typu fuzz tvoří zkreslení, je přebuzení zesilovacího stupně tvořeného jedním tranzistorem. K nastavení pracovního bodu nebo zisku tranzistorového stupně mající za úkol zajistit zkreslení signálu, slouží potenciometr Gain. Efekty fuzz mají na výstupu další potenciometr pro regulaci hlasitosti efektu s názvem Volume. Některé modely jsou vybaveny i tónovou clonou ovládanou pomocí potenciometru Tone. Mezi nejznámější zástupce efektu typu fuzz patří např. efektový pedál Fuzz Face od výrobce Dunlop nebo Big Muff od výrobce Electro Harmonix. [5] [19]



Obr. 25 - Porovnání časových průběhů signálů různých efektů, převzato s úpravami [6]

Na základě popisu funkce všech efektů se nabízí možnost digitální realizace, jejíž struktura je zachycena na obrázku 26, resp. ve vztahu 13. Vzorke vstupního signálu $x[n]$ jsou násobeny zesílením $A(\textit{gain})$. Dále jsou vzorky upraveny tvarovačem, což je blok realizující nelineární převodní charakteristiku zkreslujícího efektu. Lze si jej představit jako matematickou funkci, která dané vstupní hodnotě přiřadí danou výstupní hodnotu. Pro možnost korekce hlasitosti efektu jsou vzorky upravené tvarovačem vynásobeny zesílením $A(\textit{volume})$. Na výstup se tak dostanou vzorky výstupního signálu $y(n)$.

Nejsložitější částí realizace efektů zkreslení tímto způsobem je nalezení vhodné aproximace průběhu funkce pro tvarovací blok. Jeho funkce by při buzení signálem sinusového průběhu měla být co nejpodobnější průběhům znázorněným na obrázku 25, které byly získány měřením na reálných analogových obvodech. Úpravou tvarovací funkce lze pomocí struktury znázorněné na obrázku 26 dosáhnout dalších typů efektů a získat tak ještě širší zvukové možnosti. Důležité je mít na paměti, že takto realizovaný efekt není frekvenčně závislý. Pro simulaci frekvenčních závislostí je nutné před/za řetězec znázorněný na tomto obrázku doplnit číslicový filtr.



Obr. 26 - Digitální realizace efektů typu overdrive, distortion a fuzz

$$(13) \quad y[n] = A(\textit{volume}) f_{\textit{shaper}}(A(\textit{gain})x[n])$$

7.2 Modulační efekty

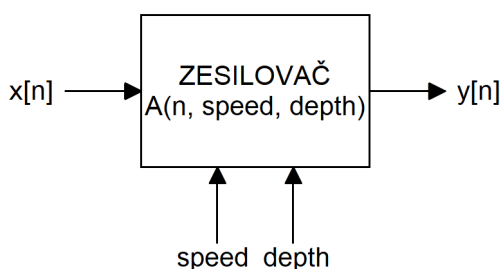
Modulační efekty upravují původní signál tak, že mění jeden nebo více jeho parametrů v závislosti na parametru jiném. V dnešní době v této oblasti dominují digitální obvody. To je dáno tím, že analogová realizace modulačních efektů zpravidla vyžaduje komplikovaná obvodová řešení často spojená s elektromechanickými systémy. [15] [16]

Tremolo

Efekt nazývaný tremolo je první typ kytarového efektu vůbec. Kytaristé, kteří v počátcích elektrofonické kytary vyměnili akustické klasické kytary za nástroje elektrofonické, měli pocit, že elektrofonická kytara nemá tak plný a uchu líbivý zvuk jako akustické nástroje. Snaha o odstranění tohoto nedostatku vedla právě ke vzniku tohoto typu efektu. Efekt tremolo pracuje tak, že na základě nízkofrekvenčního oscilátoru moduluje zesílení zesilovacího stupně, čímž se plynule a cyklicky mění hlasitost. [15] [37]

V dobách svého vzniku byl tento efekt realizován tak, že kmity nízkofrekvenčního oscilátoru modulovaly předpětí mřížky zesilovacích elektronek. Pokles tohoto předpětí má negativní vliv na putování elektronů směrem od katody k anodě elektronky, čímž se sníží zesílení daného zesilovacího stupně. V této podobě býval součástí kytarových zesilovačů, např. u modelu AC15 a AC30 od výrobce Vox, Deluxe Reverb od výrobce Fender nebo 1973x a 1974x od výrobce Marshall. V dnešní době jsou analogové efekty tremolo postaveny převážně na obvodech s optočleny. Princip funkce těchto obvodů je velmi jednoduchý. Pomocí pevného rezistoru a optočlenu je vytvořen napěťový dělič. LED dioda integrovaná v optočlenu je buzena pomocí nízkofrekvenčního oscilátoru, což způsobuje cyklické změny dělicího poměru napěťového děliče. Mezi zástupce optických tremolo efektů patří např. efekt Trelicopter od výrobce Mooer, Looker Optical Tremolo od výrobce Young Pedals nebo Tuna Melt od výrobce Danelectro. [15] [37]

Efekty tremolo starší konstrukce se ovládaly pomocí dvou potenciometrů, jeden nesl označení Speed a druhý Depth. Pomocí potenciometru Speed se nastavuje frekvence nízkofrekvenčního oscilátoru a pomocí potenciometru Depth se nastavuje hloubka modulace. Některé tremolo efekty novější konstrukce umožňují nastavit i tvar průběhu kmitů, jimiž se zesílení moduluje. [15] [37]



Obr. 27 - Digitální realizace efektu tremolo

Z předešlého popisu efektu je patrné, že ani digitální realizace efektu tremolo není složitá, jak znázorňuje obrázek 27 a vztah 14. Vzorčky vstupního signálu $x[n]$ je nutné pouze vynásobit konstantou odpovídající zesílení $A(n, speed, depth)$, které je časově závislé. Tím se získají vzorky výstupního signálu $y[n]$. Zesílení se mění v čase v závislosti na nastavení parametrů *speed* a *depth*.

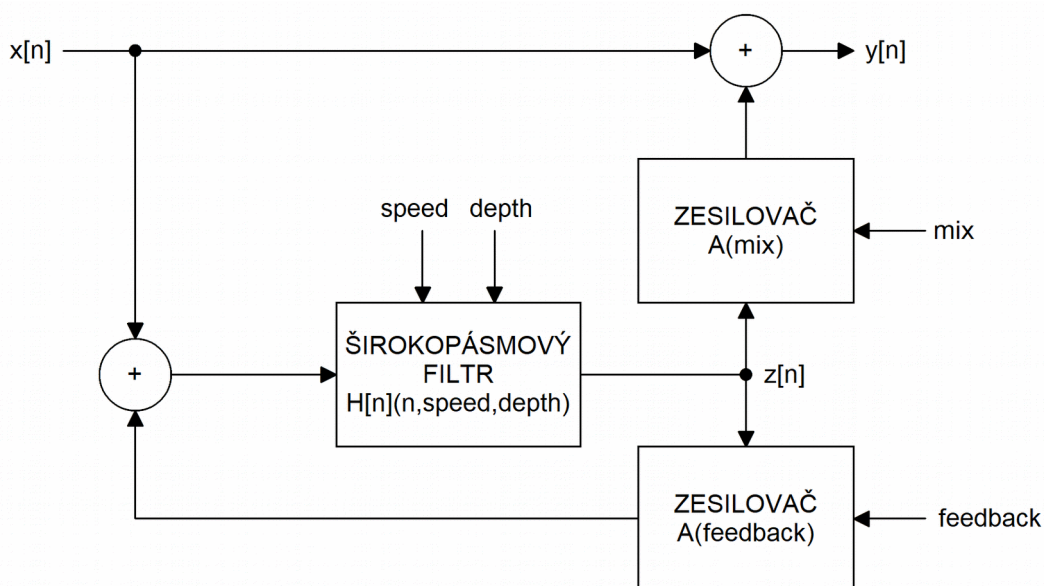
$$(14) \quad y[n] = A(n, speed, depth) x[n]$$

Phaser

Efekt typu Phaser vznikl při snaze vytvořit efekt umožňující získat zvuk podobný, jako produkovaly tzv. rotary speakers (rotující reproduktory). Tato zařízení pracují na principu odrazu zvuku uvnitř reprobedny s uzavřenou ozvučnicí. Reproduktor je uvnitř uchycen na speciálním závěsu poháněným elektromotorem místo toho, aby byl pevně přichycen k přední stěně reprobedny. Vlivem otáčení reproduktoru se mění místo odrazu zvuku, což se projeví modulací frekvenčního spektra a hlasitosti signálu. [15] [20]

Analogové obvody efektů typu phaser jsou postaveny na širokopásmových filtrech. Širokopásmový filtr (často označovaný také jako all-pass filtr) v propustném pásmu neovlivňuje amplitudu signálu, ale posouvá fázi signálu v závislosti na jeho frekvenci. Širokopásmové filtry se v efektech phaser řadí do kaskády, nejčastěji o čtyřech stupních. Další důležitou součástí efektů phaser je nízkofrekvenční oscilátor, který moduluje fázový posun širokopásmových filtrů. Důležité je, že lidské ucho není schopné vnímat změny fázového posunu. Pokud se však původní signál smíchá se signálem vzniklým průchodem kaskádou modulovaných širokopásmových filtrů, dojde ke vzniku slyšitelné interference a lze hovořit o vzniku efektu phaser. Z výše zmíněného popisu je patrné, že dosažení tohoto efektu pomocí analogových obvodů je poměrně složité. Ovládání phaseru je

standardně možné pomocí tří potenciometrů. Potenciometr Speed mění frekvenci kmitů nízkofrekvenčního oscilátoru, potenciometr Range mění hloubku modulace fázového zpoždění filtrů a potenciometr Mix mění poměr původního a zpožděného signálu na výstupu efektu. Různé efekty toto nastavení rozšiřují o další možnosti, jako je např. tzv. zpětná vazba. Ta spočívá v přivedení zpožděného signálu zpět na vstup kaskády širokopásmových filtrů. Potom se pomocí potenciometru Feedback nastavuje poměr původního a zpožděného signálu na vstupu kaskády filtrů. Mezi zástupce analogových efektů phaser patří např. Bad Stone Phase Shifter od výrobce Electro Harmonix, M101 Phase 90 výrobce MXR a VP1 Vintage Phaser od výrobce Behringer. [15] [20]



Obr. 28 - Digitální realizace efektu phaser

Z popisu principu funkce analogového phaseru je patrné, že pracuje se změnou fázového posunu vstupního signálu. Z toho vyplývá i největší úskalí realizace tohoto efektu digitálními obvody. Pro každou jedinou frekvenci je potřeba stanovit fázový posun a tento fázový posun je dále potřeba modulovat. Nelze tedy v tomto případě použít jednoduchou zpozdovací linku jako např. u efektů typu flanger a chorus, ale je nutné implementovat do systému impulzní odezvu širokopásmového filtru, jejíž parametry se navíc mění v závislosti na nastavení parametrů speed a depth v čase. Princip digitální realizace efektu phaser je znázorněn na obrázku 28, resp. vztahem 15.

Na vstup širokopásmového filtru je přiváděn součet vzorků vstupního signálu $x[n]$ a zpětnovazebního signálu $z[n]$, který je zeslaben v závislosti na zesílení $A(\text{feedback})$. Výstupní signál $y[n]$ je tvořen součtem vzorků původního signálu a vzorků na výstupu širokopásmového filtru $z[n]$, které jsou opět zeslabeny, tentokrát však v závislosti na zesílení $A(\text{mix})$.

$$(15) \quad y[n] = x[n] + A(\text{mix})z[n], \text{ kde } z[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} H[k-n](x[n] + A(\text{feedback})z[n])$$

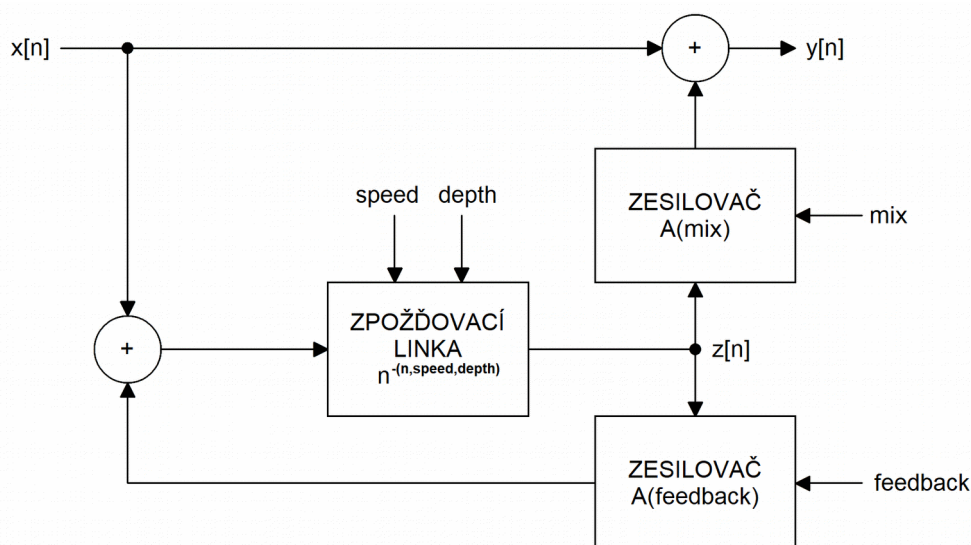
Flanger

Efekty typu flanger pracují na podobném principu jako efekty typu phaser. Rozdíl mezi těmito efekty spočívá v tom, že flanger namísto širokopásmového filtru používá zpožďovací linku k vytvoření zpoždění signálu. Zpoždění signálu je opět modulováno jako u efektu phaser. Největší rozdíl tedy spočívá v tom, že u efektu flanger jsou v daný okamžik všechny kmitočty zpožděny o stejný čas, zatímco u efektů phaser je pro každý kmitočet zpoždění v daném čase různé. [8] [15]

První efekt tohoto druhu byl vytvořen pomocí páskových magnetofonů. Princip funkce je založen na tom, že se původní signál zaznamenával na magnetofonový pásek, odkud se zpětně přehrává a míchá s původním signálem, přičemž se mění rychlost posuvu pásky. To způsobuje nejen zpoždění původního signálu, ale i jeho frekvenční rozladění vlivem změny rychlosti přehrávání. Změny zpoždění se dosahovalo dvěma způsoby. Prvním způsobem byl upravený napínací mechanismus pásky tak, aby napínací kladka v prostoru pomalu kmitala, což zavinilo zpomalování a zrychlování pohybu pásky. Druhým a méně častějším způsobem byla změna otáček motorku pohánějícího pásek. Efekty typu pásmový flanger byly velmi drahé, komplikované, a tak býval k dispozici jen v některých nahrávacích studiích. S rozmachem integrace polovodičových součástek se začaly objevovat integrované obvody, obsahující analogovou zpožďovací linku. To umožnilo realizaci těchto efektů v miniaturní podobě. Obvodové řešení tohoto efektu flanger v analogové podobě je však velmi komplikované, a proto v dnešní době dominuje digitální způsob realizace. Ovládání tohoto efektu je v podstatě shodné jako u efektu typu phaser. Mezi zástupce analogových efektů flanger lze zařadit např. efektový pedál Small

Clone od výrobce Electro Harmonix, M152 Micro Flanger od výrobce MXR nebo Minifooger Flanger od výrobce Moog. [8] [15]

Na obrázku 29 je znázorněna realizace efektu fypu flanger v číslicové podobě. Princip funkce je založen na digitální zpožďovací lince, jejíž zpoždění se časově mění v závislosti na parametrech *speed* a *depth*. Na vstup zpožďovací linky je přiváděn součet vzorků původního signálu $x[n]$ a již zpožděného signálu $z[n]$, který může být podle potřeby zesílen v závislosti na nastavení zesílení $A(\text{feedback})$. Výstupní signál $y[n]$ je poté dán součtem původního signálu a zpožděného signálu $z[n]$, který opět může být zesílen, tentokrát však v závislosti na nastavení zesílení $A(\text{mix})$. Matematický popis funkce flangeru vyjadřuje vztah 16.



