

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

Kytarový pedál s digitálním efektem zpoždění

Jan Krupka

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
Studijní program: Elektronika a komunikace
Květen 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krupka** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **507305**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Kytarový pedál s digitálním efektem zpoždění

Název bakalářské práce anglicky:

Guitar Pedal with Digital Delay Effect

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte kytarový pedál na úpravu signálu z kytarového snímače. Pedál má zajišťovat dva základní typy zvukových efektů a to zkreslení (distortion) a zpoždění (delay). Prostudujte možnosti realizace každého efektu s tím, že pro zkreslení se zaměřte na implementaci pomocí analogové techniky a pro efekt zpoždění využijte digitální zpracování s vhodným typem procesoru. Návrh analogové části ověřte nejprve pomocí simulace, přičemž porovnejte výsledky své tranzistorové implementace se známým zapojením s elektronkami. Celkovou funkci pedálu pak dle možností ověřte na funkčním vzorku, který pro tento účel sestavte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Dailey, Denton J. (2011). Electronics for Guitarists. Springer. ISBN 9781441995360.
- [2] Boehnlein, John (1998). The High Performance Marshall Handbook: A Guide to Great Marshall Amplifier Sounds. Guitar History Series. Vol. 6. Bold Strummer Ltd. p. 37. ISBN 0-933224-80-X.
- [3] Princeton Technology Corp: PT2399 [online]. [cit. 2024-02-01]. Dostupné z https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1806132210_PTC-Princeton-Tech-PT2399_C84963.pdf

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka katedra teorie obvodů FEL

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **02.02.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce doc. Dr. Ing. Jiřímu Hospodkovi, za jeho čas a pomoc při mé bakalářské práci. Další a největší poděkování pak patří mé rodině a Anně Hruškové, skvělé hudebnici, která mě k této práci inspirovala, za jejich pomoc, trpělivost a nikdy nekončící podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 24. května 2024

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou návrhu kytarového efektu na bázi clippingu a efektu Echo/Delay. Prochází nejvyužívanější metody realizace zapojení efektů na bázi clippingu jako jsou overdrive, distortion, fuzz. Je popsána problematika jednotlivých metod a vybrána ta nejvhodnější. Návrh je odsimulován a porovnán se simulací elektronkového předzesilovače Marshalla 1959, který je považován za klasiku zvuku Rock and Rollu. Digitální část se skládá z předzesilovačů a návrhů filtrů pro zpracování již zkresleného signálu, digitálním procesorem PT2399. Efekty jsou sloučeny na jedné PCB desce a jsou ovládnány pomocí sedmi potenciometrů. Pedál lze napájet 9V baterií nebo standardním zdrojem napájení kytarových pedálů.

Klíčová slova: zkreslení, overdrive, clipping, zvukový signál, kytarový pedálový efekt, delay efekt, PT2399

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka

Abstract

This paper deals with the issue of designing a guitar effect based clipping and effect Echo/Delay. It goes through the most used methods of implementing clipping based effects such as overdrive, distortion, fuzz. The problems of each method are described and the most suitable one is selected. The design is simulated and compared with a simulation of the Marshall 1959 tube preamplifier, which is considered a classic of the Rock and Roll sound. The digital part consists of the pre-amps and filter designs for processing, already distorted signal, by a PT2399 digital processor. The effects are combined on one PCB board and are controlled by seven potentiometers. The pedal can be powered by a 9v battery or a standard guitar pedal power supply.

Keywords: distortion, overdrive, clipping, audio signal, guitar pedal effect, delay effect, PT2399

Title translation: Guitar Pedal with Digital Delay Effect

Obsah

1 Úvod	1
2 Teoretický rozbor	3
2.1 Zvukové efekty	3
2.2 Zvukové pedály	3
2.2.1 Clipping efekty	4
3 Návrh kytarového efektového pedálu	5
3.1 Realizace overdrive efektu	5
3.1.1 Diody	5
3.1.2 Operační zesilovač	6
3.1.3 Tranzistory	7
3.1.4 Elektronky	7
3.2 Zapojení overdrive efektu	8
3.2.1 Zapojení s tranzistory	8
3.2.2 Simulace s tranzistory	14
3.2.3 Zapojení s elektronkami	16
3.2.4 Simulace s elektronkami	16
3.2.5 Porovnání	17
3.3 Delay/Echo	17
3.3.1 Výběr procesoru	17
3.3.2 Zapojení	19
3.4 Napájení, indikace a konektory .	23
3.4.1 Napájení	23
3.5 PCB	24
3.5.1 Návrh PCB	24
4 Zhodnocení dosažených výsledků práce	27
5 Závěr	29
5.1 Budoucí vylepšení	30
6 Přílohy	31
Literatura	37

Obrázky

1.1 Pohled zeshora na kompletně sestavený digitální kytarový pedál s efekty Echo/Delay a Overdrive . . .	1	3.20 Část zapojení s procesorem PT2399	20
1.2 Pohled zezadu na kompletně sestavený digitální kytarový pedál s efekty Echo/Delay a Overdrive . . .	2	3.21 Předzesilovač jako invertující zapojení OZ s filtrem	21
3.1 Kytarový pedál Marshall The Guv'nor (ořez signálu za pomoci diod D_1 a D_2) [2]	6	3.22 Konečný zesilovací stupeň s mixem čistého a zpožděného signálu	22
3.2 Neinvertující operační zesilovač [4]	7	3.23 Sestavení digitálního zapojení Echo/Delay efektu na nepájivém poli	22
3.3 Ukázky elektronek	9	3.24 Napájení z adaptéru nebo z baterie	23
3.4 Celá analogová část overdrive/distortion	9	3.25 Thomann SW1045 latched Footswitch[19]	24
3.5 Předzesílení operačním zesilovačem TL072	10	3.26 Všechny vrstvy PCB desky . . .	26
3.6 Průběhy signálu v přeszesilovači	11	4.1 Hotová a osazená PCB deska kytarového pedálu	27
3.7 Rozdílové zapojení tranzistorů . .	12		
3.8 Průběhy signálu rozdílového zapojení tranzistorů	13		
3.9 Konečný zesilovací stupeň s nastavitelným tónem a celkovou hlasitostí	13		
3.10 Sestavené analogové zapojení overdrive/distortion efektu na nepájivém poli	14		
3.11 Simulace analogového zapojení overdrive/distortion efektu v programu Geec	15		
3.12 Amplituda vstupního a výstupního signálu z overdrive/distortion části	15		
3.13 FFT výstupního signálu z overdrive/distortion části	15		
3.14 Simulovaná elektronková část Marshallu 1959	16		
3.15 Tabulka napěťových hodnot pro napájení elektronek ECC83[15] . . .	17		
3.16 Amplituda vstupního a výstupního signálu z předzesilující části Marshall 1959	18		
3.17 FFT výstupního signálu předzesilující části Marshallu 1959	18		
3.18 PT2399[18]	19		
3.19 Ukázkové zapojení PT2399 Echo[17]	19		

Tabulky

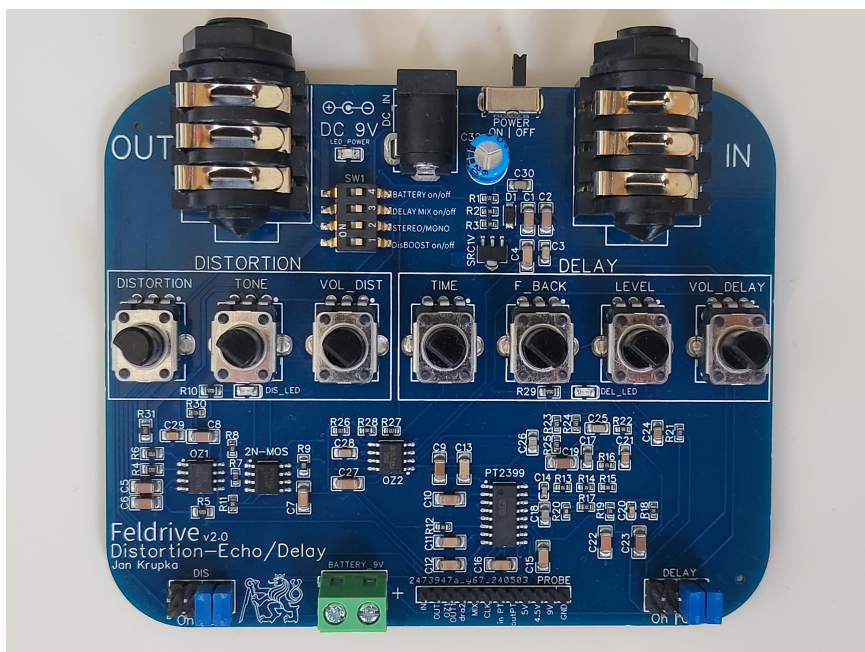
3.1 Tabulka proměnných pro vzorec (3.1)	6
3.2 Hodnoty nastavení neinvertujícího OZ pro vstupní signál	11

Kapitola 1

Úvod

V moderní hudební produkci hrají zvukové efekty zásadní roli při tvarování a charakterizaci zvuku hudebních nástrojů. Pro kytaristy jsou efektové pedály klíčovým nástrojem, které umožňují vytvářet širokou škálu zvukových textur a dynamiky. Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací kytarového pedálu, který kombinuje digitální efekt zpoždění (delay) a analogové zkreslení (overdrive).

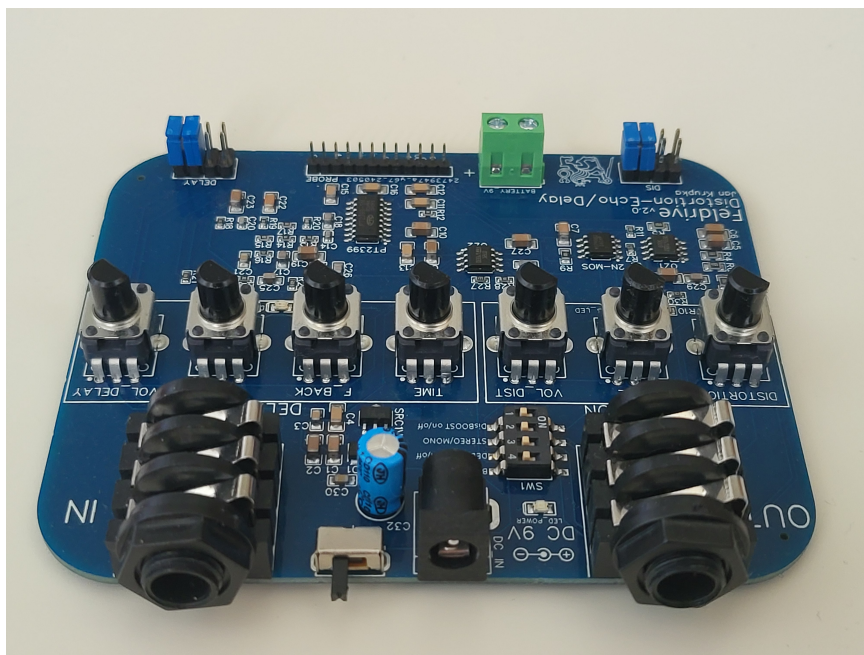
Práce je rozdělena do několika hlavních částí. Nejprve je v teoretické části popsána problematika zvukových efektů a jejich význam v hudební produkci. Dále se práce věnuje detailnímu rozboru jednotlivých technologií a metod použitých při návrhu pedálu. V experimentální části je poté popsán samotný návrh a realizace pedálu, včetně simulací a testování výsledných zvukových charakteristik.



Obrázek 1.1: Pohled zeshora na kompletně sestavený digitální kytarový pedál s efekty Echo/Delay a Overdrive

Nejprve je prototyp efektového pedálu sestaven na nepájivém poli, kde jsou jednotlivé části zapojeny a otestovány. Následuje výroba PCB desky, která je realizována prostřednictvím společnosti JLCPCB, což umožňuje vytvoření kvalitního a dobře funkčního pedálu s možností budoucí sériové velkovýroby. Celý pedál je následně úspěšně vyzkoušen a prokazuje požadované zvukové vlastnosti a stabilitu při provozu.

Tato práce si klade za cíl nejen poskytnout technické řešení, ale také přispět k pochopení a rozšíření znalostí o návrhu a výrobě efektových pedálů pro kytary.



Obrázek 1.2: Pohled zezadu na kompletně sestavený digitální kytarový pedál s efekty Echo/Delay a Overdrive

Kapitola 2

Teoretický rozbor

2.1 Zvukové efekty

Zvukové efekty jsou různé techniky a nástroje, které se používají ke změně nebo vylepšení zvuku hudebních nástrojů. Tyto efekty mohou být vytvářeny pomocí analogových nebo digitálních zařízení, jako jsou efektové pedály, rackové jednotky, syntetizátory a softwary pro zpracování zvuku.

Mezi běžné zvukové efekty patří zkreslení, reverb, echo, overdrive a pitch shifting. Tyto efekty umožňují hudebníkům a producentům experimentovat se zvukem, přidávat různé textury a dimenze do hudebních skladeb. Zvukové efekty jsou klíčovou součástí moderní hudební produkce a mají zásadní vliv na charakter a styl mnoha žánrů, od rocku a popu po elektronickou a experimentální hudbu.