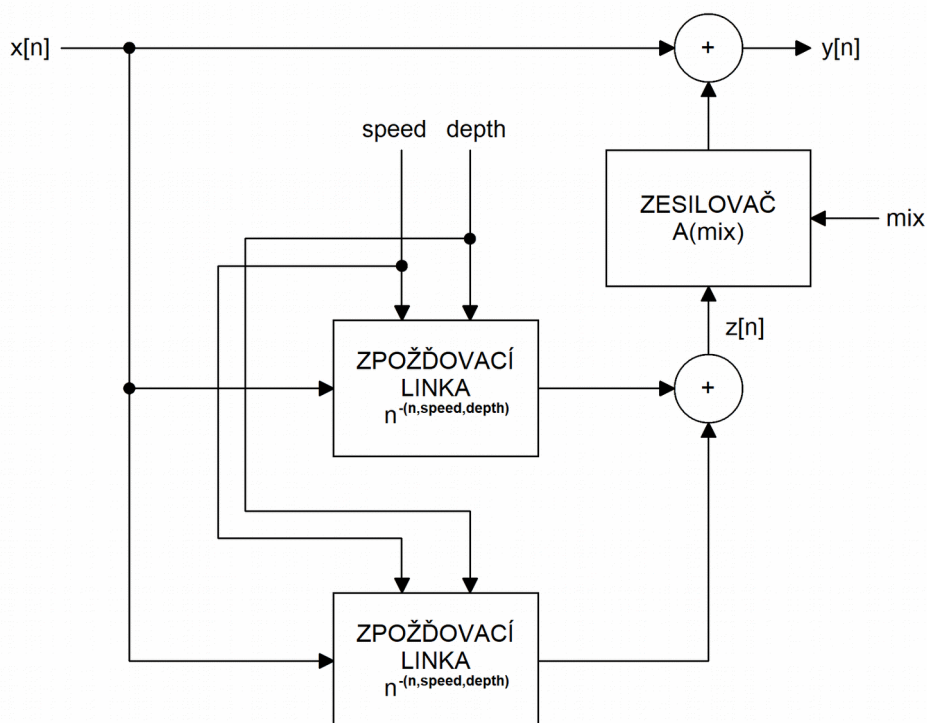
Obr. 29 - Digitální realizace efektu flanger

$$(16) \quad y[n] = x[n] + A(\text{mix})z[n], \text{ kde } z[n] = x[n - \text{delay}] + A(\text{feedback})z[n - \text{delay}]$$

Chorus

Efekty typu chorus, jak název napovídá, mají za úkol upravit signál tak, aby odpovídal signálu, který by produkovalo několik shodných nástrojů hrajících současně, tzv. unisono. Podobného efektu lze docílit, pokud se stejný part nahraje vícekrát a jednotlivé nahrávky se přehrají současně. Není totiž v možnostech člověka, aby všechny nahrávky byly identické, a tak se budou mírně lišit rytmem (tempem) a výškou jednotlivých tónů. [2] [15]

Analogové efekty typu chorus jsou obdobně jako efekty typu flanger založeny na integrovaných obvodech obsahující zpožďovací linky, jejichž zpoždění je modulováno nízkofrekvenčním oscilátorem. Od flanger efektů se však liší tím, že efekty chorus obsahují více zpožďovacích linek s různým zpožděním. Výstupní signál efektu je vytvořen součtem původního signálu a jeho zpožděných kopií. Další odlišností od efektu flanger je nastavená doba zpoždění zpožďovacích linek. Ty u efektů flanger mívají zpoždění 1 - 10 ms. U efektů chorus bývá nastavené zpoždění větší, nejčastěji v rozsahu 20 - 50 ms. Rychlost nízkofrekvenčního oscilátoru se nastavuje pomocí potenciometru Speed, hloubka modulace se mění pomocí potenciometru Depth, poměr původního signálu a jeho zpožděných kopií se nastavuje pomocí potenciometru Mix. Některé efekty chorus integrují i jednoduché korekce pro možnost zvýraznění nebo potlačení některého pásma signálu. Analogová realizace těchto obvodů je opět poměrně složitá a proto dnes převládají efekty založené na DSP platformách. [2] [15]



Obr. 30 - Digitální realizace efektu chorus

Obrázek 30 znázorňuje způsob digitální realizace efektu chorus. Na první pohled je patrné, že od efektu flanger se liší tím, že obsahuje minimálně dvě zpožďovací linky.

Každá zpoždovací linka musí mít jiné zpoždění, které je časově proměnné v závislosti na nastavení parametrů speed a depth. Výstupní signál $y[n]$ je dán součtem vstupního signálu $x[n]$ a zpožděného signálu $z[n]$, který je zeslaben v závislosti na nastavení parametru mix. Zpožděný signál $z[n]$ je vytvořen součtem výstupního signálu všech zpoždovacích linek. Funkci efektu chorus znázorněného na obrázku 30 lze popsat pomocí vztahu 17.

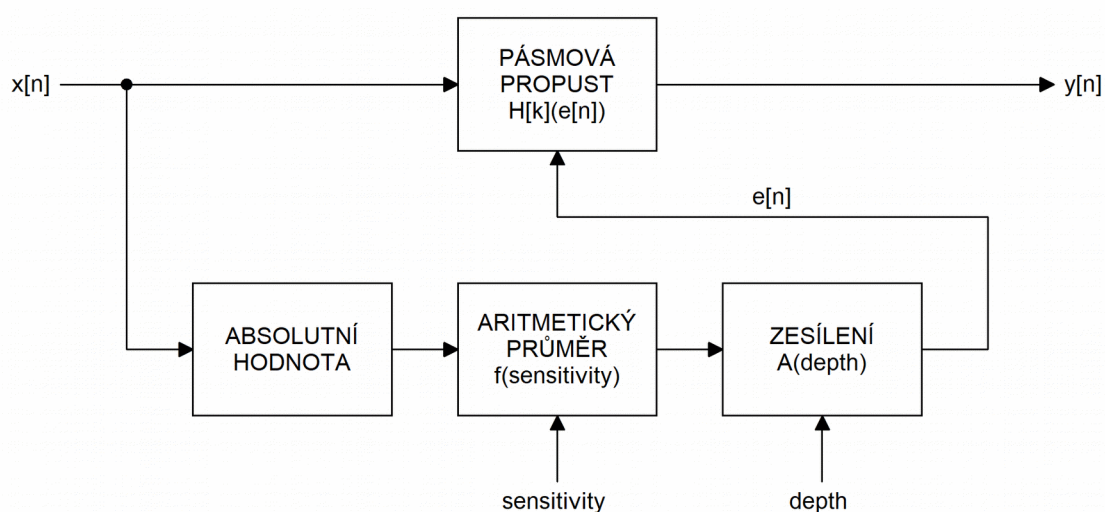
$$(17) \quad y[n] = x[n] + A(\text{mix})z[n], \text{ kde } z[n] = x[n - \text{delay}_1] + x[n - \text{delay}_2]$$

Envelope filter

Efekt typu envelope filter se často označuje také jako auto-wah. Do češtiny by se název dal přeložit jako filtr obálky, což je nepřesné a není z něj zcela patrná jeho funkce. Předchůdcem efektu envelope filter je efekt wah-wah, který se mezi českými hudebníky často označuje jako kvákadlo. Efekt wah-wah je ve své podstatě filtr typu pásmové propusti, jehož propustné pásmo lze přeladit. První efekty typu wah-wah tak činily pomocí potenciometru, jehož hřídelka byla mechanicky spojena s pedálem. Sešlápnutím pedálu došlo k pootočení potenciometru a tedy i ke změně odporu mezi krajními vývody a jezdcem. Tím hudebník ladil propustné pásmo filtru. Při změně tohoto pásma pak dochází ke kýženému efektu - zvuku podobnému kvákání. Problémem těchto pedálů je, že potenciometry jsou silně namáhány a proto je potřeba jejich občasná výměna. Proto se časem vyvinuly wah-wah efektové pedály pracující na optickém principu. U nich je potenciometr nahrazen fotorezistory a LED diodami. Při sešlápnutí pedálu se mezi fotorezistor a LED diody zasouvá stínítko, což způsobuje změny odporu fotorezistoru a dochází k přeladění pásmové propusti. [1] [16] [39]

Efekty envelope filter se od pedálů wah-wah odlišují tím, že k přeladění filtru nedochází na základě sešlápnutí pedálu, ale na základě obálky signálu elektrofonické kytary. Tím odpadá nutnost ovládní efektu nohou a kýženého efektu se dosahuje vlivem změny intenzity úhozu/brnknutí nas strunu. Analogová realizace tohoto efektu není příliš složitá, dokonce jej lze realizovat několika způsoby. Nejjednodušším způsobem je envelope filter, se stejnou pásmovou propustí, jako mají optické efekty wah-wah. K původním obvodům optických wah-wah efektů je pouze doplněn detektor obálky

skládající se zpravidla z jednoho operačního zesilovače a dolní propusti. Na výstup tohoto detektoru je připojena dvojice LED diod, z nichž jedna je zapojena proti napájení a druhá proti zemi. Změnou obálky signálu tak dochází ke změně svitu LED, čímž se mění množství světla dopadající na fotorezistory a mění se tak jejich odpor. Efekty typu envelope filter se zpravidla ovládají pomocí potenciometru Sensitivity, který má vliv na změnu časové konstanty detektoru obálky, a potenciometru Range, který má vliv na hloubku modulace svitu LED diod vlivem obálky. Mezi zástupce těchto analogových efektů envelope filter lze zařadit např. efekt Envelope Filter 440 od výrobce DOD, efekt Envelope filter výrobce MXR a nebo Micro Q-Tron od výrobce Electro Harmonix. [1] [16] [39]



Obr. 31 - Digitální realizace envelope filter

Možnost digitální realizace efektu envelope filter je znázorněna na obrázku 31. Základem efektu je pásmová propust, která upravuje signál $x[n]$ a vytváří tak výstupní sygnál $y[n]$. Impulzní odezva pásmové propusti $H[k]$ závisí na signálu $e[n]$, který odpovídá obálce vstupního signálu $x[n]$. Obálka je vytvořena tak, že vzorky $x[n]$ jsou zbaveny záporných hodnot. Ze získaných hodnot se počítá aritmetický průměr, kde počet členů průměru je dán parametrem sensitivity. Výsledný signál $e[n]$ je dán zesílením tohoto signálu zesilovačem, jehož zesílení závisí na nastavení parametru depth. Funkci tohoto efektu lze popsat vztahem 18.

$$y[n] = H[k](e[n])x[n],$$

(18)

$$\text{kde } e[n] = A(\text{depth}) \frac{1}{\text{sensitivity}} \sum x[\text{sensitivity}]$$

7.3 Efekty dozvuku

Efekty dozvuku mají za úkol dodat zvuku nástroje prostor. Tyto efekty byly ve svém počátku realizovány pomocí elektromechanických systémů, jež byly velkých rozměrů, hmotnosti a náklady na jejich pořízení byly nemalé. Postupem času je tedy nahradily efekty založené na DSP platformách. [4] [16] [22]

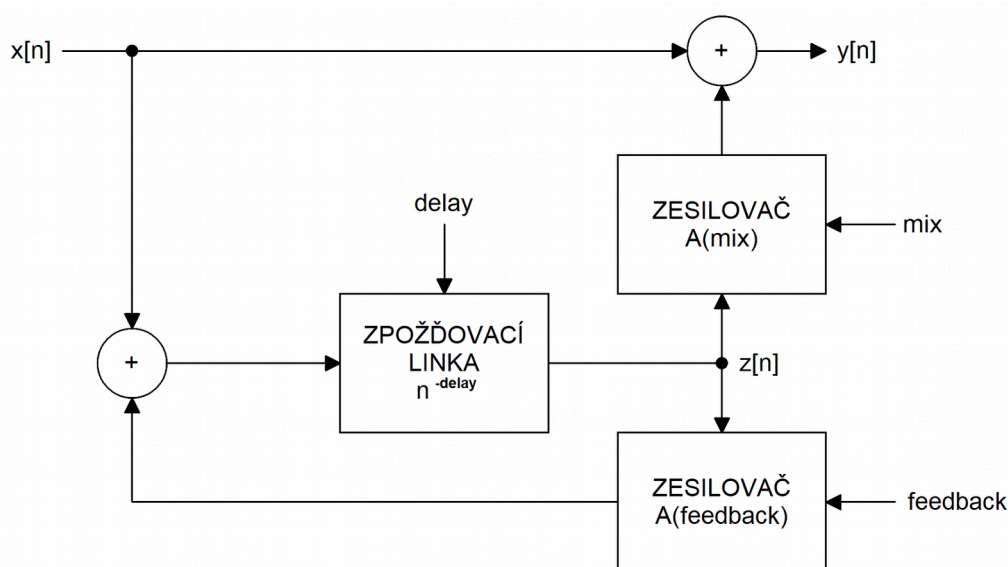
Delay

Efekty typu delay pracují, jak jejich název napovídá, se zpožděním zvuku. Princip tohoto efektu je založen na tom, že se vstupní audio signál zaznamenává, se zpožděním přehrává a míchá se se vstupním signálem. V podstatě se jedná o jednoduchou simulaci ozvěny. Mezi českými hudebníky se pro označení tohoto typu efektu používá taktéž výraz echo. [4] [16]

První efekty typu delay byly tzv. pásková echa. Jednalo se o zařízení, která obsahovala magnetofonový pásek, na který se pomocí zapisovací magnetofonové hlavy zaznamenával vstupní audio signál. Ten se následně opětovně přehrával pomocí několika magnetofonových čtecích hlav a míchal zpět se vstupním signálem. Pásková echa měla velké rozměry i hmotnost, navíc byla poměrně drahá. Taktéž se objevovaly problémy s poškozením magnetofonového pásku. Proto později byly nahrazeny delay efekty postavených na analogových zpožďovacích linkách, jako je např efekt Rubberneck od výrobce DOD, MF Delay od výrobce Moog nebo SupaPuss od výrobce Way Huge. Efekt delay (echo) obsahuje následující ovládací prvky. Pomocí potenciometru Delay se nastavuje délka zpoždění, pomocí potenciometru Feedback úroveň signálu přivedeného zpět na vstup a pomocí potenciometru Mix se nastavuje poměr mezi původním signálem a jeho zpožděnými replikami na výstupu efektu. [4] [16]

Na obrázku 32 je znázorněn princip digitální realizace efektu delay. Princip funkce je založen na digitální zpožďovací lince, jejíž zpoždění je dáno nastavením parametru *delay*. Na vstup zpožďovací linky je přiváděn součet vzorků původního signálu $x[n]$ a již

zpožděného signálu $z[n]$, který může být podle potřeby zesílen v závislosti na nastavení zesílení $A(\text{feedback})$. Výstupní signál $y[n]$ je poté dán součtem původního signálu a zpožděného signálu $z[n]$, který opět může být zesílen, tentokrát však v závislosti na nastavení zesílení $A(\text{mix})$. Matematický popis funkce efektu delay vyjadřuje vztah 19.



Obr. 32 - Digitální realizace efektu delay

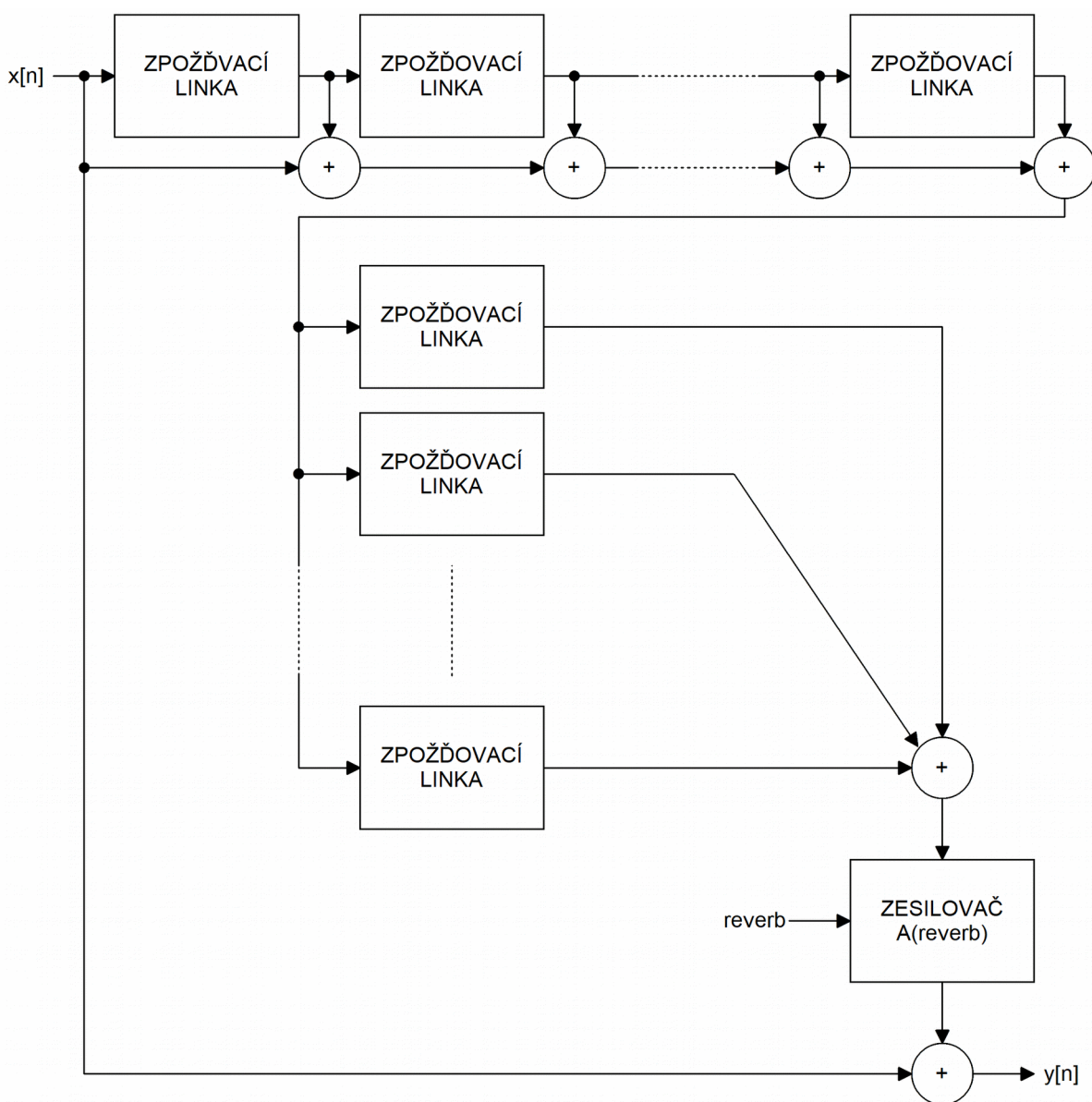
$$(19) \quad y[n] = x[n] + A(\text{mix})z[n], \text{ kde } z[n] = x[n - \text{delay}] + A(\text{feedback})z[n - \text{delay}]$$

Reverb

Efekty typu reverb mají za úkol simulovat ozvěnu. Podle typu efektu a jeho nastavení lze dosáhnout ozvěny podobné malé místnosti či naopak velkému sálu. Mezi hudebníky se pro označení tohoto efektu často používá výraz hall. [16] [22]

Princip analogových efektů reverb je založen na simulaci odrazu zvuku uvnitř uzavřených místností pomocí mechanických jednotek (tzv. spring reverb nebo plate reverb) nebo analogových zpožďovacích linek a širokopásmových filtrů (tzv. analog reverb). Spring reverb (označovaný též jako pružinový dozvuk) je založen na tom, že součástí efektové jednotky je několik pružin. Ty se pomocí speciálních audio-mechanických převodníků rozechvívají audio signálem na jedné straně a na straně druhé se pomocí audio-mechanických převodníků signál snímá, zesiluje a přimíchává zpět k původnímu signálu. Tím vznikne požadovaný efekt dozvuku. Na podobném principu pracuje efekt plate reverb

(označované též jako deskový dozvuk), který však místo pružin využívá tenké rezonanční desky z kovu. Uprostřed desky je umístěn audio-mechanický převodník, který desku rozvibruje. Po stranách desky jsou umístěné snímače, jejichž signál se opět zesílí a přimíchává ke vstupnímu signálu. Z výše zmíněného je patrné, že realizace efektu reverb pomocí analogových obvodů je poměrně složitá a nákladná. Proto dnes převládají řešení založená na DSP platformách. [16] [22]



Obr. 33 - Digitální realizace efektu reverb, převzato s úpravami [12]

Obrázek 33 znázorňuje možnost realizace efektu typu reverb. Princip funkce je založen na přičítání mnohonásobně zpožděných vzorků vstupního signálu. Kaskádně řazené zpožďovací linky mají nastavené menší zpoždění než zpožďovací linky řazené paralelně. Kaskádně řazené zpožďovací linky simulují blízké odrazy zvukové vlny. Paralelně řazené zpožďovací linky naopak simulují odrazy vzdálené. Toto řešení efektu reverb je poměrně snadné, ale aby efekt zněl věrně, je potřeba mnoho zpožďovacích linek. To je velmi náročné na paměť použitého MCU. V současné době se tento způsob realizace efektu reverb opouští a začínají se objevovat tzv. konvoluční reverb efekty. Ty pracují na základě konvoluce původního signálu s impulzní charakteristikou poslechového prostoru. [12]

7.4 Ostatní efekty

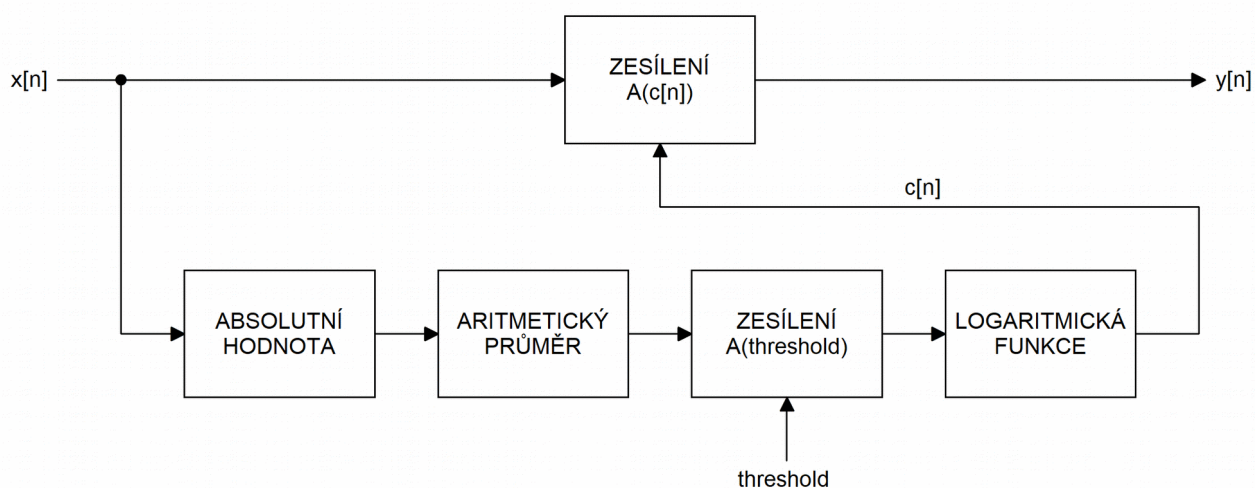
Kompresor

Efekt typu kompresor má za úkol redukovat dynamický rozsah nástroje. Tento efekt se zpravidla využívá společně s nezkreslenými zvuky nástrojů, neboť zkreslené zvuky jsou již komprimovány z podstaty vzniku zkreslení v efektových krabičkách, či zesilovačích. Kompresory tedy automaticky regulují zisk zesilovače v závislosti na efektivní hodnotě vstupního signálu. [16] [29] [30]

Analogový kompresor se skládá ze dvou základních obvodů. Prvním obvodem je detektor efektivní hodnoty vstupního signálu a druhým obvodem je zesilovač s nastavitelným ziskem. Zisk tohoto zesilovače se řídí právě pomocí výstupu detektoru efektivní hodnoty vstupního signálu. V praxi může být detektor efektivní hodnoty postaven na operačním zesilovači, který zesiluje vstupní signál a budí dvě LED diody. Zesilovač signálu s nastavitelným ziskem je v tomto případě často realizován operačním zesilovačem s fotorezistorem zapojeným ve zpětné vazbě. LED diody poté osvětlují tento fotorezistor, ten mění svůj odpor a dochází tak ke změně zesílení zesilovače. Ovládání kompresoru se provádí pomocí potenciometru Threshold a Ratio. Potenciometr Threshold nastavuje úroveň, při které začíná kompresor komprimovat vstupní signál. Potenciometr Ratio nastavuje kompresní poměr. Některé typy kompresorů navíc umožňují nastavit hlasitost výstupního signálu, případně i rychlost náběhu a uvolnění. Mezi analogové kompresory lze

zařadit např. efekt Forcefield od výrobce TC Electronic, Soul Preacher výrobce Electro Harmonix nebo CocaComp od výrobce Okko. [16] [29] [30]

Obrázek 34 znázorňuje digitální realizaci kompresoru. Vzorčky vstupního signálu $x[n]$ jsou zesilovány zesílením $A(c[n])$, které se mění v logaritmické závislosti na efektivní hodnotě vstupního signálu $x[n]$. Ta je získána tak, že se ze vzorků vstupního signálu spočítá absolutní hodnota, z níž se spočítá aritmetický průměr několika vzorků. Aby bylo možné nastavit citlivost kompresoru, je efektivní hodnota zesílena v závislosti na nastavení parametru *threshold*. Logaritmická závislost zesílení je poté dosažena pomocí přepočtu této hodnoty logaritmickou funkcí. Matematicky lze popis tohoto obvodu vyjádřit vztahem 20.



Obr. 34 - Digitální realizace kompresoru

$$(20) \quad y[n] = x[n] + A(c[n])x[n], \text{ kde } c[n] = \log_{10}\left(A(\text{threshold}) \frac{1}{k} \sum x[k]\right)$$

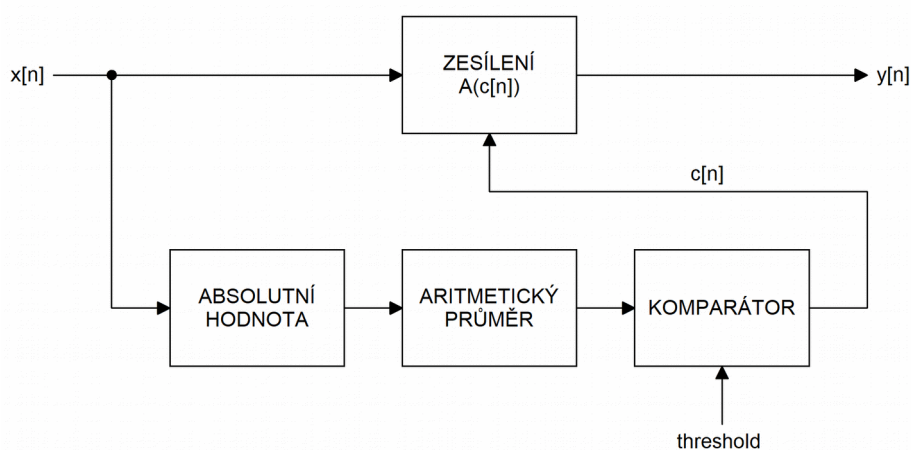
Noise gate

Effekt typu noise gate, jak jeho název napovídá, slouží k odstranění šumů a brumů z užitečného audio signálu elektrofonické kytary. Tento efekt je obzvlášť u elektrofonické kytary velmi důležitým, neboť kytara sama o sobě produkuje velkou úroveň šumu a brumů, které jsou na poslech rušivé. [16]

Analogová realizace obvodu noise gate není příliš složitá. Noise gate lze rozdělit na tři základní části - detektor efektivní hodnoty, komparátor a zesilovač. Detektor

efektivní hodnoty sleduje efektivní hodnotu napětí signálu. Pokud je detekované napětí nižší, než nastavený práh komparátoru, bude zesilovač mít zesílení rovné 0. Pokud je naopak efektivní hodnota vyšší, bude zesilovač mít zesílení rovné 1. Noise gate se zpravidla ovládají pomocí potenciometru Threshold, který určuje hladinu signálu, který bude utlumen. Některé modely umožňují určit i rychlost změny zesílení (potenciometry Attack a Release), případně umožňují nastavit i útlum noise gate pro signály, jež jsou pod nastavenou hranicí (potenciometr Attenuate). Mezi zástupce tohoto typu efektu lze zařadit např. noise gate Noise Killer od výrobce Mooer, Sentry Noise od výrobce TC Electronic nebo NS-2 od výrobce Boss. [16]

Digitální realizace noise gate je znázorněna na obrázku 35 a lze ji popsat vztahem 21. Ze vzorků vstupního signálu $x[n]$ je zjištěna pomocí absolutní hodnoty a aritmetického průměru efektivní hodnota signálu. Ta je porovnána komparátorem s nastavenou prahovou hodnotou *threshold*. Komparátor podle výsledku komparace generuje signál $c[n]$, který řídí zesílení zesilovače.



Obr. 35 - Digitální realizace noise gate

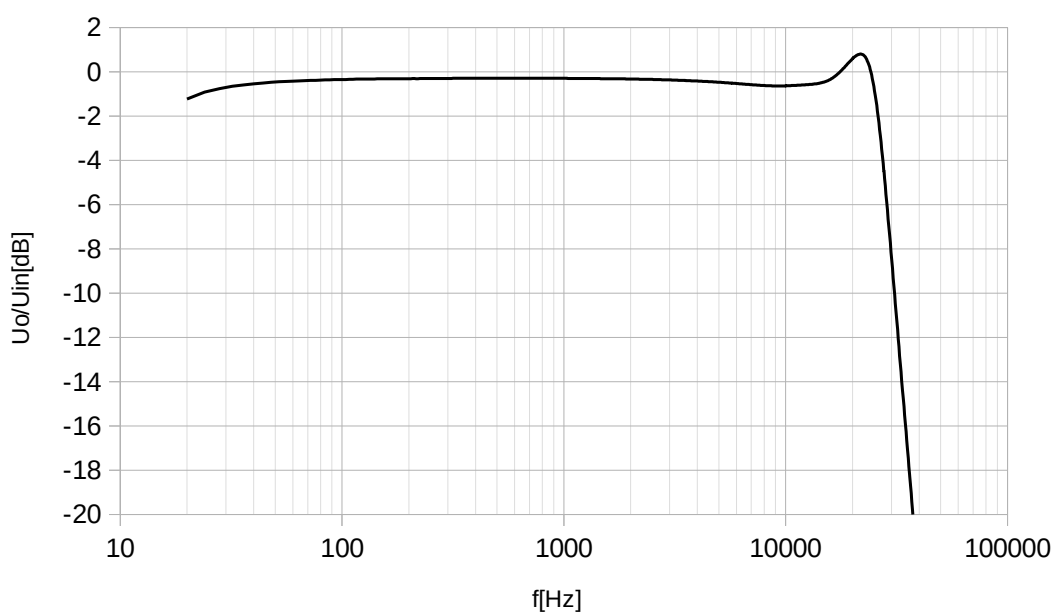
$$y[n] = x[n] + A(c[n])x[n], \text{ kde}$$

$$(21) \quad c[n] = 0 \text{ pro } \frac{1}{k} \sum x[k] < \text{threshold} \text{ a } c[n] = 1 \text{ pro } \frac{1}{k} \sum x[k] \geq \text{threshold}$$

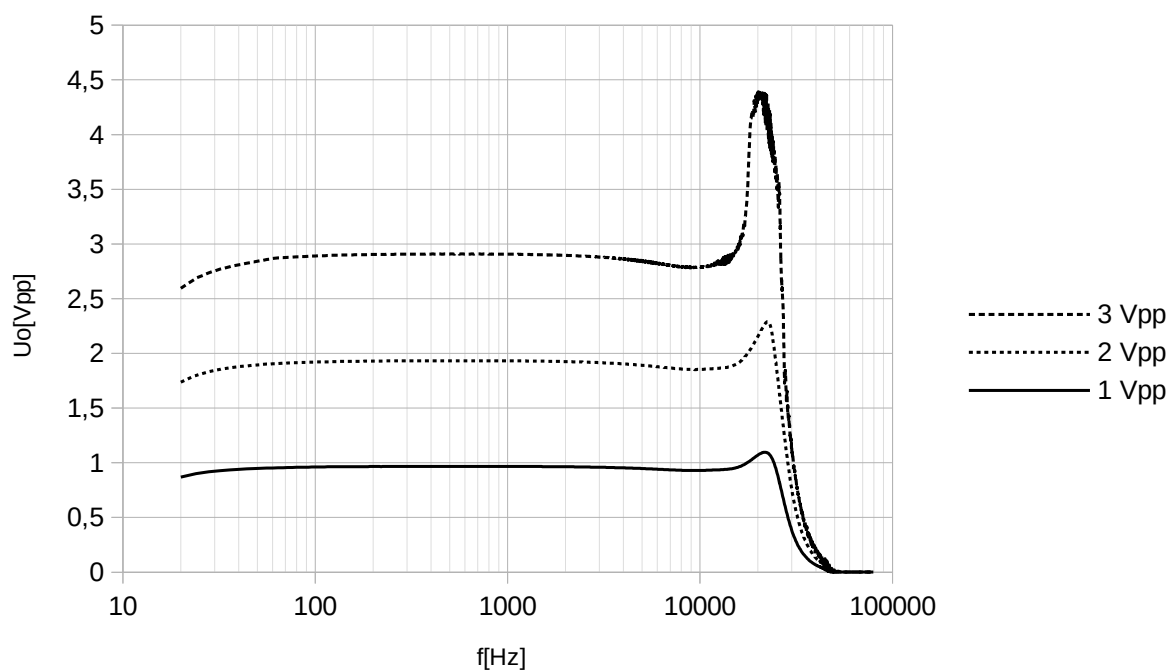
8 Parametry a vlastnosti multieffektu

Pro měření parametrů a vlastností multieffektu byl použit režim, kdy není aktivní žádný z efektů a multieffekt pracuje v tzv. transparentním režimu. V tomto režimu dochází k převodu vstupního analogového signálu do číslicové podoby a zpět do analogové bez jakékoliv úpravy či zásahu. Aby bylo možné zhodnotit parametry navrženého zařízení, byly stejné parametry a vlastnosti sledovány na komerčním řešení multieffektu RP360 od výrobce DigiTech, který při měření taktéž pracoval v transparentním režimu. Měření parametrů a vlastností probíhalo automatizovaně s využitím měřicího přístroje Audio Precision APX500 a patřičného SW vybavení.