2.2 Zvukové pedály

Zvukové efekty v podobě pedálů, známé také jako efektové pedály, jsou elektronická zařízení určená pro upravování a modifikaci zvuku hudebních nástrojů, nejčastěji elektrických kytar. Tyto pedály umožňují hudebníkům vytvářet širokou škálu zvukových efektů jmenovaných výše.

Efektové pedály jsou typicky ovládány nohou, což umožňuje kytaristům či jiným hudebníkům aktivovat a deaktivovat efekty během vystoupení, aniž by museli používat ruce. Tímto způsobem se pedály stávají integrální součástí výrazových schopností hudebníka, umožňující mu rychle a efektivně měnit zvuk svého nástroje a tím obohacovat hudební performance.

Kapitola 3

Návrh kytarového efektového pedálu

3.1 Realizace overdrive efektu

Zaměříme se na overdrive, jelikož má ze všech clipping efektů nejměkčí zkreslení vhodný na blues a rock.

Jak už bylo řečeno v sekci 2.2.1, na ořízn signálu se používají především diody, operační zesilovače a tranzistory. Používají se i elektronky, ale ty z důvodu velikosti, ceny a vysokému provoznímu napětí, nejsou v práci využity. Využívá se jejich nelineární charakteristika, která zkresluje signál[1].

3.1.1 Diody

Ideální dioda propouští pouze kladnou část signálu, avšak je využito skutečnosti, že reálná dioda začíná vést až od určitého napětí, jak si povšimnout ze vztahu

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{n k T}} - 1 \right), \quad (3.1)$$

kde proměnné jsou viz tab. 3.1. Pokud jsou použity v zapojení paralelně dvě diody k zemi, náběh signálu se propustí, ale od určitého napětí se již ořízne. Napětí lze zvětšit, pokud je zapojeno sériově více diod.

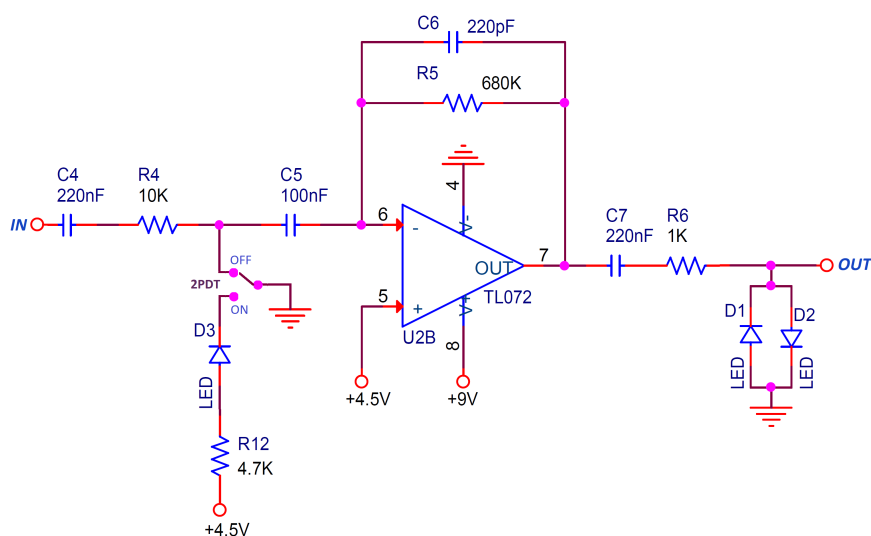
Ukázka zapojení komerčně dostupného pedálu Marshall Guv'nor

Na obr. 3.1 se nachází operační zesilovač v invertujícím zapojení. Na jeho výstupu jsou antiparalelně zapojené dvě diody, které signál, po překročení úrovně, ořezávají. Tento typ diodového ořezu se používá také u jiných pedálů, např. Boss DS1, RAT, Distortion+ a Kon Centaur.

Kondenzátor C_4 je pouze pro eliminaci stejnosměrného napětí z předešlého obvodu. Na výsledný zvuk nemá žádný vliv.

Pedálový spínač 2PDT spojuje LED diodu D_3 se zemí, pokud je pedál zapnutý. Když je pedál vypnutý, vstup operačního zesilovače se uzemní, aby se obvod nedostal do oscilací.

Kondenzátor C_5 blokuje stejnosměrné napětí z operačního zesilovače, jestliže je pedál vypnutý. Pedálový spínač 2PDT připojí operační zesilovač k zemi, tudíž C_5 zabraňuje zkratu mezi +4,5 V a 0 V.



Obrázek 3.1: Kytarový pedál Marshall The Guv'nor (ořez signálu za pomoci diod D_1 a D_2) [2]

Rezistor R_6 omezuje velikost proudu do antiparalelně zapojených diod. Standardní hodnota je $1\text{ k}\Omega$, kterou také využívají i jiné pedály, např. Pro-Co Rat a Klon Centaur. Boss DS-1 využívá například $2,2\text{ k}\Omega$ [2].

Díky rychlému sepnutí diod je však clipping velmi ostrý a vytváří ze signálu až obdélníkový tvar. Ostré hrany, které vznikají, povedou k výraznějšímu vzniku vyšších lichých harmonických [1]. Pro efekt fuzz je perfektní, avšak pro náš overdrive je příliš tvrdý a ostrý.

Tabulka 3.1: Tabulka proměnných pro vzorec (3.1)

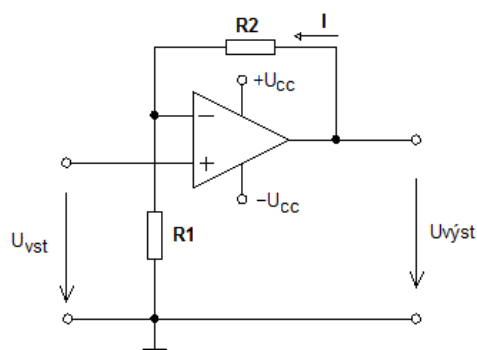
Proměnná	Název proměnné
I	proud
I_0	proud v saturaci
U	napětí
n	činitel kvality
k	Boltzmannova konstanta ($8.62 \times 10^{-5}\text{ eV K}^{-1}$)
T	teplota v Kelvinech

3.1.2 Operační zesilovač

Princip spočívá v zesíleném signálu operačním zesilovačem, dále již OZ, do takové míry, až dochází k jeho zkreslení při dosažení limitu napětového rozsahu OZ.

Jak je ukázáno na příkladu zapojení neinvertujícího OZ [3] (viz obr. 3.2). Na OZ je přivedeno externí symetrické napájení $\pm 4\text{V}$. Pomocí vztahu

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3.2)$$



Obrázek 3.2: Neinvertující operační zesilovač [4]

je nastaveno $R_1 = 25 \text{ k}\Omega$ a $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ na požadované zesílení $A = 5$. Následně, pokud signál bude $\pm 1\text{V}$, operační zesilovač se ho pokusí zesílit až na $\pm 5\text{V}$, ale kvůli limitaci svého napájení dokáže zesílit pouze na $\pm 4\text{V}$, neboli ořízne špičky signálu.

Je důležité poznamenat, že při přetížení se snaží operační zesilovač až do konce zesílovat lineárně, což pak vede k velmi ostrým ořezům, které podobně jako u diod se více hodí na fuzz. Samotný bod saturace se může lišit kus od kusu a není na něj spolehnutí. V mnoha kytarových pedálech je tedy clipping realizován kontrolovanějšími metodami, jako je použití diod nebo transistorů, aby bylo dosaženo specifických charakteristik zkreslení, a aby byla zajištěna stabilita zařízení.

3.1.3 Tranzistory

Tranzistor se chová lineárně během přechodu z oblasti sepnutí do aktivní oblasti. Během přechodu z aktivní oblasti do oblasti saturace však už lineární není. Principu je následně využito. Část průběhu vstupního signálu, která udržuje tranzistor v aktivní oblasti, se na výstupu objeví bez jakéhokoliv zkreslení. Za použití rozdílového zapojení tranzistorů [5], lze jako u OZ zesílit signál nad úroveň, kdy jsou tranzistory ještě schopné lineárně zesílovat a začnou uřezávat vyšší úroveň signálu, vedoucí k požadovanému efektu. Avšak, na rozdíl od OZ, který se snaží až do bodu saturace zesílovat co nejdéle lineárně, tranzistory přestanou pomalu zesílovat až do ořezu. Stejný jev se děje i u elektronkových zesilovačů, taktéž mající dynamické zesílení. Lze tak přecházet od jemného zkreslení po plnou saturaci při vyšším vstupním signálu.

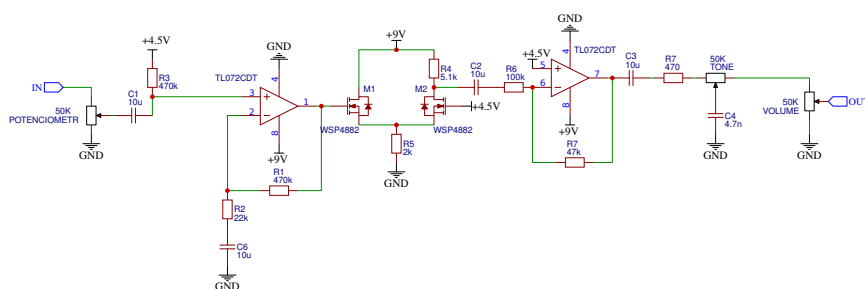
3.1.4 Elektronky

Elektronky, známé také jako vakuové trubice, jsou elektronické součástky používané k zesílování, přepínání, nebo modifikaci elektrického signálu. Skládají se z několika elektrod umístěných uvnitř uzavřené skleněné nebo kovové baňky, ze které je vyčerpán veškerý vzduch (vakuová). Základní princip



(a) : Samotná elektronka JJ Electronic ECC83S/12AX7 [9] (b) : Overdrive pedál s elektronkou 12AX7 [10]

Obrázek 3.3: Ukázky elektronek



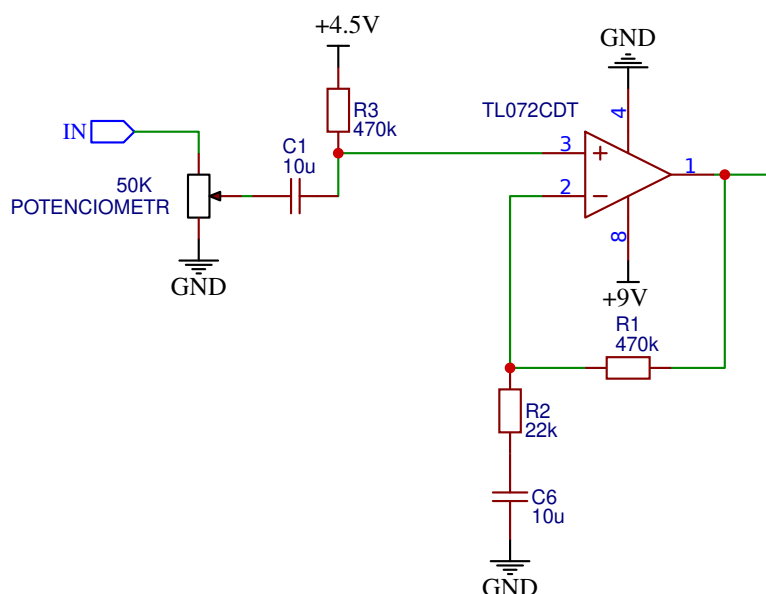
Obrázek 3.4: Celá analogová část overdrive/distortion

■ Předzesilovač s OZ

První část je věnována předzesilovací části analogového obvodu (viz obr. 3.5). Vstup z kytary vede rovnou do první části. Nejprve je vstupní signál stáhnut k zemi za pomoci potenciometru 50 k Ω , tím je nastavitelná jeho úroveň s jakou bude pokračovat na další zpracování za pomoci tranzistorů. Jelikož tranzistory vzhledem k intenzitě signálu mění dynamicky zkreslení, lze potenciometrem měnit samotnou intenzitu zkreslení. Proto se jedná o distortion nastavitelný knob na pedálu.

Aby vstupní signál, který může být generovaný i z měkkého zdroje, například pasivní elektronické kytary, nebyl zbytečně zatížen a zachovala se jeho integrita, je zesilován pomocí neinvertujícího zapojení operačního zesilovače.

Vzhledem k tomu, že zdroj napájení pro operační zesilovač používá 9V baterii nebo 9V adaptér, vzniká situace s nesymetrickým napájením OZ.



Obrázek 3.5: Předzesílení operačním zesilovačem TL072

Tento fakt vyžaduje, aby byl vstupní signál zvednut, přes R_3 , na hladinu polovičního napětí napájení, tedy přibližně na 4,5 V. Tento krok je proveden proto, aby mohl být signál zpracován nesymetrickým napájením. Po této úpravě je signál zesílen v operačním zesilovači pro další části obvodu. Aby se nám stejnosměrné napětí nedostávalo do dalších částí obvodů, jsou zde dány oddělovací kondenzátory C_1 , $C_6 = 10 \mu\text{F}$

Vstupní audio signál se pohybuje v rozmezí $\pm 0,1$ až $\pm 1,2\text{V}$ podle toho, zda daná elektrická kytara má aktivní nebo pasivní snímače. Zesílení je nastaveno rezistory R_1 a R_2 (viz tab. 3.2) a podle vztahu 3.2 na přibližně $A = 22$.