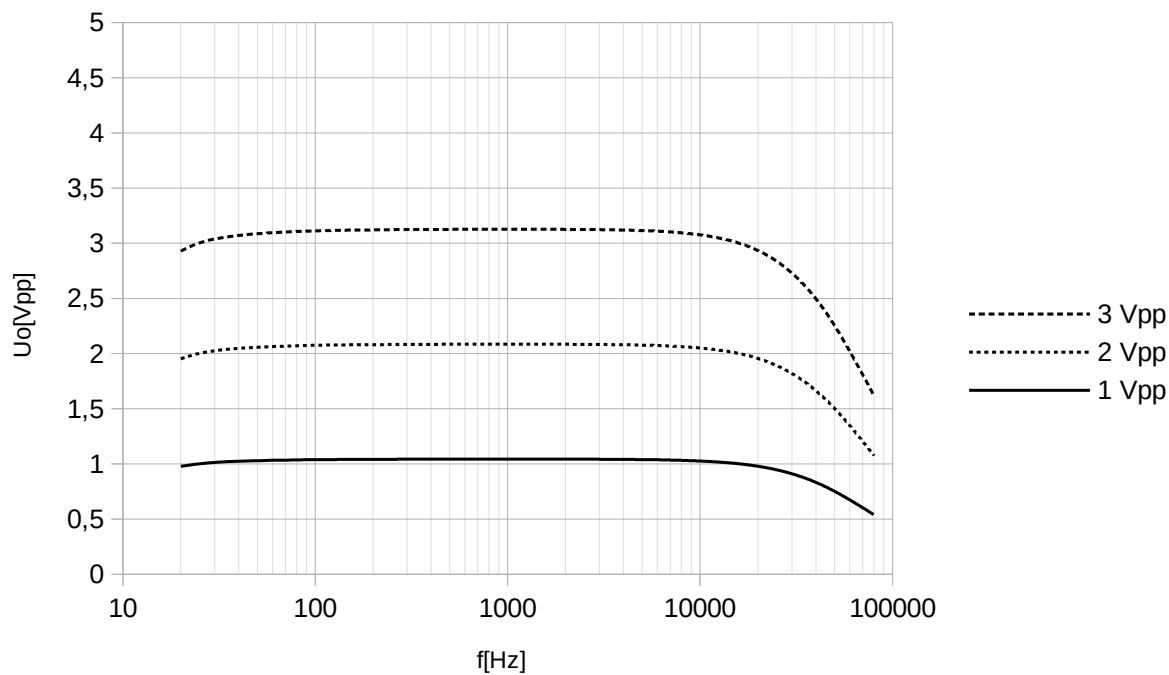
Obrázek 36 znázorňuje detail frekvenční charakteristiky multieffektu pro vstupní napětí 1 V_{pp}. Z charakteristiky je patrný vliv rekonstrukčního filtru (viz kapitola 4.4). Obrázek 37 znázorňuje frekvenční charakteristiky multieffektu pro různá vstupní napětí. Pro možnost porovnání parametrů byly stejné charakteristiky změřeny i na multieffektu DigiTech RP360, jež jsou vyneseny na obrázku 38. Z charakteristik je patrné, že komerční řešení multieffektu používá rekonstrukční filtr nižšího řádu s nižším zvlněním v propustném pásmu.



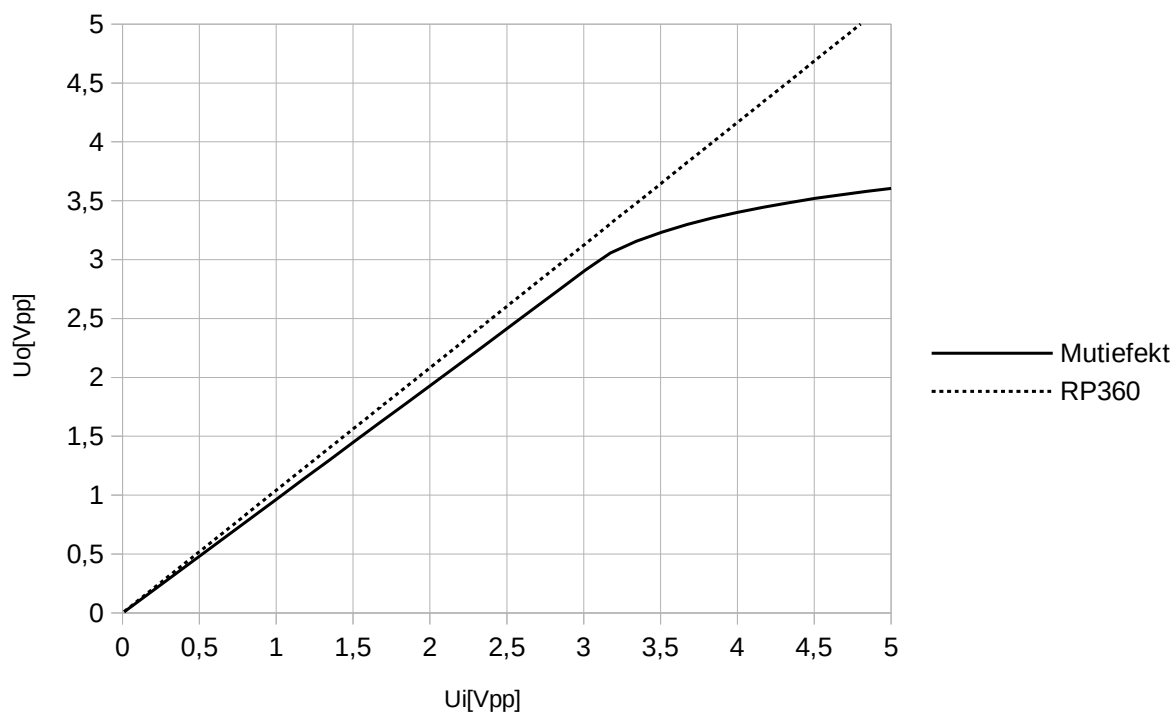
Obr. 36 - Detail frekvenční charakteristiky navrženého multieffektu ($U_{in} = 1$ V_{pp})



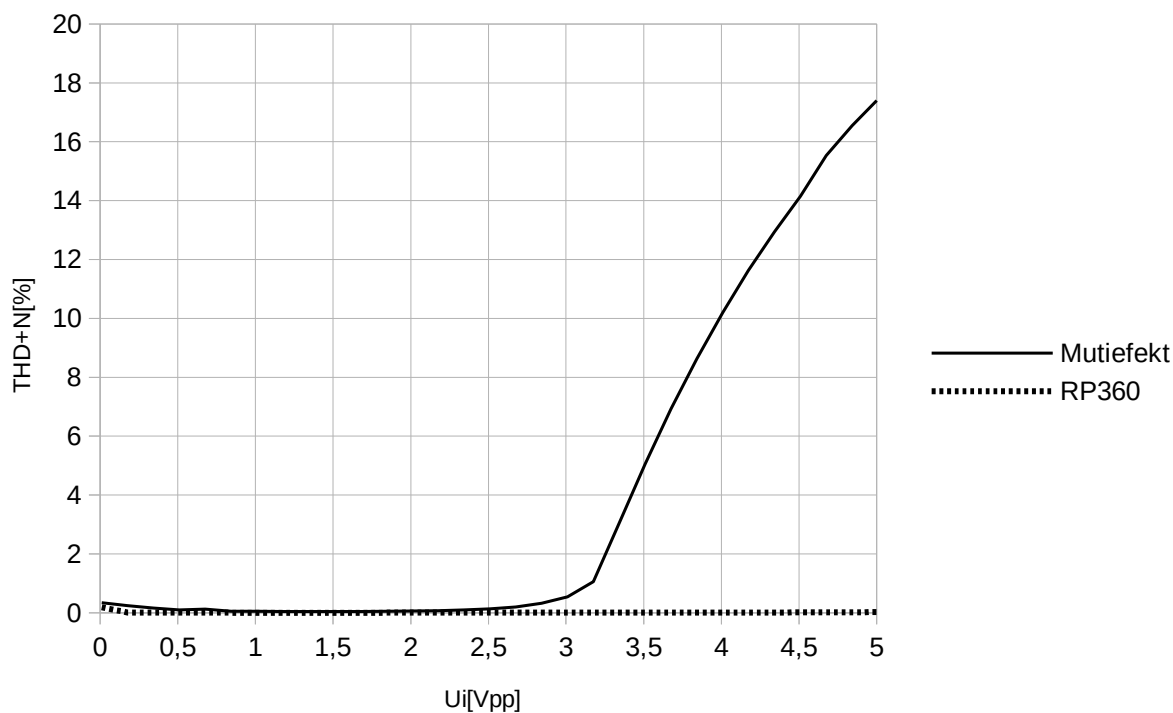
Obr. 37 - Frekvenční charakteristiky navrženého multieffektu (lineární osa napětí)



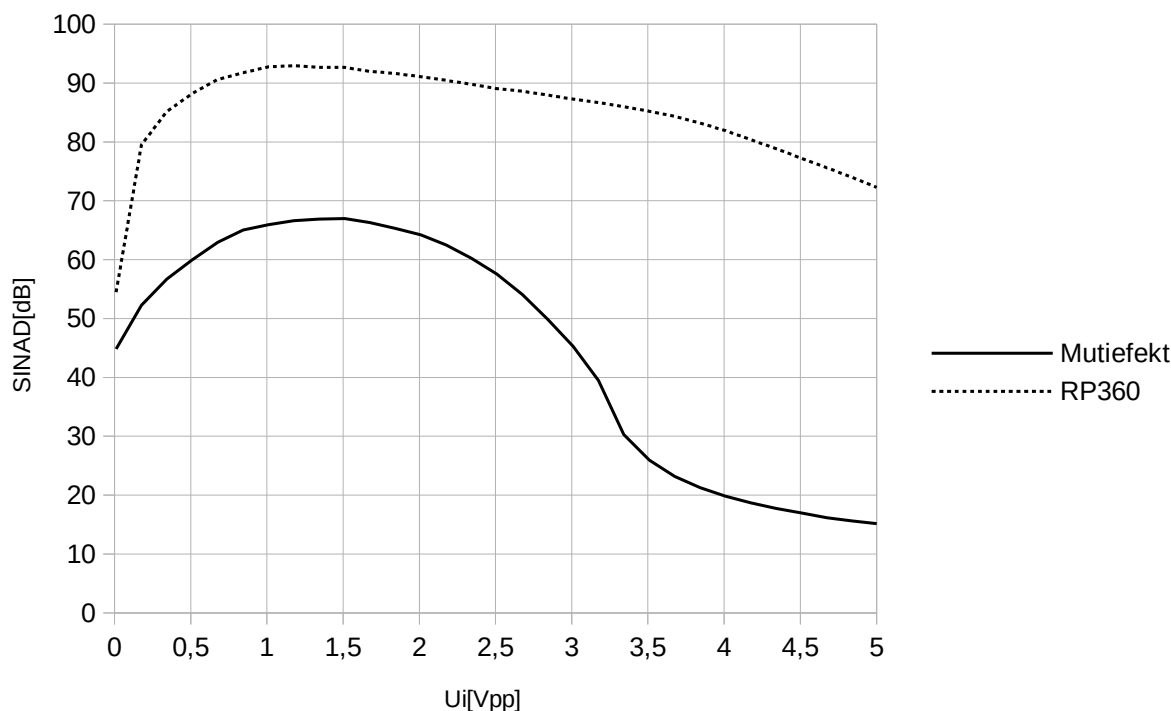
Obr. 38 - Frekvenční charakteristiky multieffektu Digitech RP360 (lineární osa napětí)



Obr. 39 - Převodní charakteristiky navrženého multieffektu a multieffektu Digitech RP360



Obr. 40 - Zkreslení harmonického signálu + šum (THD+N) navrženého multieffektu a multieffektu Digitech RP360



Obr. 41 - Odstup signál - šum a zkreslení (SINAD) navrženého multieffektu a multieffektu Digitech RP360

Obrázek 39 znázorňuje převodní charakteristiky navrženého multieffektu a multieffektu Digitech RP360. Je patrné, že komerční řešení dosahuje vyšší linearity. Nelinearita převodní charakteristiky u navrženého řešení je zaviněna ochrannými obvody, jež limitují signál od vstupního napětí rovného přibližně 3,2 Vpp. Ochranné obvody lze upravit tak, aby limitovaly signál až při vyšší úrovni vstupního napětí. Toho lze docílit výměnou limitujících LED diod za jiný typ. Nutno však podotknout, že pro většinu kytarových snímačů tato úprava není potřebná. Komerční řešení také dosahuje vyššího zesílení. To lze u navrženého multieffektu v případě potřeby zvýšit přeprogramováním audio kodeku PCM3060, případně osazením rezistorů R32 a R34 do obvodu výstupního bufferu (viz kapitola 4.4).

Obrázek 40 znázorňuje zkreslení harmonického signálu + šum (THD+N) navrženého multieffektu a multieffektu Digitech RP360. V oblasti, kdy je vstupní napětí menší než 2,5 Vpp, je tento parametr srovnatelný u obou multieffektů. Navržený multieffekt však od této hranice dosahuje THD+N vyššího, což je opět zaviněno ochrannými obvody

audio kodeku, které limitují vstupní signál. Úpravou ochranných obvodů lze opět posunout úroveň, kdy THD+N narůstá a způsobuje slyšitelnou degradaci signálu. Ale jak již bylo zmíněno v předcházejícím odstavci, není tato úprava pro většinu kytarových snímačů nutná.

Obrázek 41 znázorňuje odstup signál - šum a zkreslení (SINAD) navrženého multieffektu a multieffektu Digitech RP360. Tento parametr je klíčový pro stanovení efektivního počtu bitů (ENOB) AD převodníku. Výpočet efektivního počtu bitů je patrný ze vztahů 22 (navržený multieffekt) a 23 (multieffekt Digitech RP360). [21]

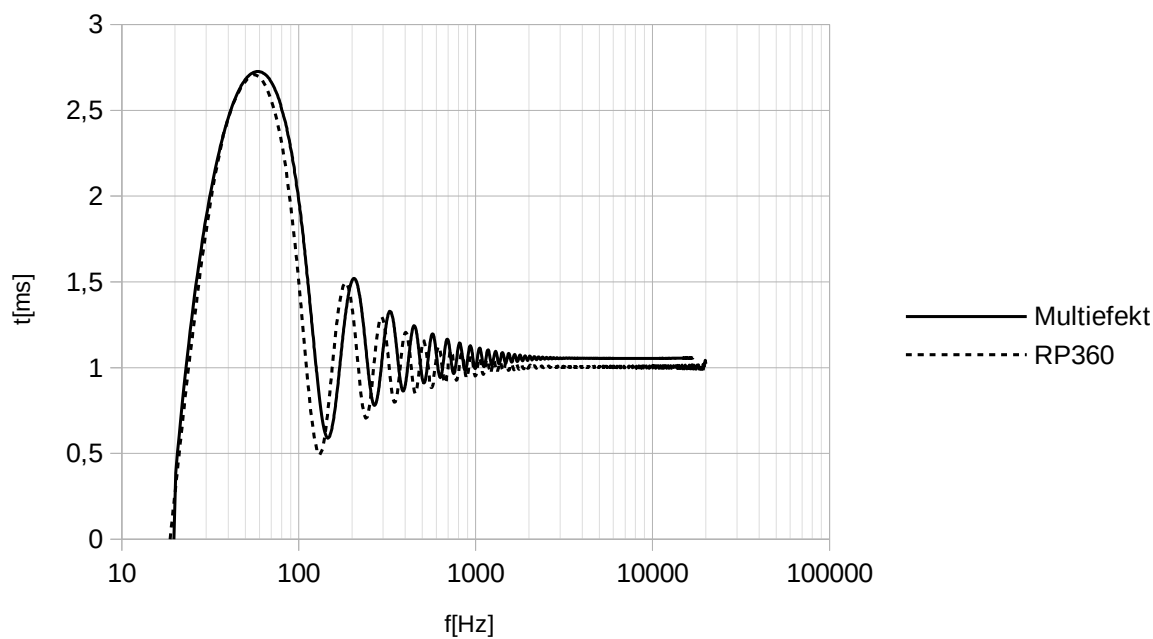
$$(22) \quad ENOB_{mfx} = \frac{SINAD_{mfx} - 1,76}{6,02} = \frac{68 - 1,76}{6,02} = 11,0033 \approx 11 \text{ bitů}$$

$$(23) \quad ENOB_{RP360} = \frac{SINAD_{mfx} - 1,76}{6,02} = \frac{91 - 1,76}{6,02} = 14,8239 \approx 14 \text{ bitů}$$

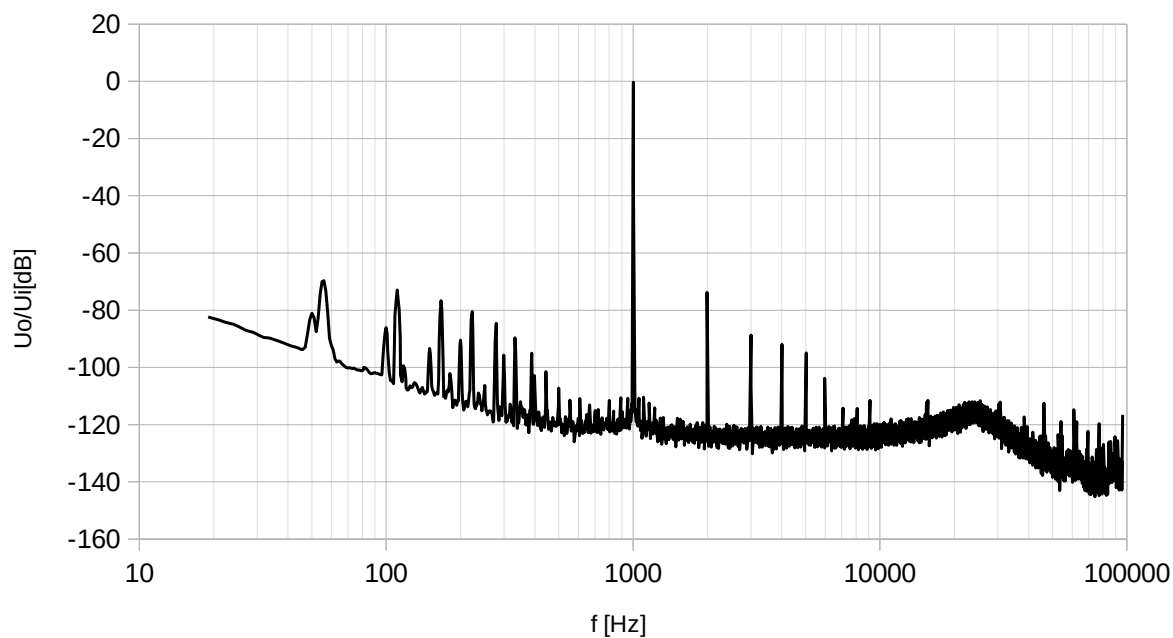
Navržené řešení multieffektu dosahuje 11 efektivních bitů a multieffekt Digitech RP360 dosahuje 14 efektivních bitů. Oba multieffekty používají 24 bitový audio kodek. Nízký počet efektivních bitů navrženého multieffektu je s největší pravděpodobností zaviněn buď nedostatečnou filtrací a nedostatečným oddělením analogového a digitálního napájení nebo špatně rozmístěnými napájecími a zemními vodiči na plošném spoji. Pomocí vztahu 24 lze určit efektivní rozlišení, kterého navržený multieffekt dosahuje. Je patrné, že dosažené rozlišení 2,44 mV je na úrovni šumu, který produkuje elektrofonická kytara (viz kapitola 2.2). Proto nedochází k slyšitelné degradaci kytarového signálu. [21]

$$(24) \quad ER = \frac{U_{cc}}{2^B} = \frac{5}{2^{11}} = 2,4414 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

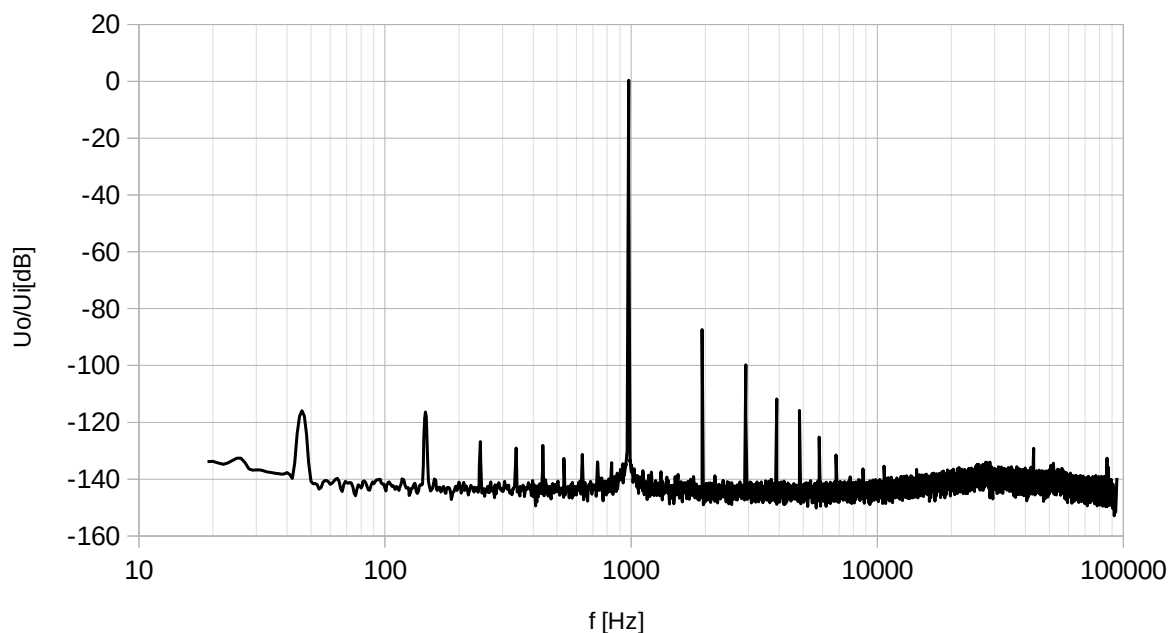
Obrázek 42 znázorňuje skupinové zpoždění u obou multieffektů. Je patrné, že navržené řešení multieffektu dosahuje takřka stejného skupinového zpoždění jako multieffekt Digitech RP360. Ve frekvenčním pásmu kytarového signálu latence nepřekračuje 1,5 ms. To je hodnota pro lidský organizmus nerozpoznatelná, což bylo ověřeno i praktickou zkouškou s elektrofonickou kytarou a kytarovým zesilovačem. [21]



Obr. 42 - Skupinové zpoždění navrženého multieffektu a multieffektu Digitech RP360



Obr. 43 - Frekvenční spektrum výstupního signálu navrženého multieffektu



Obr. 44 - Frekvenční spektrum výstupního signálu multieffektu Digitech RP360

Obrázek 43 a 44 znázorňuje frekvenční spektrum výstupního signálu při sinusovém průběhu napětí o amplitudě 1 V_{pp} a frekvenci 1 kHz na vstupu multieffektu. Ze spektra je patrné, že do užitečného signálu u obou řešení proniká rušení 50 Hz ze sítě. Multieffekt Digitech RP360 však pravděpodobně obsahuje napájecí filtry laděné na 100 Hz, neboť u něj nelze pozorovat špičky na této frekvenci či jejich násobcích. Ze spektra lze také určit, že multieffekt Digitech RP360 má lepší odstup signál - šum a to přibližně o 20 dB. Dále si lze všimnout, že u obou multieffektů jsou patrné spektrální čáry nad základní frekvencí původního signálu. U multieffektu Digitech RP360 jsou potlačeny přibližně 90 dB od úrovně původního signálu a u navrženého multieffektu jsou potlačeny přibližně 70 dB.

Tyto spektrální čáry způsobují v časové oblasti harmonické zkreslení. K jejich vzniku dochází, protože výstupní signál DA převodníku v audio kodeku není spojitý, ale naopak má schodovitý charakter. Lze je potlačit digitálním interpolačním filtrem integrovaným v audio kodeku. Interpolační filtr způsobuje převzorkování původního signálu na vyšší frekvenci, čímž vznikají nové vzorky původního signálu. Jejich hodnota je dána matematickou interpolací původních vzorků. To se projeví zjemněním schodovitého charakteru výstupního signálu a tedy i potlačením spektrálních čar nad frekvencí původního signálu. [26]

Audio kodek PCM3060 je v navrženém multieffektu nastaven tak, aby pracoval se vzorkovací frekvencí 96 kHz. Vlivem nastavení interpolačního filtru jsou výstupní vzorky převzorkovány na frekvenci 192 kHz. Tento audio kodek již neumožňuje dosáhnout vyšší frekvence převzorkování. Proto by pro lepší potlačení těchto spektrálních čar bylo nutné vyměnit tento audio kodek za jiný typ. Nicméně v aplikaci multieffektu určeného pro elektrofonickou kytaru je potlačení vyšších harmonických složek přibližně 70 dB dostatečné. [32]

9 Závěr

Cílem této diplomové práce je návrh a realizace funkčního prototypu digitálního kytarového multieffektu postaveného na základě vývojového kitu. V rámci diplomové práce byly splněny všechny body zadání. Schéma multieffektu a podklady pro výrobu DPS jsou stejně jako program multieffektu součástí přiloženého CD. Součástí CD jsou také fotografie navrženého zařízení a rendery navrženého plošného spoje. Součástí tištěné přílohy je kompletní sada schémat multieffektu, výkresy vodivých cest plošného spoje, osazovací plány a rendery.

Multieffekt byl podroben měřením, aby byly stanoveny jeho parametry a odhaleny případné nedostatky. Mimo měření byl také proveden několikahodinový test multieffektu v tzv. transparentním režimu. V tomto režimu dochází k převodu vstupního analogového signálu do číslicové podoby a zpět do analogové bez jakékoliv úpravy či zásahu. Tím bylo prokázáno, že multieffekt pracuje spolehlivě. Také byl proveden "slepý test" s multieffektem zařazeným v signálové cestě a s přímým připojením elektrofonické kytary do kytarového zesilovače. Tím bylo prokázáno, že navržený multieffekt slyšitelně nedegraduje signál elektrofonické kytary a že je jeho latence nižší, než je schopný lidský organismus zaznamenat. Parametry navrženého multieffektu byly porovnány s dostupným komerčním řešením RP360 od výrobce Digitech.

O navržené zařízení projevila zájem komunita kolem tuzemských i zahraničních fór sdružující hudebníky. Mezi nimi se totiž nalézají i mnoho technicky a programátorsky zdatných členů, kteří by si rádi zkusili postavit nebo naprogramovat vlastní DSP efekt. Bohužel je cena prototypu atakující hranici 6 000 Kč pro většinu z nich neakceptovatelná. Proto bych se v budoucnu rád věnoval nejen programování a testování různých efektových algoritmů na vzniklém prototypu, ale také bych chtěl využít nabitých znalostí a zkušeností k návrhu a konstrukci méně komplexní, jednodušší a levnější verze digitálního kytarového efektu.

10 Použitá literatura

- [1] Auto-wah. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Auto-wah>
- [2] Chorus. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Chorus_effect
- [3] CRUMP, Stephen. *Analog Active Audio Filters: Audio Products*. Dallas, Texas, 2010.
- [4] Delay (audio effect). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Delay_\(audio_effect\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Delay_(audio_effect))
- [5] Distortion (music). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Distortion_\(music\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Distortion_(music))
- [6] Distortion, Overdrive and Fuzz. In: *GuitarThai* [online]. Thajsko: GuitarThai, 2005 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.guitarthai.com/lessonboard/question.asp?QID=2752>
- [7] Effects Unit. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Effects_unit
- [8] Flanging. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Flanging>
- [9] Guitar. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Guitar>

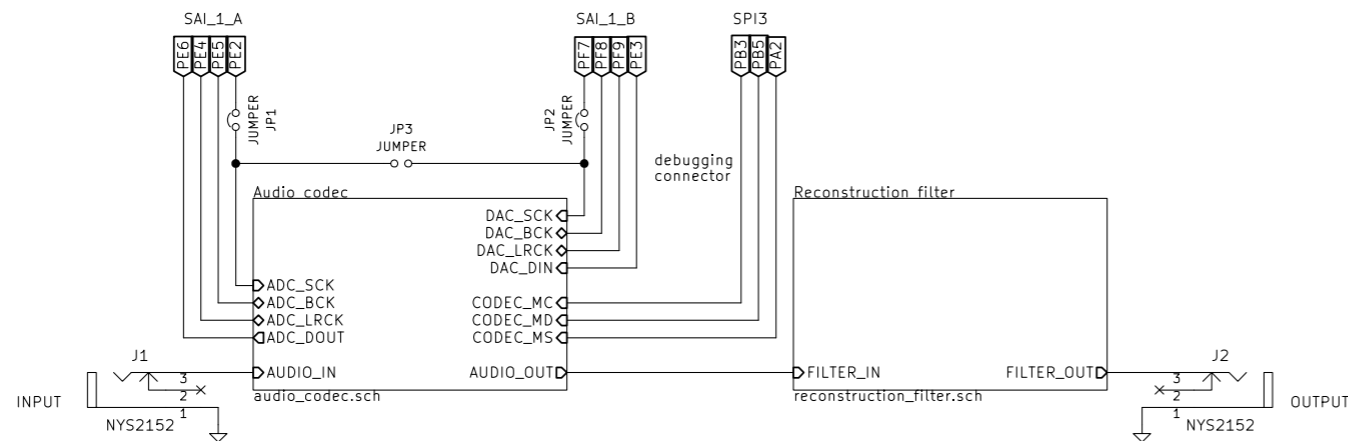
- [10] Guitar amplifier. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Guitar_amplifier
- [11] Guitar/Effects Pedals. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: https://en.wikibooks.org/wiki/Guitar/Effects_Pedals
- [12] How Guitar Pedals Work. In: *How stuff works* [online]. Atlanta: HowStuffworks, 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://electronics.howstuffworks.com/gadgets/audio-music/guitar-pedal.htm>
- [13] Humbucker. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Humbucker>
- [14] Humbucker Pickup Kit: Assembly instructions for the humbucker pickup kit. *StewMac: tools+ideas for guitarmaking*[online]. Athens, USA [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: http://www.stewmac.com/How-To/Online_Resources/Learn_About_Guitar_Pickups_and_Electronics_and_Wiring/Humbucker_Pickup_Kit.html
- [15] Jak pracují efekty I. In: *Muzikus: Hudební portál* [online]. Praha: Muzikus, 2013, 2009 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-clanky/jak-pracuji-efekty-I~19~leden~2009/>
- [16] Jak pracují efekty II. In: *Muzikus: Hudební portál* [online]. Praha: Muzikus, 2013, 2009 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-clanky/jak-pracuji-efekty-II~05~brezen~2009/>
- [17] KARKI, Jim. *Active Low-Pass Filter Design: AAP Precision Analog*. Dallas, Texas, 2002.
- [18] KUGELSTADT, Thomas. *Active Filter Design Techniques: Op Amps for Everyone*. Texas, 2008.