Operační zesilovač je zvolen TL072CDT od Texas Instruments. TL072 se používá především v aplikacích před zesílení zvuku, kde je vyžadována vysoká přesnost z hlediska nízkých harmonických a šumu. Jeho hlavní vlastnosti [11]:

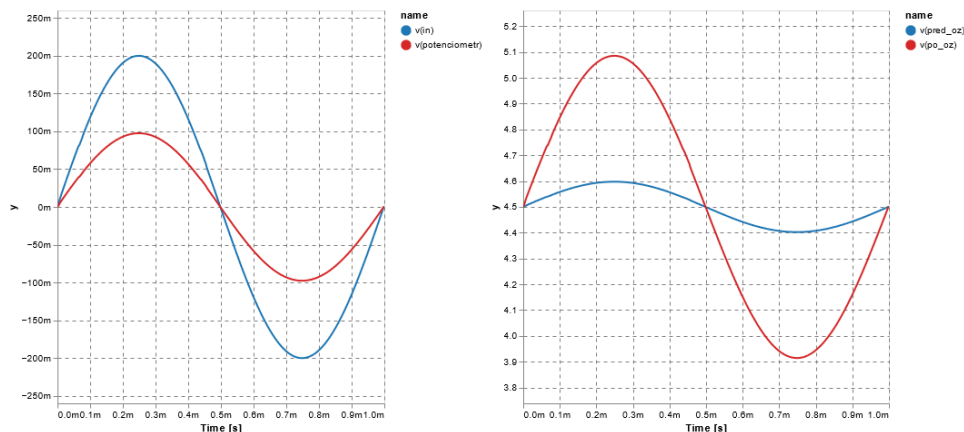
- **Nízký šum** ($\text{CMRR}^1 = 70 \text{ dB}$): Nízký šum TL072 zajišťuje, že výsledný zvuk bude jasný a čistý.
- **Nízké zkreslení** ($\text{THD} = 0,003 \%$): Tento operační zesilovač nabízí nízké zkreslení signálu důležité pro věrnou reprodukci zvuku. Je zde zajištěno, že signál bude zesílen bez nežádoucích změn v jeho charakteru.
- **Široké frekvenční pásmo** ($\text{BW}^2 = 3 \text{ MHz}$): TL072 má široké frekvenční pásmo, které umožňuje přesné zesílení signálů v celém slyšitelném spektru nezbytné pro kvalitní audio zesilovače.
- **Dostupnost a cena:** TL072 je snadno dostupný a relativně levný, čímž se stává oblíbenou volbou pro širokou škálu využití.

¹Potlačení souhlasného rušení

²BW je Bandwidth, neboli šířka pásma

Tabulka 3.2: Hodnoty nastavení neinvertujícího OZ pro vstupní signál

$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	Zesílení A
470k	22k	22,36



(a) : Vstupní signál a následné snížení úrovně potenciometrem

(b) : Přidání jeho stejnosměrné složky (před OZ) a jeho zesílení OZ (po OZ)

Obrázek 3.6: Průběhy signálu v přeszesilovači

Na obrázku 3.6, je zobrazený postupný časový průběh signálu. Po vstupu z elektrické kytary je signál ztlumen potenciometrem 3.6 (a). Následně je jeho hladina zvýšena na 4,5 V a signál je zesílen operačním zesilovačem 3.6 (b).

Zkreslení tranzistory

Po zesílení signálu přichází jeho zkreslení za použití rozdílového zapojení tranzistorů (viz obr. 3.7) [8].

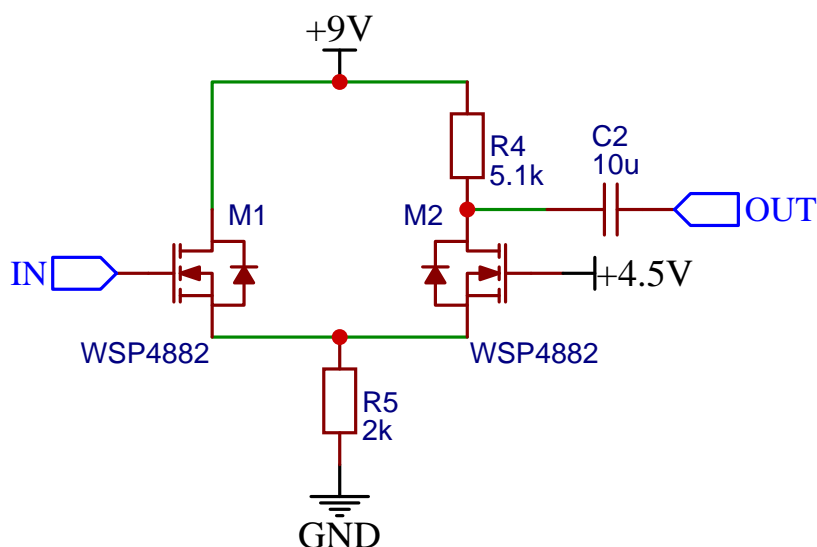
Tranzistory jsou zvoleny MOSFETy (metal–oxide–semiconductor field-effect transistor), které jsou řízeny elektrickým polem, kdy vodivost kanálu mezi elektrodami source (S) a drain (D) je řízena napětím na elektrodě gate (G), která je tvořena kovem (nebo polykrystalickým křemíkem) odizolovaným od zbytku struktury tenkou vrstvičkou oxidu křemičitého.

Díky spínání MOSFETů napětím a zároveň nízkému odporu v sepnutém stavu $R_{ds(on)}$, mají velmi malé ztráty a jsou vhodné i na napájení z baterie. MOSFETy pracují v režimech:

Zesilovací režim: Malé napětí na gate může řídit velký proud ze zdroje do obvodu.

Spínací režim: MOSFET může fungovat jako spínač, který je buď plně zapnutý (vedoucí) nebo plně vypnutý (nevedoucí), což je využíváno v digitálních obvodech.

Jako MOSFETy jsou zvoleny WSP4882 od Winsok Semicon, protože jsou dva N-MOS tranzistory v jednom pouzdře, zaručující stejné zesílení, což je nezbytné pro rozdílové zapojení. Tranzistory mají Gate Threshold $U_{th} = 1,8$ V, Forward Transconductance $g_m = 6$ S při $U_{DS} = 5$ V a $I_D = 8$ A.



Obrázek 3.7: Rozdílové zapojení tranzistorů

Signál po zesílení předzesilovačem napětím na gatu tranzistoru M1 nastaví proud do R_5 . Protože stejnosměrné napětí na tranzistoru M1 a M2 jsou stejná, oba tranzistory se otevřou. Následně střídavá složka signálu na gatu M1 bude měnit úbytek napětí na R_5 , které následně přivře nebo více otevře tranzistor M2. Úbytek napájecího napětí na R_4 a tranzistoru M2 nám dává výsledný výstupní signál. Výsledný signál vyfiltruje blokový kondenzátor $C_2 = 10 \mu\text{F}$ o stejnosměrnou složku.

Na obrázku 3.8 lze spatřit zesílený signál z předzesilovače a jeho následný ořez pomocí rozdílového zapojení tranzistorů.

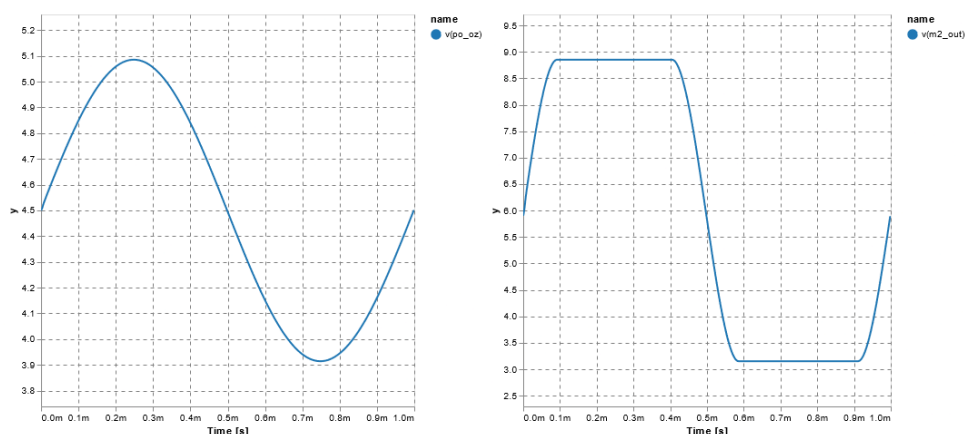
■ Konečný zesilovací stupeň

Před přivedením signálu na výstup 6,3mm jacku je důležité zajistit, aby byl signál dostatečně silný a aby nedocházelo k nežádoucímu zkreslení po zatížení. Tento problém lze řešit přidáním dalšího operačního zesilovače, který zajišťuje skoro nekonečně malý vnitřní odpor.

Výstupní signál, stejně jako vstupní, se má pohybovat v napětovém rozmezí $\pm 0,1$ až $\pm 1,2$ V. Zkreslený signál z tranzistorů je však rozmezí až ± 3 V. Z tohoto důvodu je signál nejdříve nutno ztlumit. Proto pro operační zesilovač je zde použito invertující zapojení, které na rozdíl od neinvertujícího, který má vždy zesílení alespoň jedna, může signál i zeslabit. To vyplývá pro něj ze vztahu

$$A = -\frac{R_7}{R_6}, \quad (3.3)$$

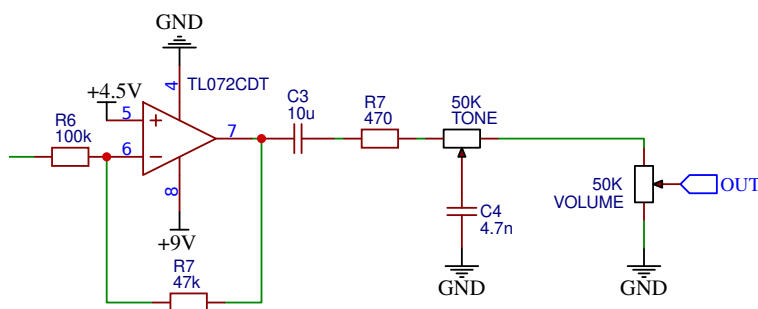
kde po dosazení hodnot $R_7 = 47\text{k}\Omega$ a $R_6 = 100\text{k}\Omega$ (viz obr. 3.9) vychází zesílení $A = 0,47$, které nám signál zeslabí ale zároveň z něj udělá tvrdý zdroj.



(a) : signál vstupující do tranzistorového zapojení

(b) : výstupní signál na drainu tranzistoru M2

Obrázek 3.8: Průběhy signálu rozdílového zapojení tranzistorů



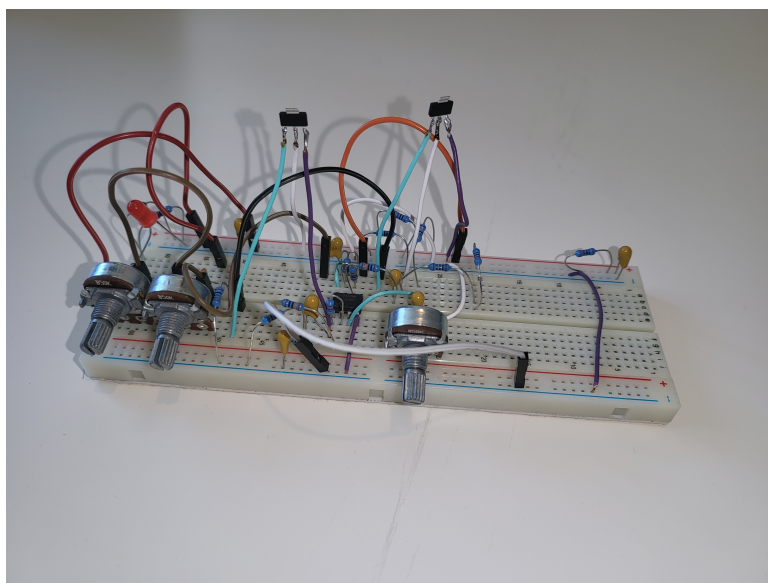
Obrázek 3.9: Konečný zesilovací stupeň s nastavitelným tónem a celkovou hlasitostí

Zároveň je zde přidána regulace tónů [12] za použití pasivní dolní propusti s kondenzátorem C_4 a potenciometrem TONE. Dolní propust byla zvolena taková, aby při maximálním otočení potenciometru R_p byla mezní frekvence $f_0 = 670\text{Hz}$ a to podle vzorce

$$f_0 = \frac{1}{2\pi(R_p + R_7)C_4}, \quad (3.4)$$

a po dosazení $R_p = 50\text{ k}\Omega$, $R_7 = 470\ \Omega$ a $C_4 = 4,7\text{ nF}$ podle obr. 3.9. Naopak při minimálním vytočení potenciometru, tedy $R_p = 0\ \Omega$ je $f_0 = 72\text{ kHz}$, propouští téměř veškeré frekvence a nic netlumí.