- [19] Kytarové zkreslení: Nic jednoduššího. In: *Muzikus: Hudební portál* [online]. Praha: Muzikus, 2013 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-clanky/Kytarove-zkresleni-Nic-jednodussiho-03-zari-2003/>
- [20] Phaser (effect). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Phaser_\(effect\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Phaser_(effect))
- [21] POULARIKAS, D. a Ed. ALEXANDER. *Analog Filter Approximations: The Handbook of Formulas and Tables for Signal Processing*. Boca Raton, 1999.
- [22] Reverberation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Reverberation>
- [23] SELF, Douglas. Op amps in small-signal audio design: Part 3: Selecting the right op amp. *EETimes: Connecting the Global Electronics Community* [online]. Aspencore, 7/27/2011 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1278963
- [24] SELF, Douglas. Op amps in small-signal audio design: Part 4: Selecting the right op amp (JFET-input types reviewed). *EETimes: Connecting the Global Electronics Community* [online]. Aspencore, 7/27/2011 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279027
- [25] Single coil guitar pickup. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Single_coil_guitar_pickup
- [26] SMITH, Steven. *The Scientist and Engineer's Guide To Digital Signal Processing*. Second edition. San Diego, Kalifornia: California Technical Publishing, 1999. ISBN 0-96601-7-6.
- [27] ST MICROELECTRONICS. *RM0410: STM32F76xxx and STM32F 77xxx advanced ARM ® -based 32-bit MCUs*. Rev2. Ženeva, Švýcarcko, 2016.

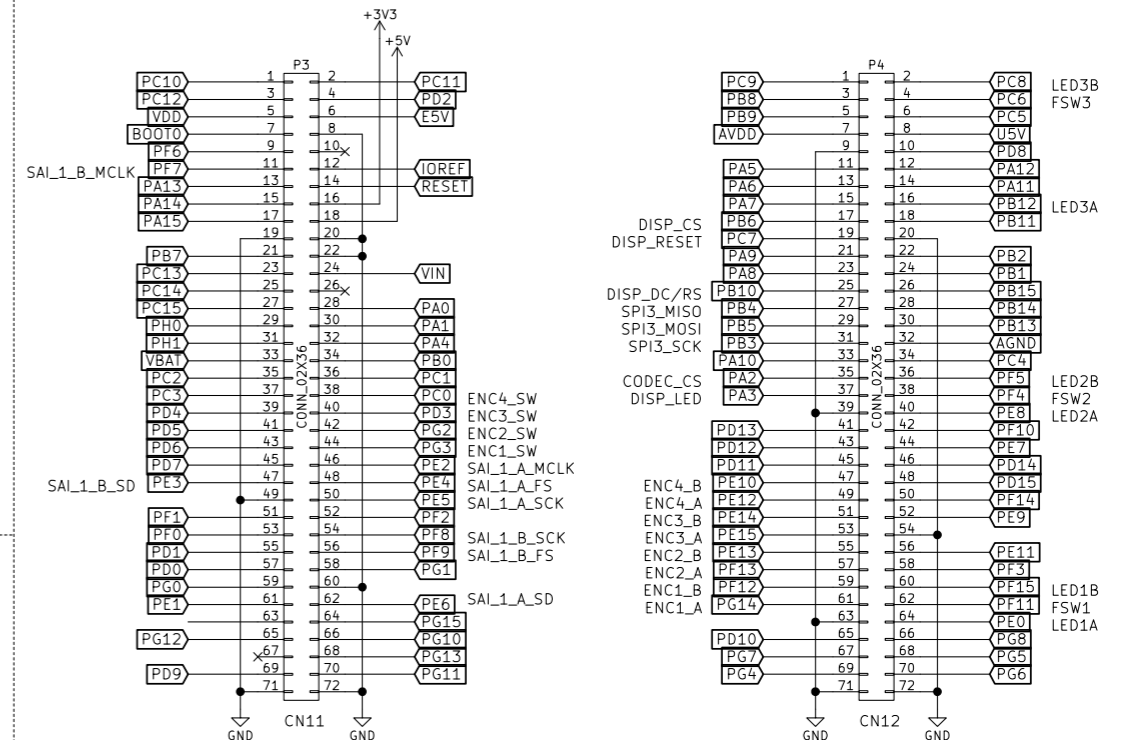
- [28] ST MICROELECTRONICS. *UM1974: STM32 Nucleo-144 board*. Rev5. Ženeva, Švýcarsko, 2017.
- [29] Teorie kompresorů a jejich využití v praxi: workshop. In: *Muzikus: Hudební portál* [online]. Praha: Muzikus, 2013, 2014 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-serialy/Teorie-kompresoru-a-jejich-pouziti-v-praxi-workshop~08~duben~2014/>
- [30] Teorie kompresorů a jejich využití v praxi II: workshop. In: *Muzikus: Hudební portál* [online]. Praha: Muzikus, 2013, 2014 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-serialy/Teorie-kompresoru-a-jejich-pouziti-v-praxi-II-workshop~20~kveten~2014/>
- [31] TEXAS INSTRUMENTS. *Inter-IC Sound (I2S) Bus: User Guide*. Dallas, Texas, 2014.
- [32] TEXAS INSTRUMENTS. *PCM3060: 24-BIT, 96/192-kHz ASYNCHRONOUS STEREO AUDIO CODEC*. Revised 2017. Dallas, Texas, 1978.
- [33] TEXAS INSTRUMENTS. *Serial Peripheral Interface (SPI): User Guide*. Dallas, Texas, 2012.
- [34] TEXAS INSTRUMENTS. *TL072: TL07xx Low-Noise JFET-Input Operational Amplifiers*. Revised 2017. Dallas, Texas, 1978.
- [35] TEXAS INSTRUMENTS. *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART): User Guide*. Dallas, Texas, 2010.
- [36] THE ANATOMY OF SINGLE COIL PICKUPS. *Seymour Duncan: Guitar Pickups, Bass Pickups, Pedals* [online]. Santa Barbara, 2015 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.seymourduncan.com/blog/the-tone-garage/the-anatomy-of-single-coil-pickups>
- [37] Tremolo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tremolo>

- [38] VACULÍKOVÁ, Polina. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů: Praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vř rušení*. Praha: Grada, 1998. ISBN 80-7169-568.
- [39] Wah-wah pedal. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Wah-wah_pedal

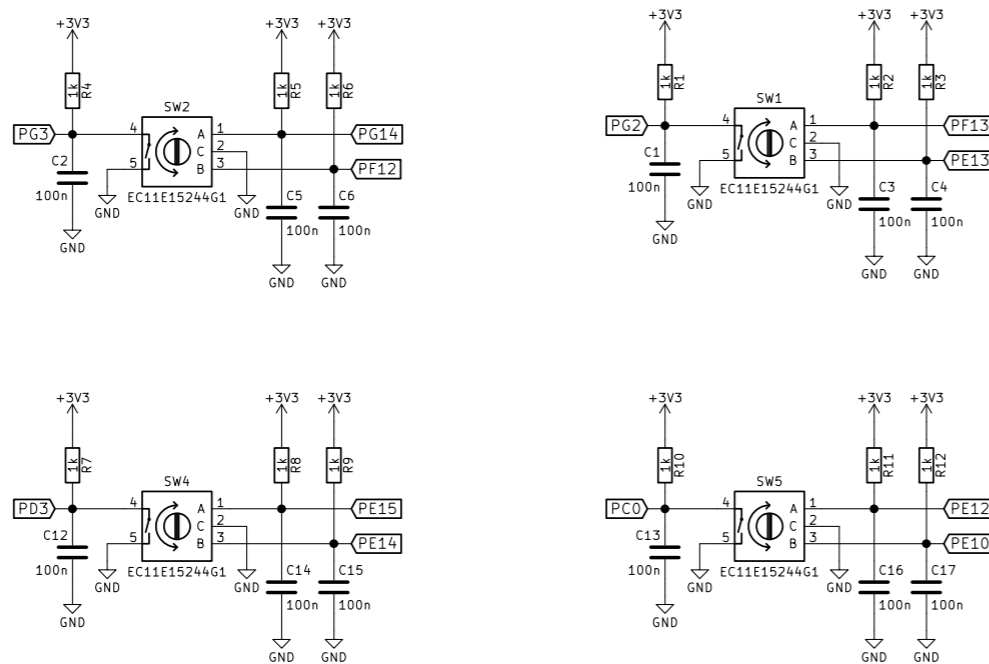
AUDIO CODEC AND RECONSTRUCTION FILTER SHEETS



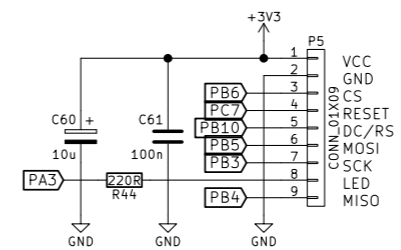
NUCLEO F767ZI MORPHO CONNECTOR



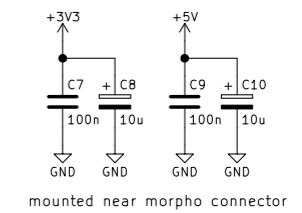
ROTARY ENCODERS WITH INTEGRATED BUTTONS



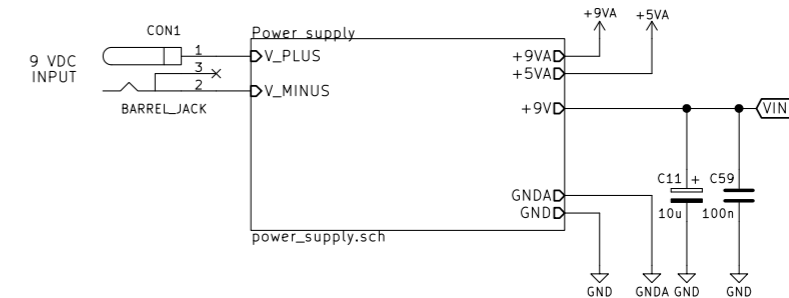
DISPLAY CONNECTOR



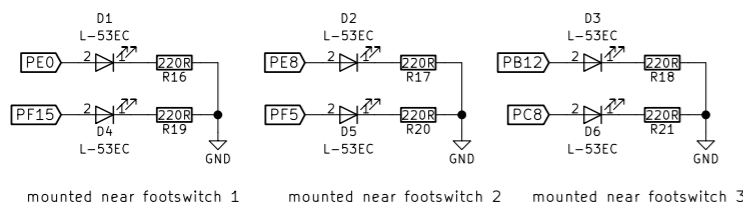
POWER SUPPLY FILTER



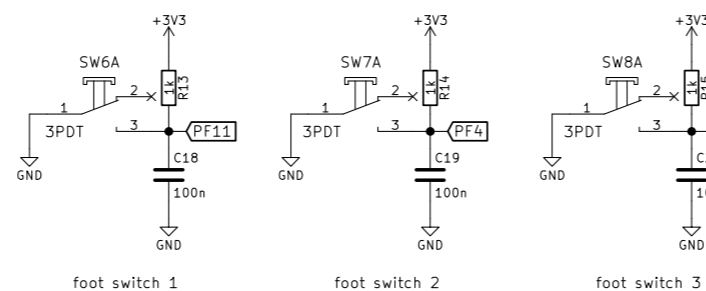
POWER SUPPLY SHEET



PANEL LEDS



FOOT SWITCHES



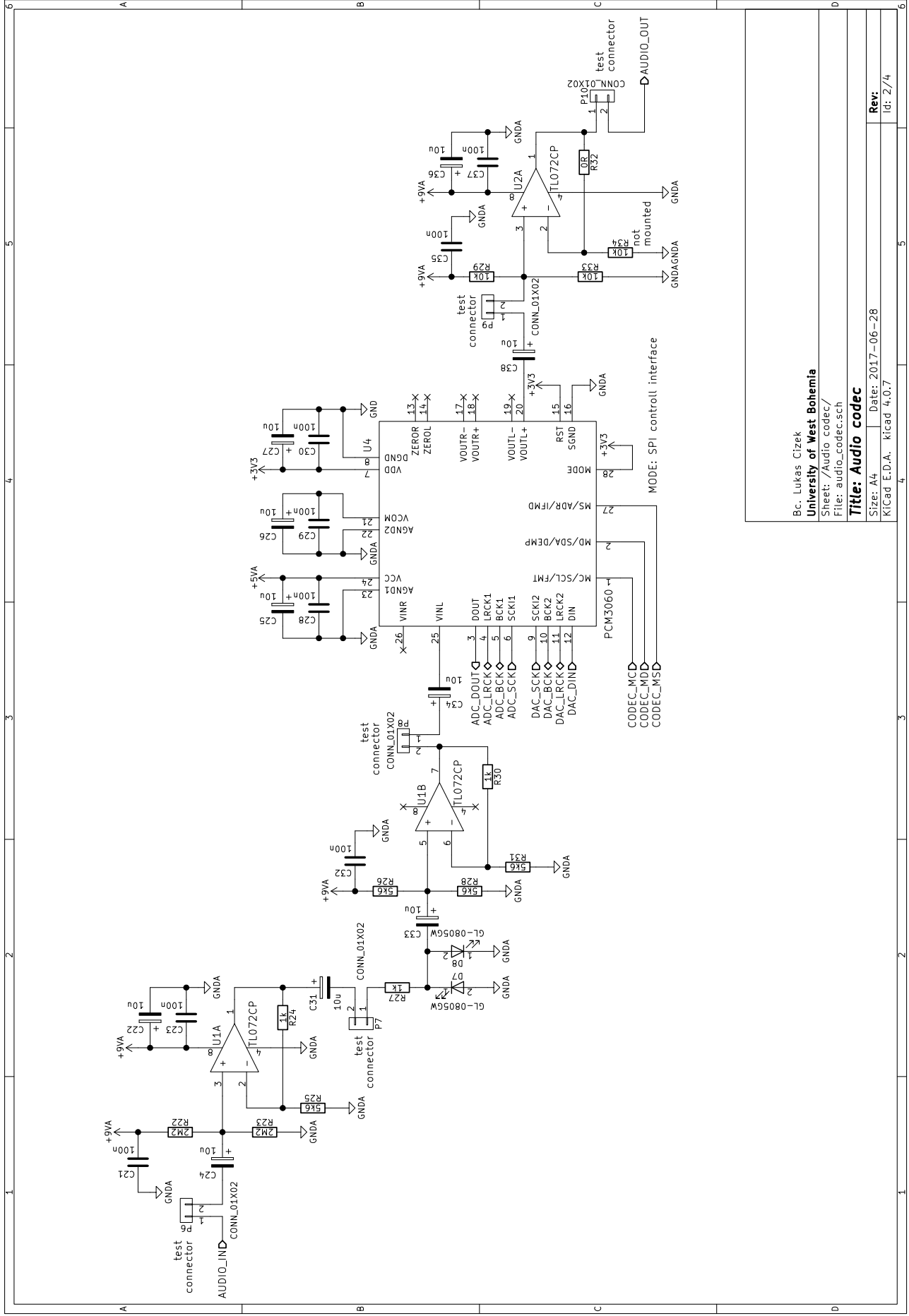
Bc. Lukas Cizek
 University of West Bohemia
 Sheet: /
 File: guitar_fx_cizelu.sch