Na závěr lze signál regulovat pomocí potenciometru VOLUME o hodnotě $50\text{ k}\Omega$, což umožňuje snadné nastavení úrovně hlasitosti dle potřeby.



Obrázek 3.10: Sestavené analogové zapojení overdrive/distortion efektu na nepájivém poli

■ Sestavení na nepájivém poli s tranzistory

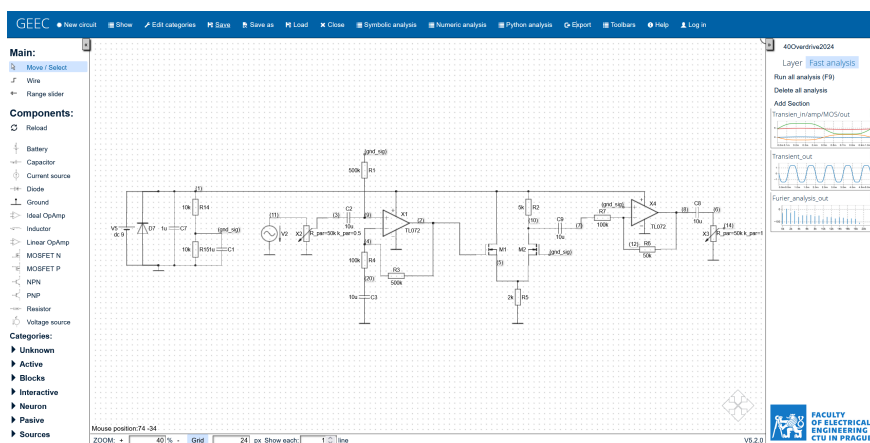
Dané zapojení bylo odzkoušeno na nepájivém poli (viz obr. 3.10). Použité tranzistory nejsou v pouzdře THD, a proto k nim byly připájeny drátky, aby bylo možné je zapojit. Rovněž je použité TL072 v THD provedení oproti schématu, kdy TL072CDT je v SMD pouzdře.

Sluchová zkouška byla provedena s pedálem Marshall „The Guv'nor“. Při srovnání s vytvořeným efektem bylo pozorováno, že efekt poskytuje žádoucí teplejší a měkčí zvukové zkruslení. Na pozadí zůstává organický zvuk kytary, zachovávající více nuancí originálního tónu vedoucí k jemnějšímu a přirozenějšímu zvukovému charakteru.

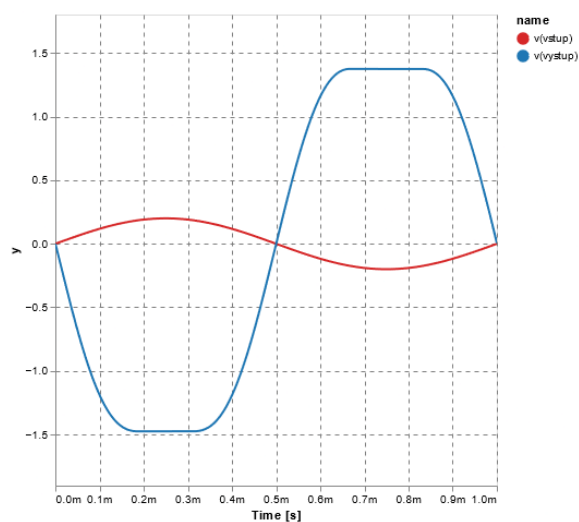
Při poslechovém srovnání s online nahrávkou Marshallu 1959 chybí u vyšších tónů pisklavější ráz, avšak v ostatních hlediscích jsou si dosti podobné. Zároveň zůstala u vytvořeného pedálu dynamika stejná jako u elektronek, umožňující přechod od jemného zkruslení po plnou saturaci při vyšším vstupním signálu.

■ 3.2.2 Simulace s tranzistory

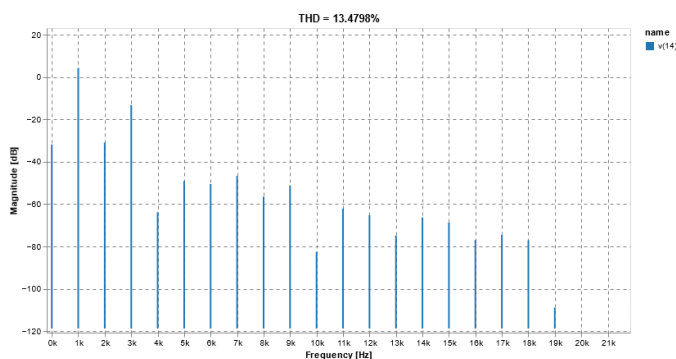
Je provedena simulace zapojení v simulačním programu Geec (viz obr. 3.11). Program Geec je online grafický editor elektronických obvodů, který je zdarma dostupný na stránkách <https://geec.fel.cvut.cz/>. Použitá verze programu: 5.2.0, pocházející z ČVUT, konkrétně z katedry Teorie obvodů. Je provedena FFT analýza pro vstupní signál o amplitudě 0,2 V, frekvenci 1 kHz a potenciometru DISTORTION na pozici 0.3. Výsledek ukázal, že jsou zastoupeny především vyšší liché harmonické (viz obr. 3.13) a celkové harmonické zkruslení (THD) činí 13,48 %. Grafy výstupního a vstupního signálu jsou pak na obr. 3.12.



Obrázek 3.11: Simulace analogového zapojení overdrive/distortion efektu v programu Gec



Obrázek 3.12: Amplituda vstupního a výstupního signálu z overdrive/distortion části



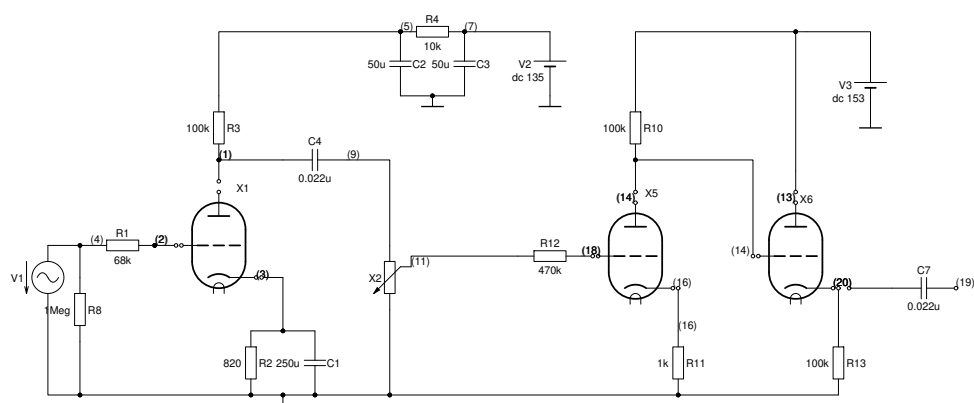
Obrázek 3.13: FFT výstupního signálu z overdrive/distortion části

3.2.3 Zapojení s elektronikami

Pro porovnání efektu byl zvolen kytarový zesilovač, používající elektronky ECC83. Marshall 1959 považovaný mnohými za rockovou klasiku a prvního předchůdce overdrive efektů, používaný například kapely The Who nebo Free. V jeho případě je odsimulována vstupní část předzesilovače, kde vzniká samotný overdrive.

3.2.4 Simulace s elektronikami

Aby byla možná simulace overdrive Marshallu 1959, bylo nutné se zaměřit na část, kde dochází ke zkreslení, konkrétně na elektronkově předzesilovací sekci. Proto je pro simulaci použitý obvod uvedený v příloze Marshall_1959.pdf viz sekce přílohy 6 [14]. Uvedené zapojení má čtyři hlavní vstupy input I High/Low a input II High/Low. Klasické zapojení vstupního signálu, jestliže je overdrive efekt chtěný, je na input I High. Rozdíly jsou, že pro každý vstup High/Low je jiné vstupní zesílení. Pro stereo se používá ještě propojení input I Low s input II High, ale pro zjednodušení v naší simulaci budeme uvažovat pouze mono zapojení.



Obrázek 3.14: Simulovaná elektronková část Marshallu 1959

Jak už bylo řečeno, simulovaná část je pouze od input I High do výkonového zesilovače. Amplituda vstupního signálu je nastavena na 1,5 V a frekvence je stejná jako u simulace s tranzistory, neboli $f = 1$ kHz. Signál je přiveden na mřížku první elektronky X1. Odtud je přes anodu brán a filtrován kondenzátorem C4. Přeš volume I (potenciometr X2), kde se dá nastavit síla předzesilovače, pokračuje do zesilující části tvořené elektronikami X5 a X6. Napájení jednotlivých elektronek je převzato z tabulky daného zapojení 3.15. Kde napěťové úrovně pro elektronky ECC83 X1 je V1 a pro X5 a X6 jsou V2. Tudíž na anodu X1 je přivedené stejnosměrné napětí $V1 = 135$ V, a to přes filtr skládající se z $R4$ a kondenzátorů $C2$ a $C3$. Anody elektronek X5 a X6 jsou již připojené přímo a to na stejnosměrné napětí $V3 = 153$ V.

TUBE		MARSHALL 100W. VOLT. CHART								
					PIN	NO.				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ECC83 12AX7A	V1	135	—	1.0	H	H	195	—	1.5	H
ECC83 12AX7A	V2	153	—	1.1	H	H	260	153	153	H
ECC83 12AX7A	V3	210	—	18.5	H	H	195	—	18.5	H
6550	V4	—	H	453	450	-51°	NP	H	—	—
6550	V5	—	H	453	450	-51°	NP	H	—	—
6550	V6	—	H	453	450	-51°	NP	H	—	—
6550	V7	—	H	453	450	-51°	NP	H	—	—

*(Bias approx. -51vdc; primary current 1.2 -1.3 amps at 120vac)

Obrázek 3.15: Tabulka napětových hodnot pro napájení elektronek ECC83[15]

3.2.5 Porovnání

Na následujícím grafu 3.16 je zobrazen simulovaný sinusový vstupní signál s amplitudou 1,5 V a frekvencí 1 kHz. Tento signál je po průchodu předzesilovačem Marshall 1959 zesílen a zkreslen. Lze si povšimnout, že na rozdíl od tranzistorového rozdílového zapojení, elektrony dříve zkreslí jen jednu polovinu signálu. To se následně projeví na FFT analýze, kde převládají především vyšší sudé harmonické, jak lze spatřit na obr. 3.17. Získané celkové harmonické zkreslení (THD) v tomto případě činí 26,60%, což ve srovnání s rozdílovým zapojením s tranzistorem dodává zvuku drsnější charakter, jak je potvrzeno při sluchovém porovnání obou overdrive efektů.

3.3 Delay/Echo

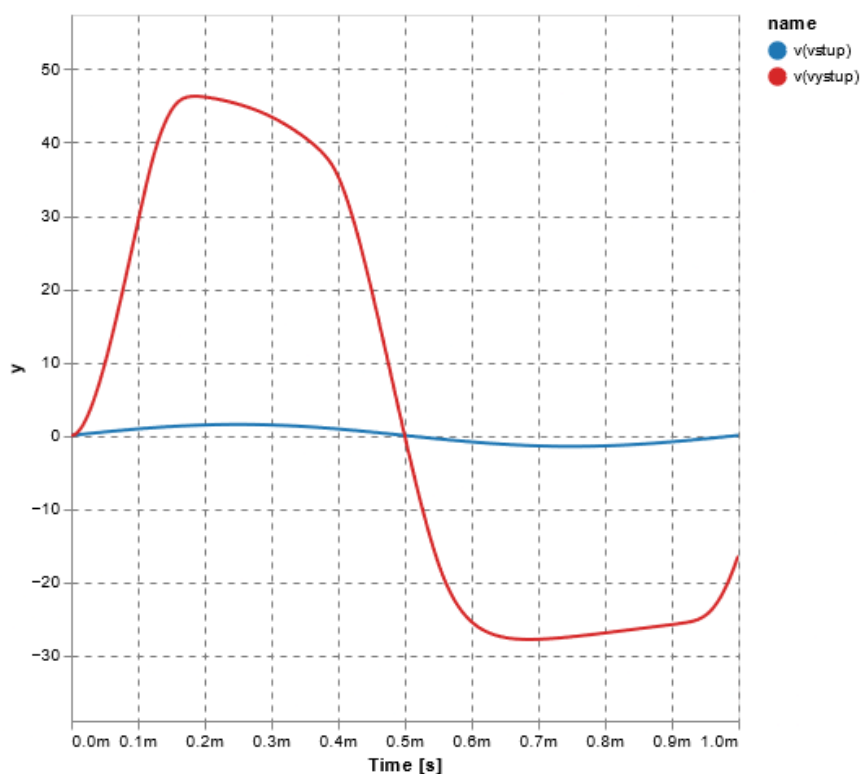
Pro zpracování digitálního efektu delay/echo bylo nutné vybrat vhodný digitální procesor. Cílem bylo najít vhodný kompromis mezi cenou a kvalitou zpracování záznamu.

3.3.1 Výběr procesoru

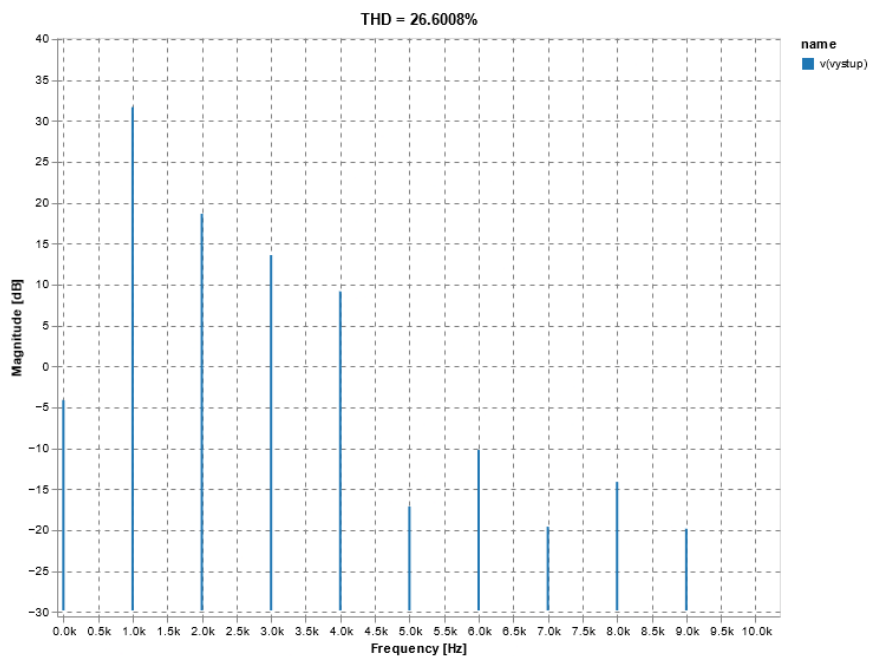
Velmi rozsáhlý a známý pro svoji cenu i dostatečnou kvalitu je digitální před-programovatelný audio procesor PT2399 3.18. Běžně se využívá ve CD/DVD přehrávačích/rekordérech, Car Entertainment Systémech, Karaoke Mixerech, Multimediálních televizích, elektronických hračkách a v neposlední řadě elektronických hudebních nástrojích nebo efektech [16].

Díky své jednoduchosti i ceně zaujal na poli mnoho hudebních nadšenců a jiných „bastlířů“ v tomto oboru.

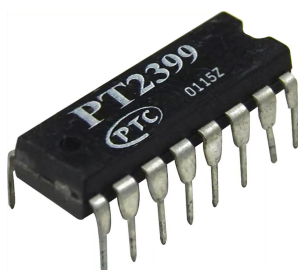
3. Návrh kytarového efektového pedálu



Obrázek 3.16: Amplituda vstupního a výstupního signálu z předzesilující části Marshall 1959



Obrázek 3.17: FFT výstupního signálu předzesilující části Marshallu 1959

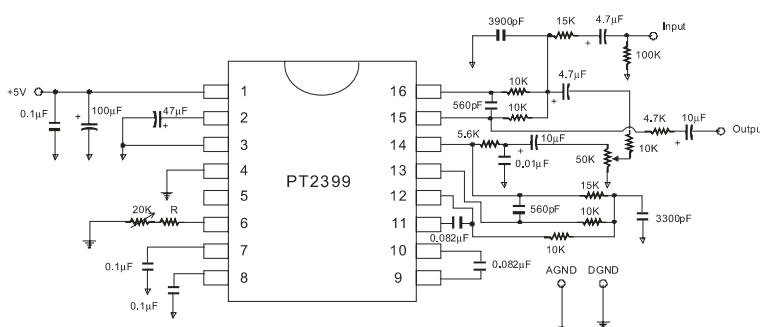


Obrázek 3.18: PT2399[18]

PT2399, digitální předprogramovatelný audio procesor od společnosti Princeton technology corp., je dostupný v provedení THD nebo SMD pouzdrě. Hlavní výhodou je i zabudovaná vnitřní RAM paměti o velikosti 44 kbit [17]. Zpoždění samotného signálu se nastavuje rychlostí vnitřního oscilátoru, jež lze měnit pomocí nastavení napětí, které se mění odporem k zemi na výstupu VCO na pinu 6, prováděno 50 k Ω potenciometrem.

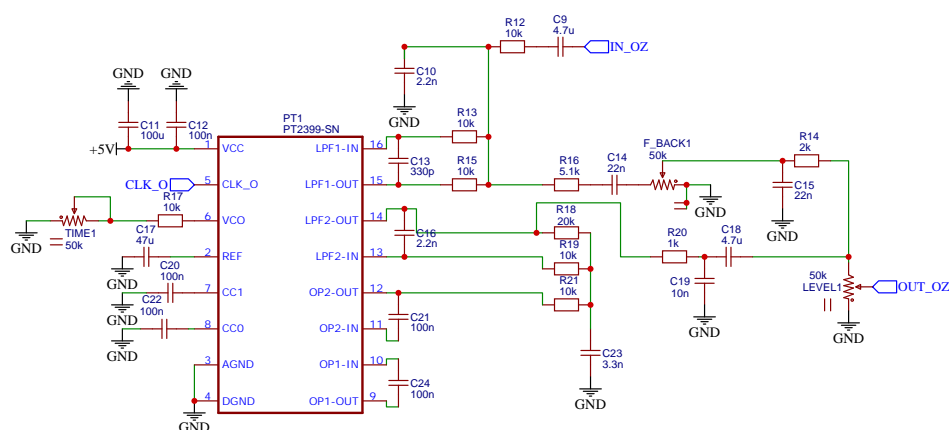
3.3.2 Zapojení

Celé zapojení (viz sekce přílohy 6, Cele_schema_digital.pdf) je rozebráno na jednotlivé části. Jako první na řadě je samotné srdce, procesor PT2399.



Obrázek 3.19: Ukázkové zapojení PT2399 Echo[17]

Při zapojení procesoru PT2399 je vycházeno z ukázkového zapojení z dokumentace 3.19. Obvod nevyhovoval hned v několika částech. Bylo nutno pozměnit pasivní filtry vyskytující se před vnitřním zesilovačem. Tyto filtry odstraňují šum a vyšší harmonické ze vstupního signálu, aby procesor zbytečně nezpracovával ruch a zkreslení. Při zapojení je však před efektem Echo/Delay overdrive a zkreslení signálu je naopak chtěné. V další části jsou popsány vstupní a koncové zesilovače provedené operačními zesilovači. Prozatím stačí, že vstupní dvojnásobně zesílený signál přijde ze vstupu IN_OZ viz 3.20. Signál prochází přes blokovací kondenzátor C_9 a poté na první filtr, jenž je tvořen kondenzátory a aktivním zabudovaným operačním zesilovačem mezi vstup/výstup LPF1-IN a LPF1-OUT (Low Pass Filtr 1.) na pinech 16 a 15. Vzhledem ke stejným odporům R_{12} , R_{13} a R_{15} , lze rovnici pro mezní



Obrázek 3.20: Část zapojení s procesorem PT2399

frekvenci filtru zjednodušit a napsat

$$f_o = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{R15 \cdot R3 \cdot C13 \cdot C10}} = 59068 \text{ Hz} \quad (3.5)$$

a po dosazení hodnot ze zapojení 3.20 mezní frekvence vychází $f_0 = 59068 \text{ Hz}$. Tento filtr je navržen na blokaci natolik vysokých frekvencí, že nebude hrozit, že by porušil již zkreslený signál od overdrive efektu.

Je zde zároveň přidána zpětnovazební smyčka pro efekt Echo. Smyčka vede od výstupu LPF2-OUT na pinu 14 zpět na vstup LPF1-IN na pinu 16, jako originální signál.

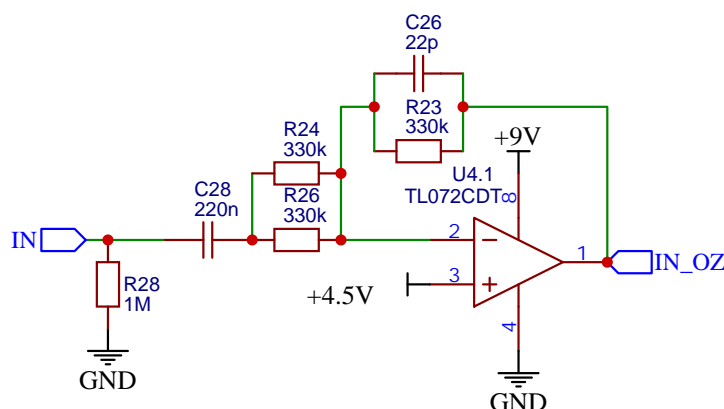
Přijatý signál procesorem se zpozdí. Zpoždění signálu závisí na vnitřní frekvenci, která je nastavována 50kΩ potenciometrem TIME. Zpožděný signál pokračuje přes filtr tvořený R_{20} a C_{19} s mezní frekvencí

$$f_o = \frac{1}{2\pi \cdot R_{20} \cdot C_{19}} = 15915 \text{ Hz.} \quad (3.6)$$

LEVEL 50kΩ potenciometr nastavuje úroveň hlasitosti ozvěn. Aby bylo docíleno celé ozvěny, musí se zpožděný signál přivést znovu do vstupu. To je zde provedeno přes 50kΩ potenciometr F_BACK (feedback). Mezi potenciometrem LEVEL a F_BACK je dolní propust s rezistorem R_{14} a kondenzátorem C_{15} a s mezní frekvencí

$$f_o = \frac{1}{2\pi \cdot R_{14} \cdot C_{15}} = 3617 \text{ Hz.} \quad (3.7)$$

Při prvním průchodu signálu je důležité zachovat co nejvěrnější zkreslení overdrivu. Při následujících ozvěnách však již není nutné zpracovávat celý rozsah signálu, proto již zmíněný filtr propouští pouze signály pod frekvencí 3617 kHz. F_BACK nastavuje s jakou intenzitou budou opakující se ozvěny klesat. To znamená, že pokud je úplně stažen na zem, proběhne pouze originální signál, a pak jeho zpožděná verze.



Obrázek 3.21: Předzesilovač jako invertující zapojení OZ s filtrem

■ Předzesilovač s OZ

Než se signál začne zpožďovat procesorem, je nutné ho zesílit. To je uskutečněno předzesilující částí. Paralelní rezistor $1\text{ M}\Omega$ R_{28} k zemi slouží proti „praskavému“ zvuku po připojení efektu ke kytáře. Vstupní kondenzátor C_{28} 220 nF blokuje stejnosměrný proud a s paralelním zapojením rezistorů R_{24} a R_{26} , zajišťuje jednoduchou filtraci horní propustí. Jsou filtrovány frekvence pod

$$f_0 = \frac{1}{2\pi(R_{24}||R_{26})C_{28}} = 4,38\text{ Hz.} \quad (3.8)$$

Kromě zesílení je navíc nutné signál také odfiltrovat od rušení. Zde provedeno invertujícím zapojením zesilovače (viz obr. 3.21). Zesílení je nastaveno na dvojnásobné, což vychází z hodnot odporů 3.21 a z rovnice 3.9. Zároveň je zde přidán ve zpětné vazbě kondenzátor, který tvoří filtr s mezní frekvencí

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_{23}C_{26}} = 21922\text{ Hz,} \quad (3.9)$$

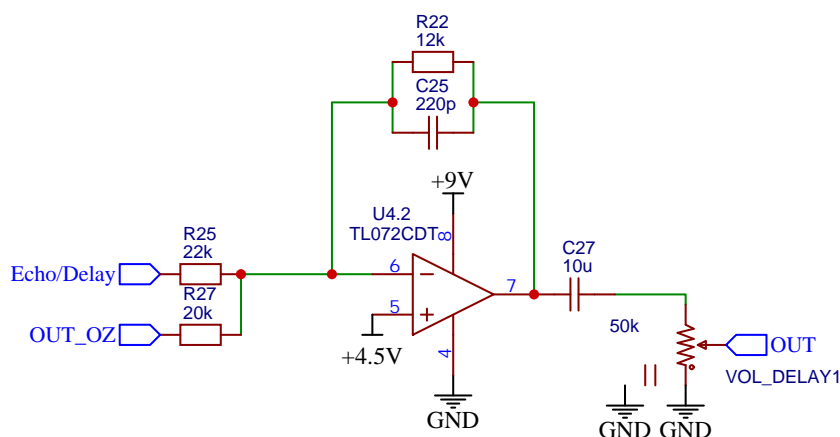
který odřízne vysoké pásmo, ale stále propustí zkreslený signál overdrivem.

■ Konečný zesilovací stupeň

Výstupní zesilovač (viz obr. 3.22), stejně jako v sekci 3.2.1, slouží k zesílení výkonu výstupního signálu a jeho amplitudového tlumení na typickou audio úroveň. Je rovněž implementován přes operační zesilovače TL072.

Rovněž funguje jako mixér pro vstupní signál a signál již zpožděný. Signály slučuje v poměru $1 : 1,1$ nastaveným odpory R_{25} a R_{27} . Čistý signál přichází z Echo/Delay na rezistor R_{25} , lze však přes spínač na efektu přerušit. Společně s nastavením F_BACK potenciometru na zem, lze docílit pravého Delay. To znamená, že hudebník zahraje tón, a až po určitém čase se ozve.