Title: Guitar FX pedal

Size: A3 Date: 2017-06-28

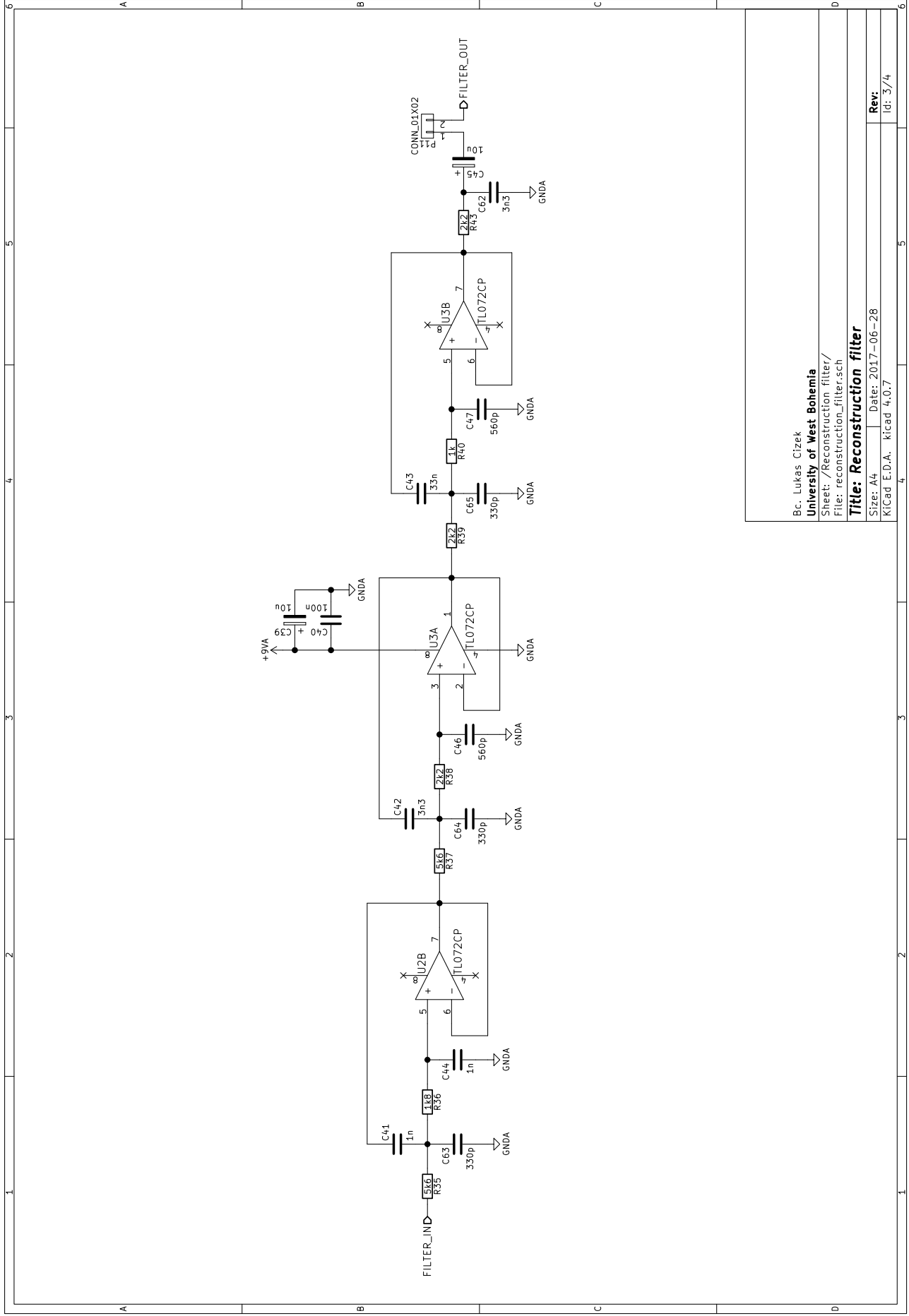
KiCad E.D.A. kicad 4.0.7

Rev: 1/4



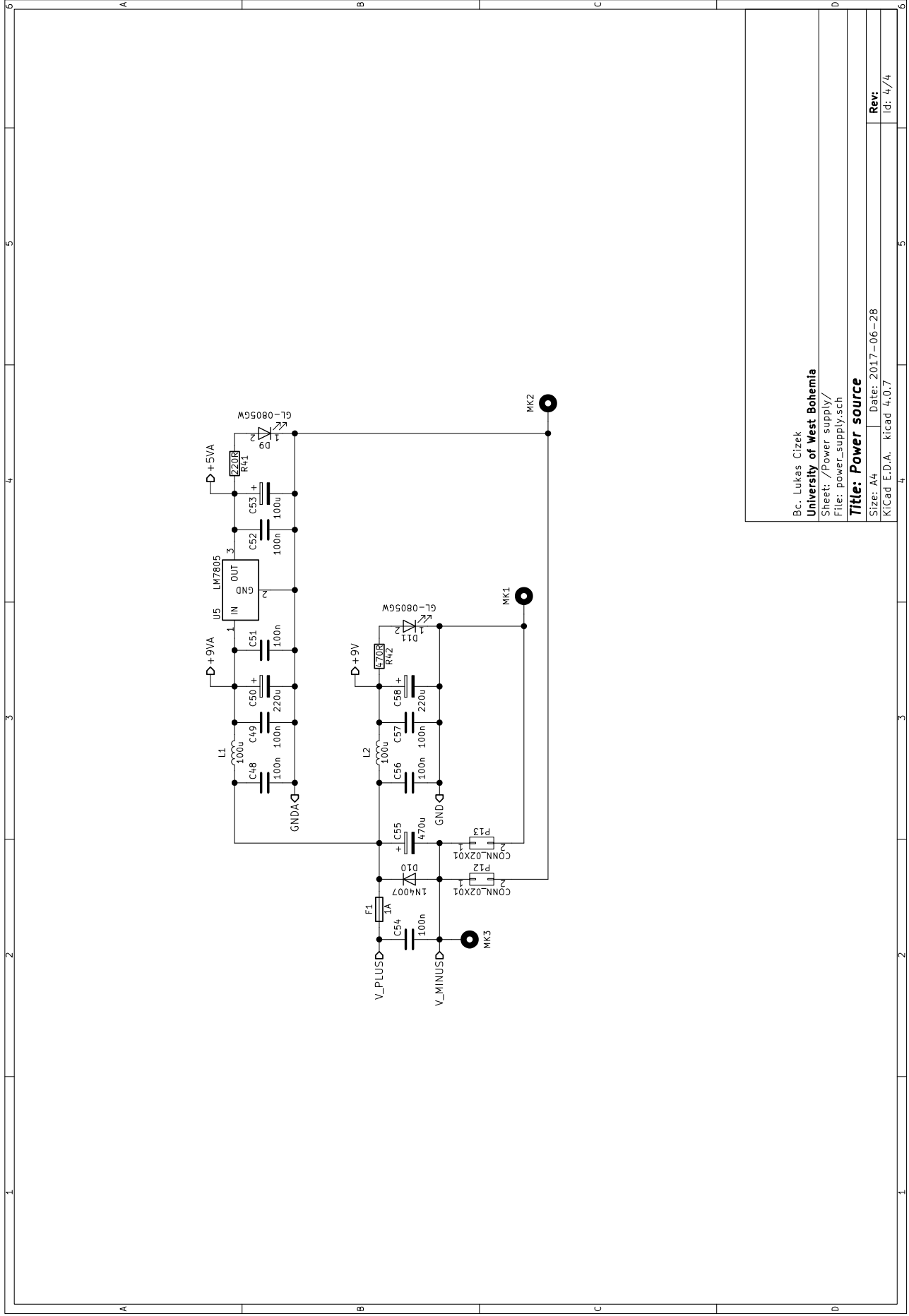
Bc. Lukáš Cizek
 University of West Bohemia
 Sheet: /Audio codec/
 File: audio_codec.sch
Title: Audio codec
 Size: A4
 Date: 2017-06-28
 KiCad E.D.A. kicad 4.0.7

Rev:
 Id: 2/4



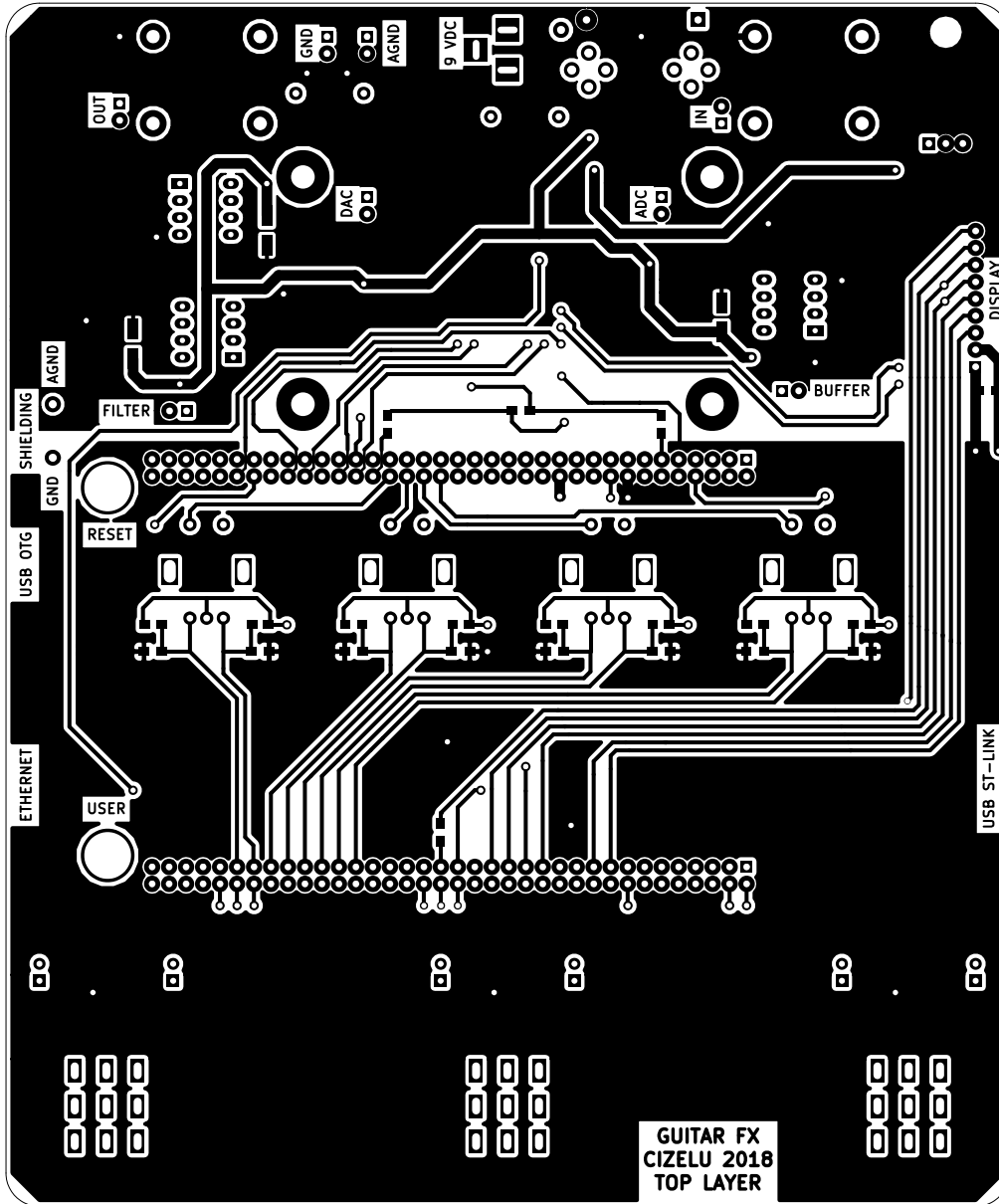
Bc. Lukas Cizek
 University of West Bohemia
 Sheet: /Reconstruction filter/
 File: reconstruction_filter.sch
Title: Reconstruction filter
 Size: A4 | Date: 2017-06-28
 KiCad E.D.A. kicad 4.0.7

Rev:
 Id: 3/4



Bc. Lukas Cizek
 University of West Bohemia
 Sheet: /Power supply/
 File: power_supply.sch
Title: Power source
 Size: A4 | Date: 2017-06-28
 KiCad E.D.A. kicad 4.0.7

Rev:
 Id: 4/4



GUITAR FX
CIZELU 2018
TOP LAYER

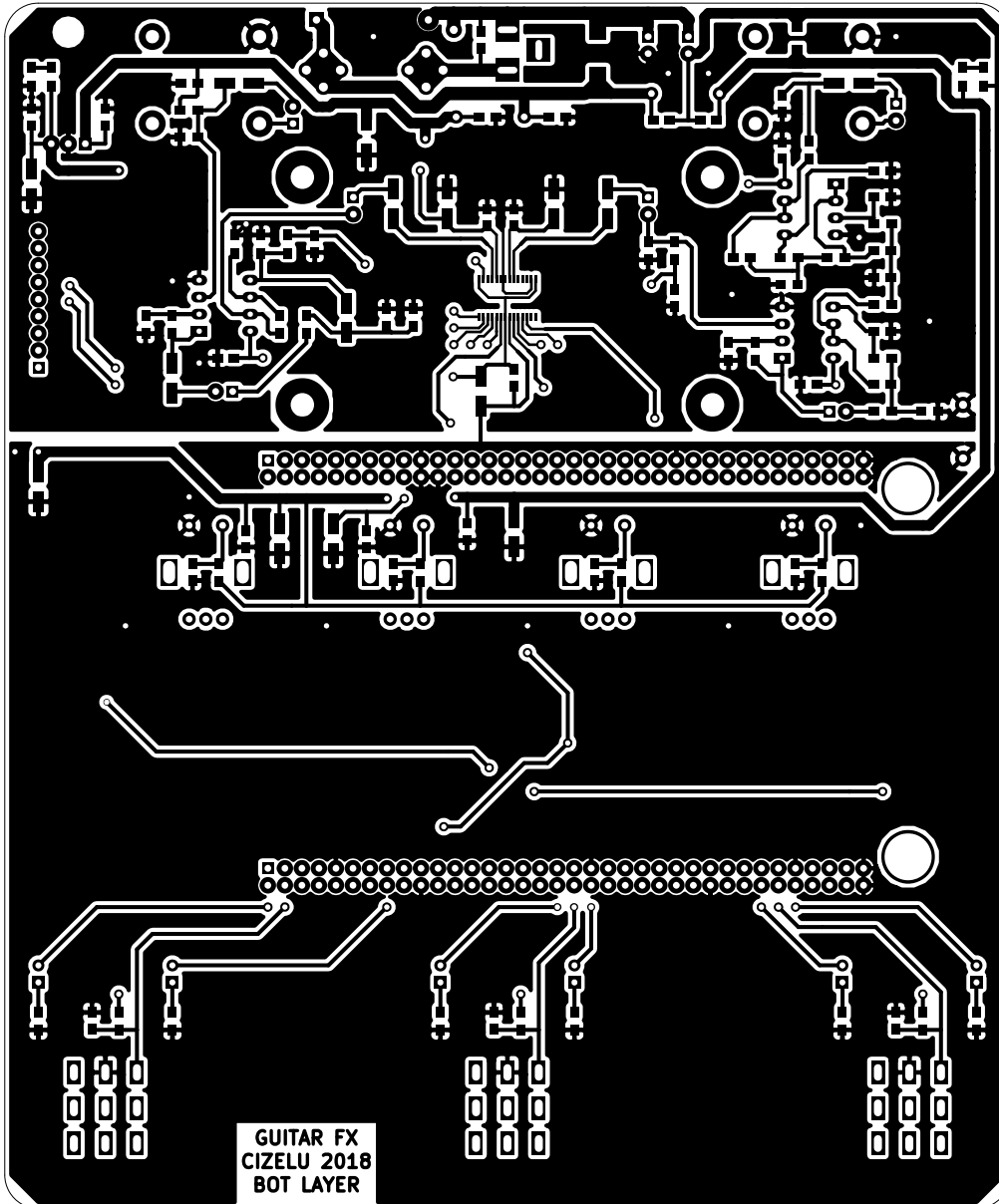
Bc. Lukas Cizek
University of West Bohemia