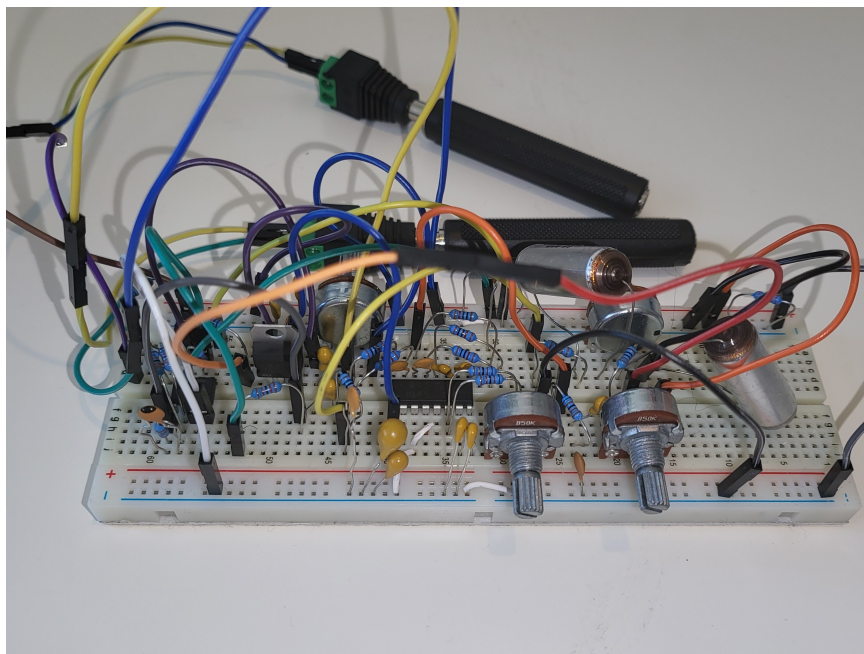
Posledním $50\text{ k}\Omega$ potenciometrem v zapojení je pak VOL_DELAY, kterým lze nastavit výstupní hlasitost celé digitální části Echo/Delay efektu.



Obrázek 3.22: Konečný zesilovací stupeň s mixem čistého a zpožděného signálu

■ Sestavení Echo/Delay efektu na nepájivém poli

Pro vyzkoušení teoretického návrhu bylo sestaveno zapojení s audio procesorem PT2399 a se zesilovači v THD provedení na nepojivém poli (viz obr. 3.23) a provedena zvuková zkouška s elektronickou kytarou. Obvod byl napájen 9V baterií. Jako zdroj pro 5V napětí byl zvolen stabilizátor napětí L78S05CV od STMicroelectronic v THD pouzdře.



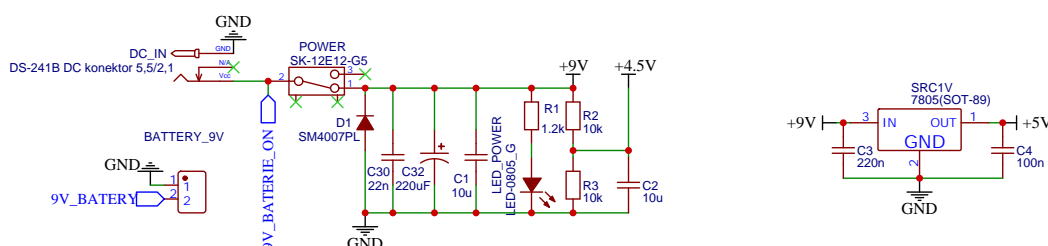
Obrázek 3.23: Sestavení digitálního zapojení Echo/Delay efektu na nepájivém poli

3.4 Napájení, indikace a konektory

3.4.1 Napájení

Pedál může být napájen jak z 9V adaptéru konektorem 5,5/2,1mm, tak 9V baterií. Lze je přepínat pomocí přepínače SW1 na 9V_BATERIE_ON. Napájení je opatřeno ochrannou diodou D1 proti přepólování a filtračními kondenzátory C_{30} , C_{32} a C_1 . Po Připojení zdroje se rovněž rozsvítí led dioda LED_POWER, která indikuje zapnutí pedálu 3.24. Pro analogovou část je 4,5 V získáno přes dělič napětí. Pro napájení procesoru PT2399, jenž vyžaduje napětí 5V, je použit regulátor SRC1V, konkrétně model CJ78L05 od společnosti Jiangsu Changjing Electronics Technology Co.

V neposlední řadě jsou vyvedena důležitá napětí na PROBE (viz sekce přílohy 6, Cele_schema_napajeni.pdf) pro možnost měření a výstupy na pedálové spínače označené DIS a DELAY. Po sepnutí spínačů se daný efekt aktivuje a rozsvítí svojí indikační led diodu DIS_LED/DEL_LED, aby uživatel poznal, že je zapnutý.



Obrázek 3.24: Napájení z adaptéru nebo z baterie

Pedálové spínače

Kytarové pedály, jak zmíněno v sekci 2.2, leží na zemi a přepínají se sešlápnutím spínače, tudíž může interpret přepínat zvukové efekty svého nástroje za běhu vystoupení. To znamená, že přepínač musí být odolný a musí se přepínat sešlápnutím.

V návrhu je potřebný takový spínač, který najednou sepne:

- indikační led diodu s napájením
- vstup od hudebního nástroje s efektem
- výstup efektu s výstupem
- rozepnutí vstupu s výstupem

proto je využito SW1045 latched Footswitch 3.25 od Thomann, které mají dva kolébkové přepínače. Na jednu stranu kolébkového přepínače je připojen výstup z efektu a na druhý indikační led dioda (viz sekce přílohy 6, Cele_schema_napajeni.pdf).



Obrázek 3.25: Thomann SW1045 latched Footswitch[19]

3.5 PCB

Pro výrobu PCB desky je rozhodnuto pro společnost JLCPCB, která vyrábí PCB a zároveň je umožňuje ihned osadit. V budoucnu to znamená lehké navýšení výrobní kapacity a sériovou velkovýrobu. V případě osazení mají JLCPCB na skladě takzvané „basic part“. Jedná se o často používané součástky předpřipravené již v osazovacích strojích. Za jakékoliv jiné součástky je účtovaná přírážka.

Proto je v návrhu provedeno pár změn, aby bylo využito co nejvíce „basic part“ a snížila se celková cena výrobku, což se povedlo bez větších komplikací.

Návrh PCB desky je proveden v programu EasyEda, jenž je také zdarma poskytnut společností JLCPCB. Vzhledem k tomu, že se jedná o stejnou společnost, která vlastní jak návrhářský program, tak i samotnou výrobu s osazovnou, mají předpřipravené DRC³ a také snažší manipulaci výrobních dat mezi návrhem, výrobou a osazovnou.

3.5.1 Návrh PCB

PCB deska o rozměrech 105 x 85 mm se skládá ze dvou vrstev mědi a součástek na vrchní straně. První vrstva je signálová a slouží pro rozvod signálu a potřebných napětí. Druhá vrstva, až na pár signálových cest kvůli křížení,

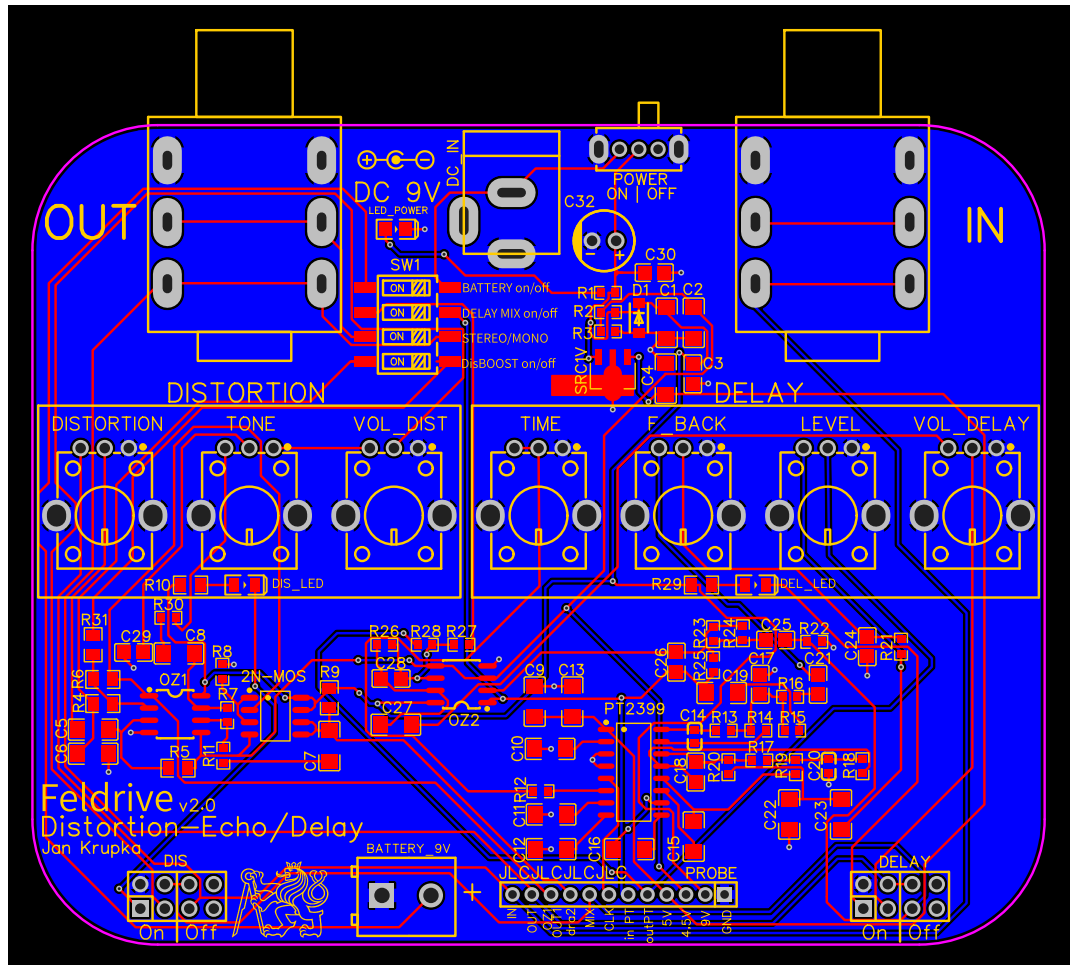
³DRC (Design Rule Check) specifikována pravidla pro návrh PCB desky.

je tvořena rozlitou zemí sloužící ke snížení elektromagnetického vyzařování a zvyšuje odolnost proti elektromagnetickému rušení.

Deska má vizuálně rozdělené ovládací prvky, jako jsou potenciometry, zvláště pro jednotlivé efekty DISTORTION a DELAY viz 3.26. Ve vrchní části se vyskytují 6,3 mm vstupní/výstupní konektory společně s napájecím 5,2/2,1 mm konektorem pro 9V adaptér. Rovněž je zde umístěn zapínací přepínač on/off, společně s přepínačem SW1, který umožňuje:

- Zapnutí a vypnutí 9V baterie.
- Spojení čistého signálu již se zpožděným a tím přepínat mezi Delay/Echo efekty.
- Nastavení výstupu podle aktuálního připojeného konektoru stereo nebo mono.
- Nastavení extra zesílení v analogové části Overdrive, které sníží odpor ve zpětné vazbě předzesilovač a tím umožní použití i pro velmi malé vstupní signály.

Ve spodní části se nachází samotné digitální a analogové části obvodu. Společně jsou zde výstupy pro měření důležitých napětí a výstupy pro kytarové spínače.

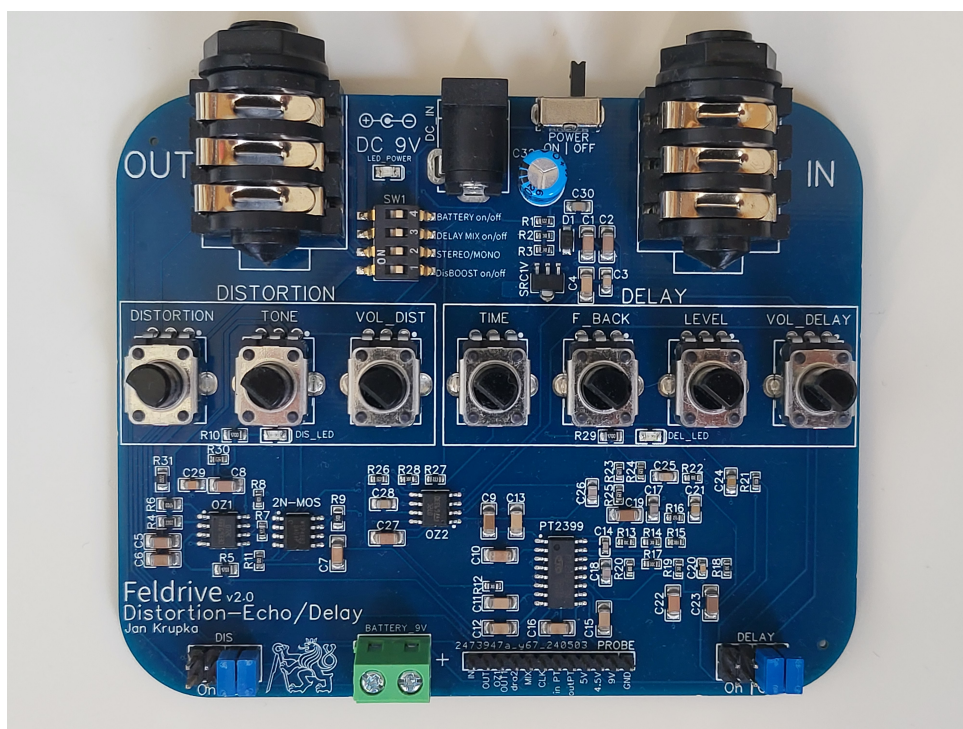


Obrázek 3.26: Všechny vrstvy PCB desky

Kapitola 4

Zhodnocení dosažených výsledků práce

PCB deska byla objednána u společnosti JLCPCB. Po jejím doručení bylo nutné ruční zapájení součástek, které nebylo možné osadit strojově (2 x 6,3mm jack, power jack a 2 x Thomann SW1045M Footswitch). Po zapájení všech součástek byla deska úspěšně vyzkoušena. Testování prokázalo, že všechny části pedálu fungují dle očekávání, což potvrdilo správnost návrhu i kvalitu výroby PCB. Pedál vykazoval požadované zvukové vlastnosti a stabilitu při provozu. Osazený výrobek na obr. 4.1.



Obrázek 4.1: Hotová a osazená PCB deska kytarového pedálu

Kapitola 5

Závěr

Úkoly bakalářské práce byly splněny a byl úspěšně navržen a realizován kytarový pedál s digitálním efektem Echo/Delay a s analogovým efektem distortion/overdrive. Celkově lze výsledky této práce hodnotit jako velmi přínosné z několika hledisek.

Pro návrh analogové části overdrive efektu bylo zvoleno rozdílové zapojení tranzistorů. Tato volba se ukázala jako velmi vhodná, neboť poskytuje jemné a dynamické zkreslení, které je srovnatelné s charakteristikami elektronkových zesilovačů. Simulace i praktické testy prokázaly, že tento přístup umožňuje dosažení příjemného, přirozeného zvuku.

Pro srovnání s komerčně dostupnými produkty byl použit Marshall „The Guv'nor“ a Marshall 1959. Pedál vyvinutý v rámci této práce vykazoval při poslechových zkouškách srovnatelnou kvalitu zvuku, přičemž zachoval organický tón kytary a přirozenou dynamiku. Simulace elektronkového předzesilovače Marshallu 1959 prokázaly, že dosažené zkreslení u mého pedálu se velmi blíží tomuto referenčnímu zařízení. Ukázalo však, že zapojení s tranzistory generuje vyšší liché harmonické oproti elektronkovému zapojení, které tvoří vyšší sudé harmonické.

Digitální část pedálu využívá procesor PT2399, který se osvědčil jako efektivní a cenově dostupné řešení pro zpoždění zvuku. Implementace digitálního zpoždění byla úspěšně realizována a testována, přičemž bylo dosaženo kvalitního zvukového výstupu bez nežádoucího šumu a zkreslení. Kombinace digitálního a analogového zpracování signálu na jedné PCB desce se ukázala jako funkční a stabilní.

Výroba PCB desky byla realizována prostřednictvím společnosti JLCPCB, což umožnilo vytvoření kvalitního a dobře funkčního prototypu. Design PCB byl optimalizován pro sériovou výrobu, zajišťující možnost budoucího rozšíření produkce. Využití „basic parts“ z katalogu JLCPCB vedlo ke snížení nákladů na výrobu.

Výsledky této práce prokazují, že navržený kytarový pedál splňuje všechny stanovené cíle a parametry. Úspěšně kombinuje analogové a digitální zpracování signálu, umožňující vytváření různých zvukových efektů s vysokou kvalitou. Pedál je vhodný pro široké spektrum hudebních stylů a nabízí uživatelům flexibilitu a kreativní možnosti při tvorbě hudby.

■ 5.1 Budoucí vylepšení

Pro kytarový efekt by bylo vhodné navrhnout a sestavit vnější krabičku/obal s vhodnými výřezy pro jednotlivé prvky.

Další vylepšení se hlavně týká přidání různých funkcionalit. Například by mohlo spočívat v přidání více efektů nebo přidání zvukové karty pro zdigitalizování zvuku a bezdrátovému přenosu dat např. do sluchátek nebo do počítače.



Kapitola 6

Přílohy

Schemata

- Cele_schema_napajeni.pdf
- Cele_schema_digital.pdf
- Cele_schema_analog.pdf
- Marshall_1959.pdf

Simulace

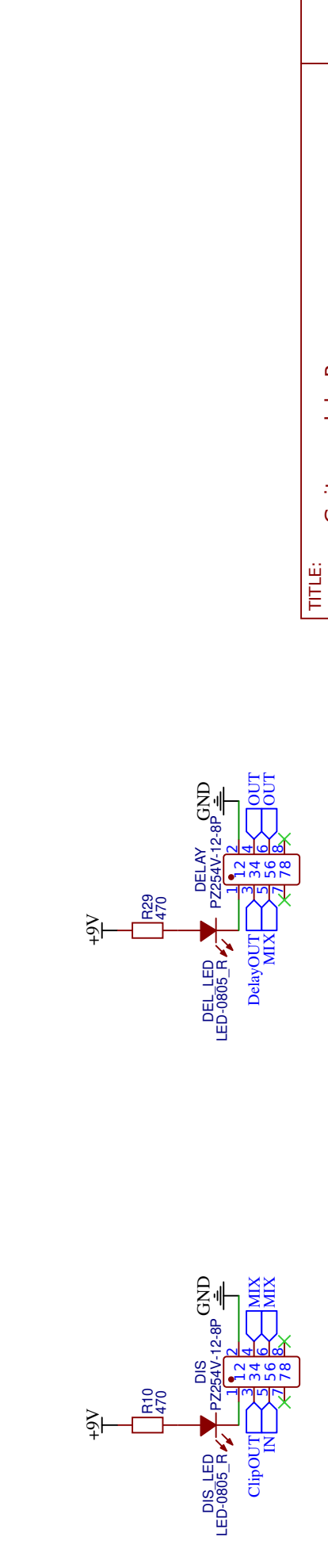
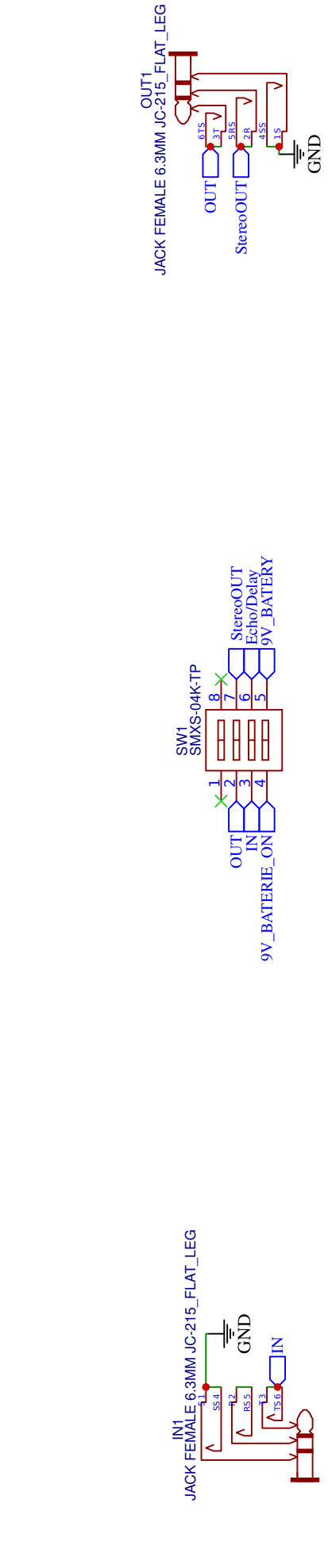
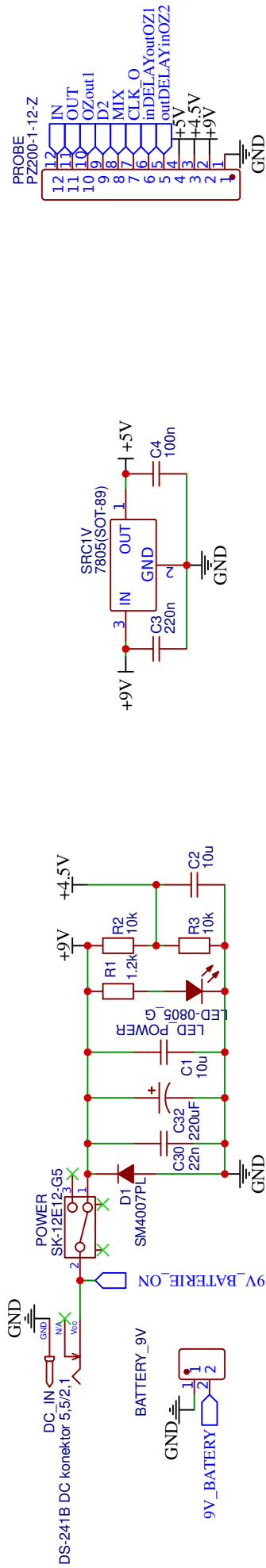
- Simulace_rozdil_tranzi_zapoj_overdriveru.json
- Simulace_elektron_zesil_Marshal.json

PCB_desky

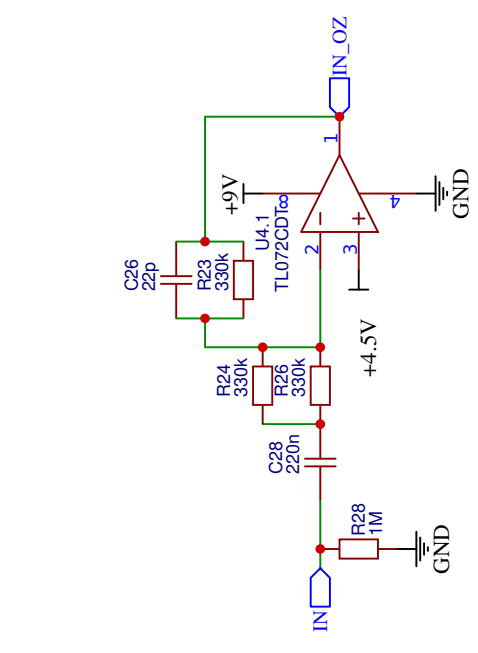
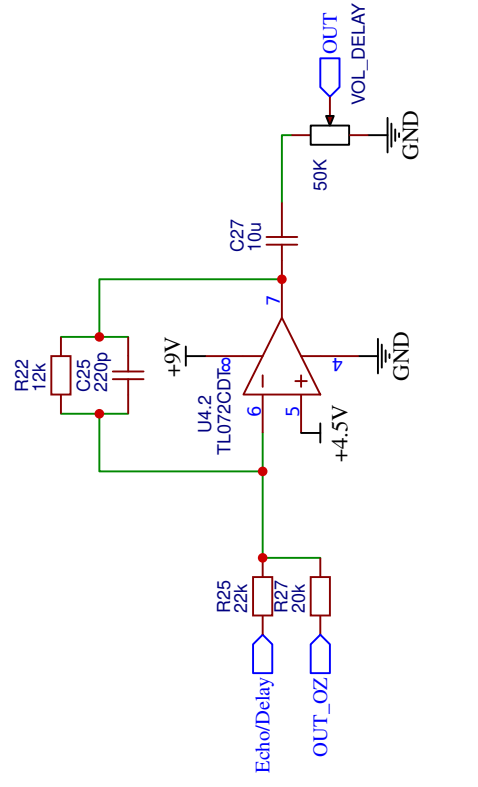
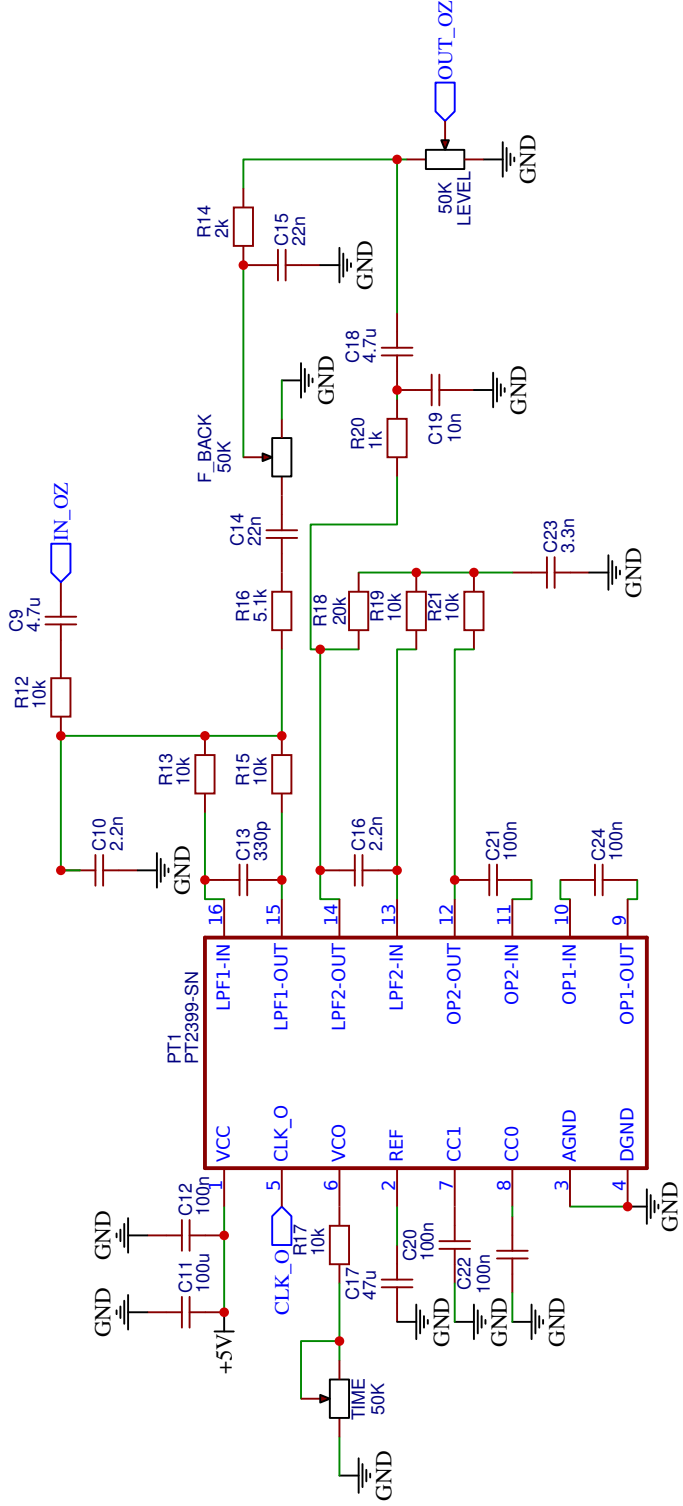
- PCB_bord_layout_jednotive_vrstvy.pdf
- Schema_pro_PCB.pdf