Sheet:
File: guitar_fx_cizelu.kicad_pcb

Title: Guitar FX pedal – drawing of copper – top

Size: A4 Date: 2018-05-09
KiCad E.D.A. kicad 4.0.7

Rev:
Id: 1/1



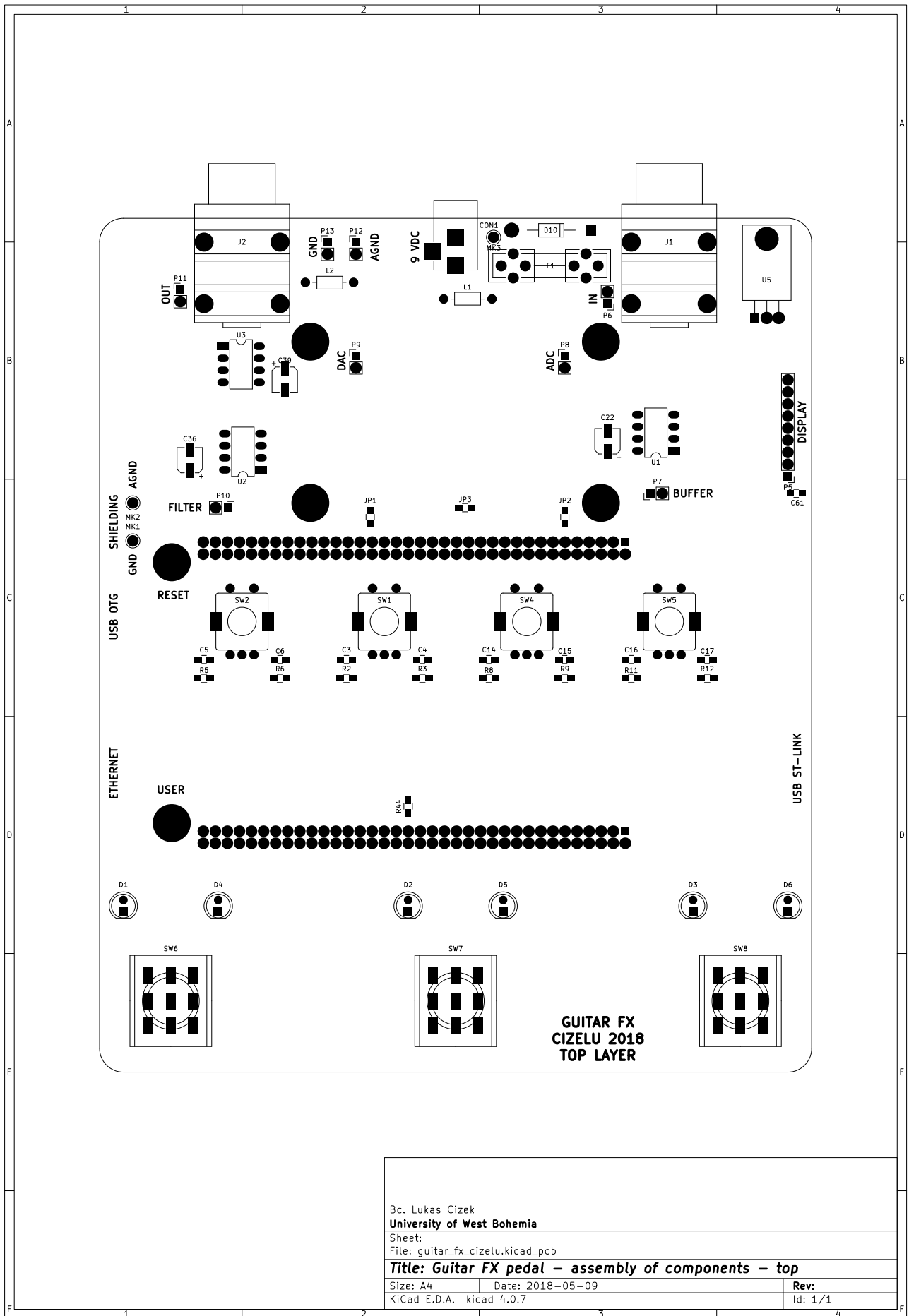
Bc. Lukas Cizek
University of West Bohemia

Sheet:
File: guitar_fx_cizelu.kicad_pcb

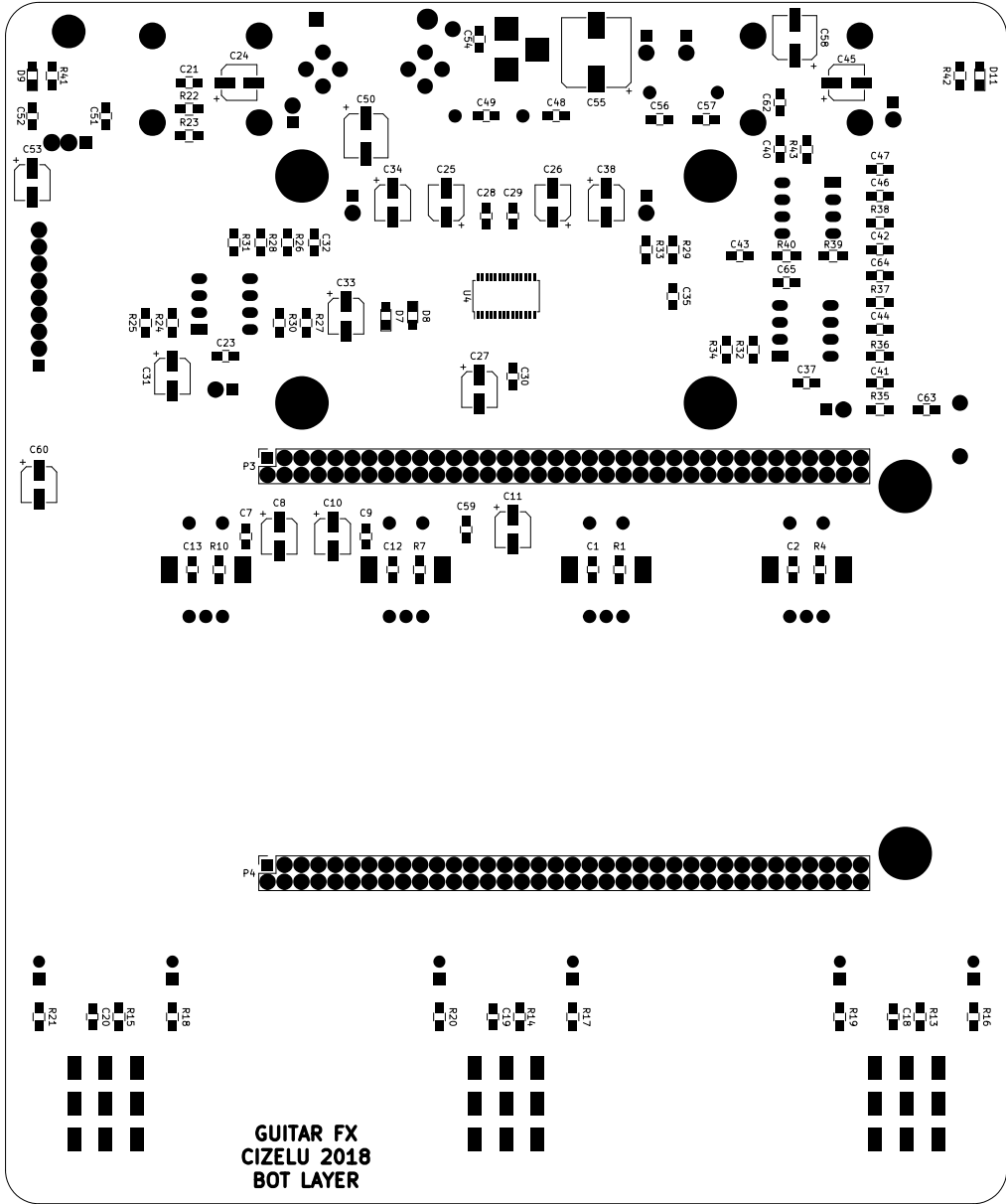
Title: Guitar FX pedal – drawing of copper – bot

Size: A4 Date: 2018-05-09
KiCad E.D.A. kicad 4.0.7

Rev:
Id: 1/1



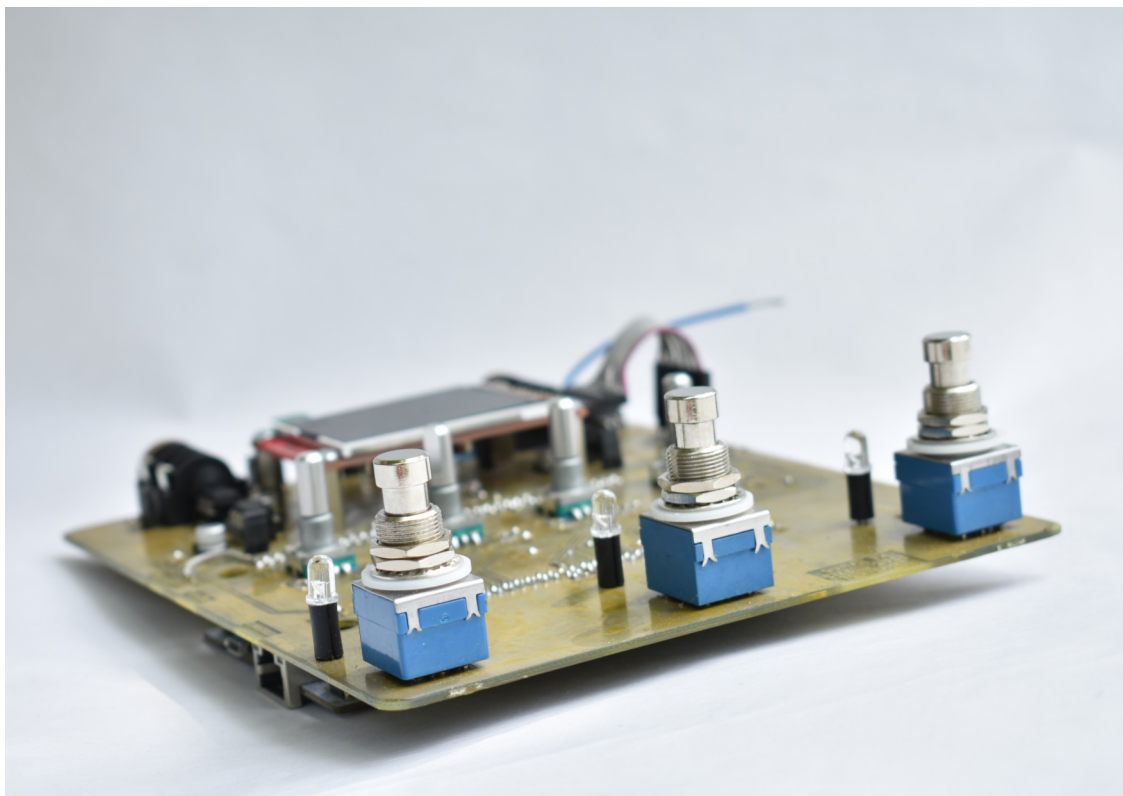
Bc. Lukas Cizek		
University of West Bohemia		
Sheet:		
File: guitar_fx_cizelu.kicad_pcb		
Title: Guitar FX pedal – assembly of components – top		
Size: A4	Date: 2018-05-09	Rev:
KiCad E.D.A. kicad 4.0.7		Id: 1/1



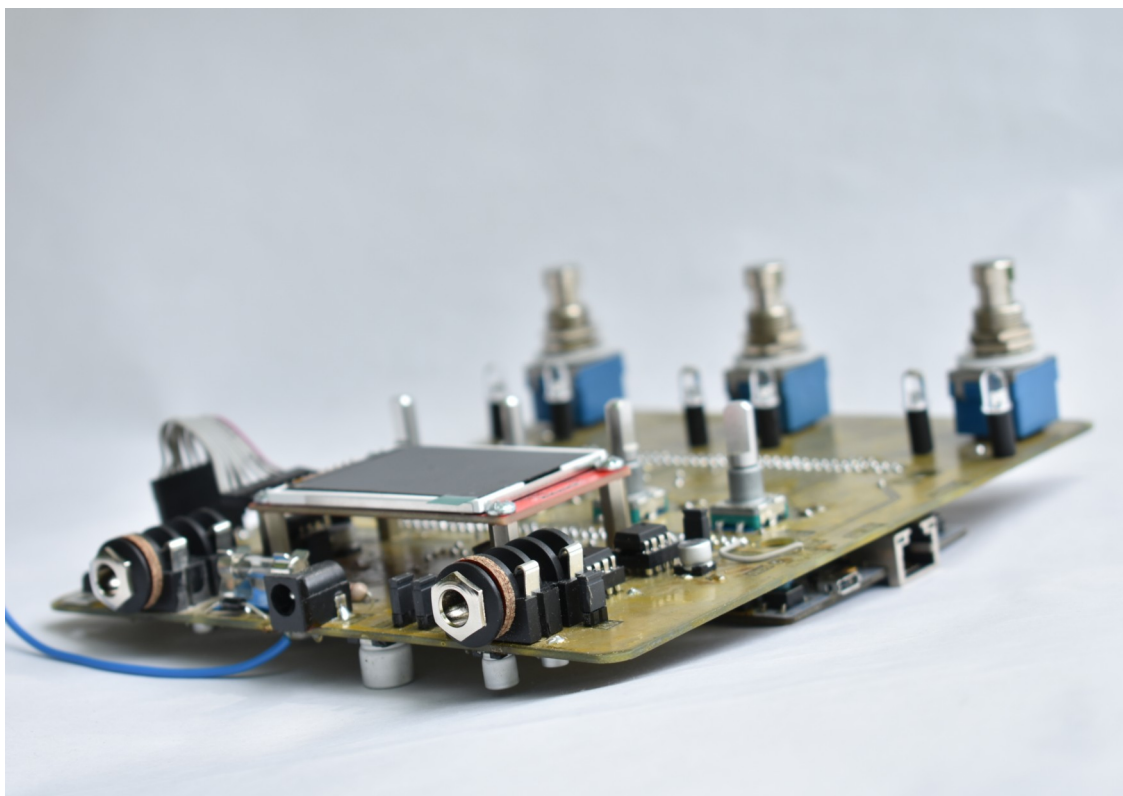
Bc. Lukas Cizek		
University of West Bohemia		
Sheet:		
File: guitar_fx_cizelu.kicad_pcb		
Title: Guitar FX pedal – assembly of components – bot		
Size: A4	Date: 2018-05-09	Rev:
KiCad E.D.A. kicad 4.0.7		Id: 1/1

Seznam součástek:

C1	100n	C39	10u	D11	GL-0805GW	R19	220R
C2	100n	C40	100n	F1	1A	R20	220R
C3	100n	C41	1n	J1	NYS2152	R21	220R
C4	100n	C42	3n3	J2	NYS2152	R22	2M2
C5	100n	C43	33n	JP1	JUMPER	R23	2M2
C6	100n	C44	1n	JP2	JUMPER	R24	1k
C7	100n	C45	10u	JP3	JUMPER	R25	5k6
C8	10u	C46	560p	L1	100u	R26	5k6
C9	100n	C47	560p	L2	100u	R27	1k
C10	10u	C48	100n	P3	CONN_02X36	R28	5k6
C11	10u	C49	100n	P4	CONN_02X36	R29	10k
C12	100n	C50	220u	P5	CONN_01X09	R30	1k
C13	100n	C51	100n	P6	CONN_01X02	R31	5k6
C14	100n	C52	100n	P7	CONN_01X02	R32	0R
C15	100n	C53	100u	P8	CONN_01X02	R33	10k
C16	100n	C54	100n	P9	CONN_01X02	R34	10k
C17	100n	C55	470u	P10	CONN_01X02	R35	5k6
C18	100n	C56	100n	P11	CONN_01X02	R36	1k8
C19	100n	C57	100n	P12	CONN_02X01	R37	5k6
C20	100n	C58	220u	P13	CONN_02X01	R38	2k2
C21	100n	C59	100n	R1	1k	R39	2k2
C22	10u	C60	10u	R2	1k	R40	1k
C23	100n	C61	100n	R3	1k	R41	220R
C24	10u	C62	3n3	R4	1k	R42	470R
C25	10u	C63	330p	R5	1k	R43	2k2
C26	10u	C64	330p	R6	1k	R44	220R
C27	10u	C65	330p	R7	1k	SW1	EC11E15244G1
C28	100n	CON1	BARREL_JACK	R8	1k	SW2	EC11E15244G1
C29	100n	D1	L-53EC	R9	1k	SW4	EC11E15244G1
C30	100n	D2	L-53EC	R10	1k	SW5	EC11E15244G1
C31	10u	D3	L-53EC	R11	1k	SW6	3PDT
C32	100n	D4	L-53EC	R12	1k	SW7	3PDT
C33	10u	D5	L-53EC	R13	1k	SW8	3PDT
C34	10u	D6	L-53EC	R14	1k	U1	TL072CP
C35	100n	D7	GL-0805GW	R15	1k	U2	TL072CP
C36	10u	D8	GL-0805GW	R16	220R	U3	TL072CP
C37	100n	D9	GL-0805GW	R17	220R	U4	PCM3060
C38	10u	D10	1N4007	R18	220R	U5	LM7805



Obr. 45 - Fotografie osazeného plošného spoje 1



Obr. 46 - Fotografie osazeného plošného spoje 2