Data_pro_vyrobu

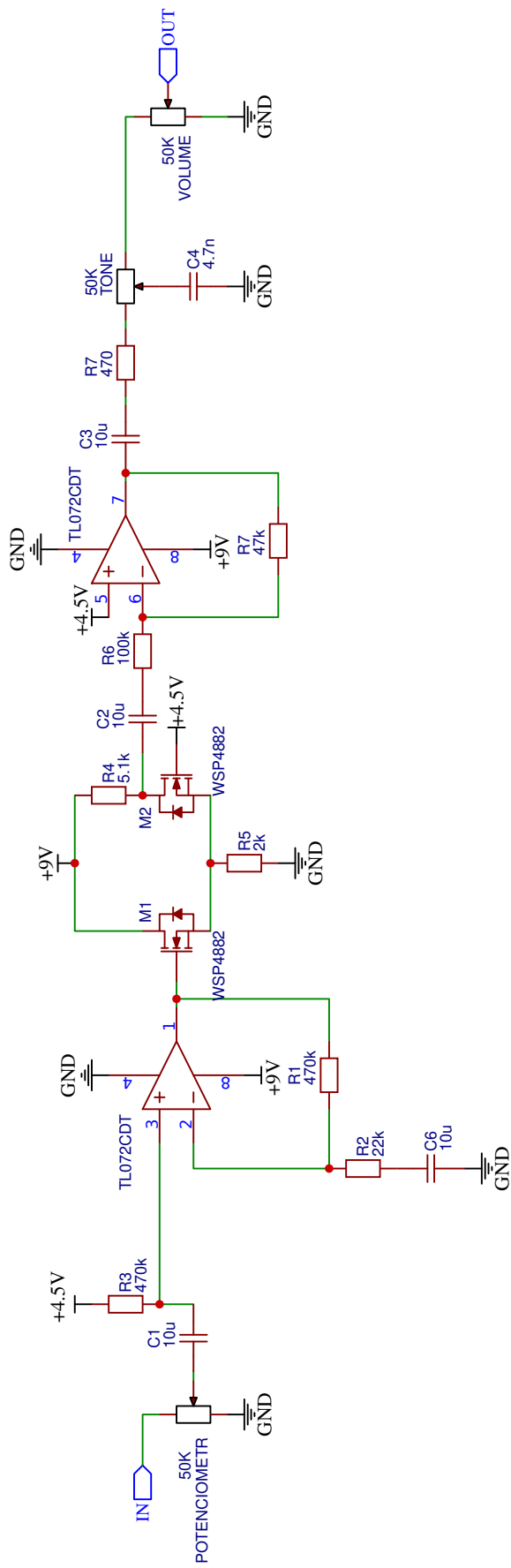
- Seznam_součástek.csv
- Gerber_Pedal_PCB_Pedal_.zip
- PickAndPlace_PCB_Pedal.csv



TITLE:	Guitar pedal - Power	REV:	1.0
Company:	CVUT FEL	Sheet:	1/3
Date:	2024-04-26	Drawn By:	Jan Krupka



TITLE:	Guitar pedal - Digital	REV:	1.0
Company:	CVUT FEL	Sheet:	3/3
Date:	2024-04-26	Drawn By:	Jan Krupka



TITLE:

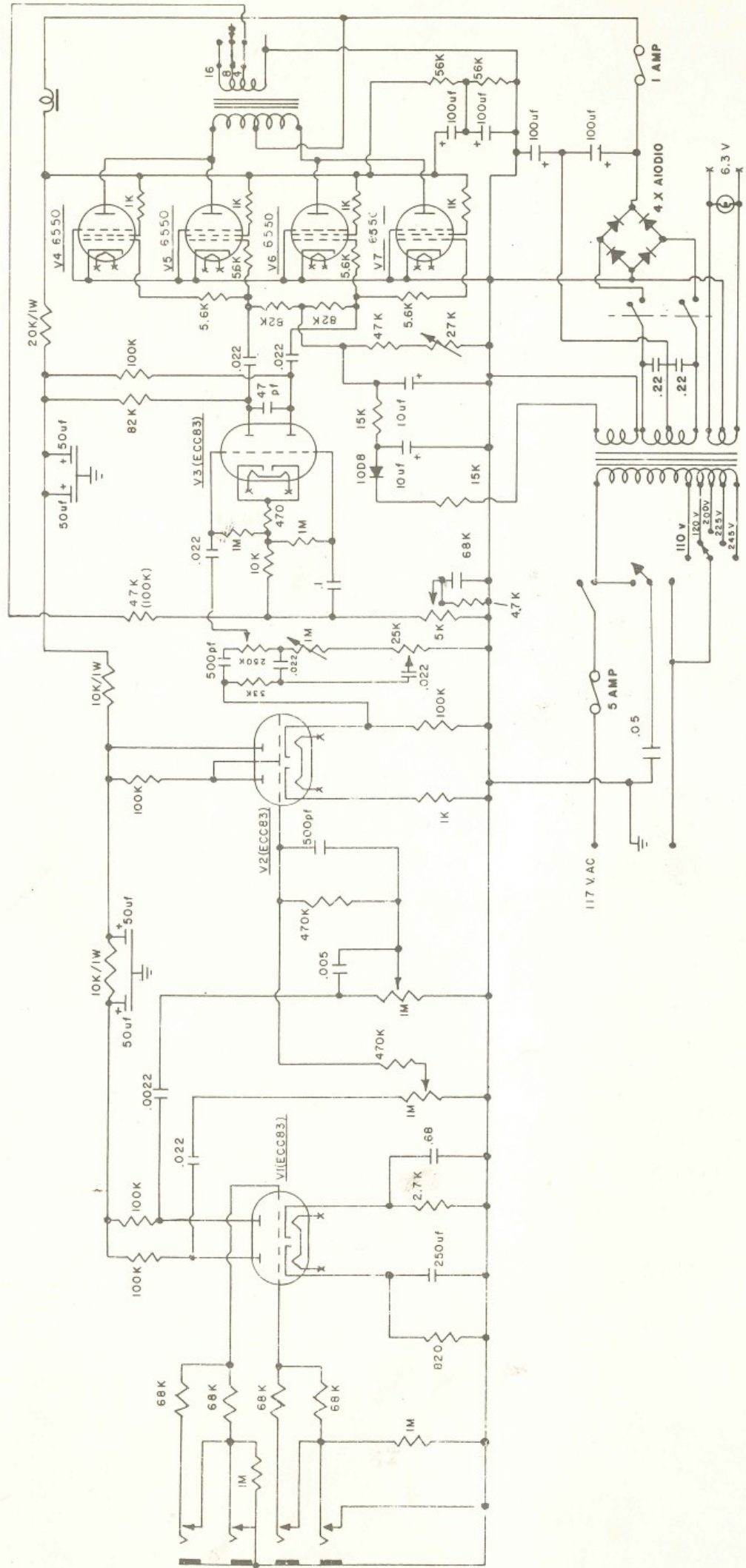
Guitar pedal - Analog

REV: 1.0

Company: CVUT FEL

Sheet: 2/3

Date: 2024-04-26 Drawn By: Jan Krupka



UNICORD INCORPORATED
 A GULF + WESTERN COMPANY
 75 FROST STREET, WESTBURY, N. Y. 11590

B

MARSHALL 1959 MARK II

70-6-11

SCALE: — JULY 70



Literatura

- [1] BERGREN, Adam Johan, Lucas ZEER-WANKLYN, Mitchell SEMPLE, Nikola PEKAS, Bryan SZETO a Richard L MCCREERY. Musical molecules: the molecular junction as an active component in audio distortion circuits. *Journal of Physics: Condensed Matter* [online]. 2016, 2016-03-09, **28**(9) [cit. 2023-12-10]. ISSN 0953-8984. Dostupné z: doi:10.1088/0953-8984/28/9/094011
- [2] RAY. Marshall The Guvnor Analysis. Marshall The Guvnor Analysis [online]. [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.electrosmash.com/marshall-guvnor-analysis>
- [3] UNIVERSITY OF OKLAHOMA. *Operational Amplifiers* [online]. [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://www.cs.ou.edu/fagg/umass/classes/503f03/orig/SLIDES/OpAmps/opamps.html>
- [4] Neinvertující zapojení operačního zesilovače. ELUC [online]. [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/690>
- [5] Elektrotechnika: Teorie. ŠOTOLOVÁ, Vojtěch. *Sotovo* [online]. [cit. 2023-12-14]. Dostupné z: <https://www.sotovo.cz/str/ele.php?id=59>
- [6] HOOD, John Linsley. *Valve and Transistor Audio Amplifiers*. Oxford: Elsevier, 1997. ISBN 0080520413.
- [7] JOHN. Transistor Clipping Circuits. *Electronic Circuits and Diagrams-Electronic Projects and Design* [online]. 2020 [cit. 2023-12-14]. Dostupné z: <https://www.circuitstoday.com/transistor-clipping-circuits>
- [8] doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka. Ústní diskuse
- [9] A.S., Muziker. JJ Electronic ECC83S/12AX7. Muziker [online]. [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://www.muziker.cz/jj-electronic-ecc83s-12ax7-preamp-valve?srsId=AfmBOop6PnzmOwuVKAuP0zTRCr9D42Z28-Wrw0PXXvyp1Oqlb66YY2OmbTg>
- [10] Overdrive - 12AX7 Tube Pedal. Hagerman Amplification [online]. [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://www.hagamps.com/products/overdrive>

- [11] KIMNA20 NOVEMBER 2021 10249. TL072 OP-AMP: Where.[online]. [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: /components/tl072-op-amp-where-how-to-use-tl072?id=872
- [12] ORMAN, Jack. Stupidly Wonderful Tone Control 2. Nena-ležený vydavatel [online]. 2007 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <http://www.muzique.com/lab/swtc.htm>
- [13] OSTRAVA, Jakubka. Studio Jakubka Ostrava. Průvodce [online]. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <http://www.studiojakubka.cz/zajimavosti/vintagemarshall1/vinmarshall.html>
- [14] Marshall Schematics. Tube amp Schematics [online]. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: https://el34world.com/charts/Schematics/Files/Marshall/Marshall_1Schematics.htm
- [15] Marshall Schematics. Tube amp Schematics Marshall 1959mkii [online]. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: https://el34world.com/charts/Schematics/files/Marshall/Marshall_1959mkii_volt_chrt.pdf
- [16] JOTRIN | WWW.JOTRIN.COM. PT2399 Digital Delay IC Datasheet, Features, Alternative. Jotrin Electronics [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.jotrin.com/technology/details/pt2399-digital-delay-ic>
- [17] Datasheets-PT2399. Synth and Stompbox DIY [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://electricdruid.net/datasheets/PT2399.pdf>
- [18] Electrosmash. PT2399 Analysis [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.electrosmash.com/pt2399-analysis>
- [19] Thomann SW1045 latched Footswitch. Thomann Česko [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://www.thomann.de/cz/thomann_sw1045_latched_footswitch.htm