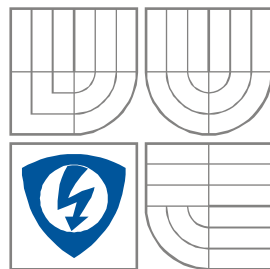




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

EFEKTOVÝ ZESILOVAČ PRO ELEKTRICKOU KYTARU

EFFECT AMPLIFIER FOR ELECTRIC GUITAR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Martin Kočiš

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

BRNO, 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Martin Kočiš

ID: 155177

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Efektivní zesilovač pro elektrickou kytaru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce navrhnete tranzistorový zesilovač pro elektrickou kytaru, který bude obsahovat filtry horní propusti, booster, overdrive a zpožďovací linku s možností posuvu audio signálu o jednu oktávu výše. Podle uvážení použijte k návrhu alternativní obvody prvky a moderní součástkovou základnu. Zesilovač doplňte návrhem vhodného napájecího zdroje. Návrh podpořte simulací tam, kde je to možné a pomocí dostupných simulačních modelů.

V praktické části práce vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek, atd.). Navržený efektivní zesilovač realizujte formou funkčního prototypu a experimentálním měřením v laboratoři nízkofrekvenční elektroniky ověřte jeho činnost. Výsledky měření zpracujte formou standardního protokolu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] WIRSUM, S. Abeceda nf techniky. Praha: BEN - technická literatura, 2003.
- [2] ANDERTON, C. Electronic Projects for Musicians. Music Sales America, 1992.
- [3] METZLER, B. Audio Measurement Handbook. Beaverton, Audio Presision, Inc., 1993.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 26.5.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce v první části stručně popisuje vnímání harmonických frekvenčních složek lidským uchem, v druhé části se zaměřuje na účel kytarových efektů a přehled obvyklých typů, se kterými se lze na trhu setkat. V třetí části následuje bližší seznámení s principem funkce efektů vybraných k realizaci, popis návrhu, simulace v časové a frekvenční oblasti a příp. představení nerealizovaného řešení. Celé zařízení obsahuje vstupní horní propust s napěťovým sledovačem, budič, zkreslující a nezkrslující zesilovač, efekt pro posuv audio signálu o oktávu výše, zpožďovací linku, výstupní napěťový sledovač s dolní propustí a napájecí zdroj pro tyto obvody. Výběr jednotlivých efektů a jejich ovládacích prvků byl podřízen využití zejména v alternativní rockové hudbě. Návrh se opírá o simulace v prostředí OrCAD PSpice. Ve čtvrté části je popsán proces realizace, měření a konečně v páté části jsou shrnuta fakta a získané poznatky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zvuk, kytarový efekt, harmonické složky, zkreslení, oktáva, zpožďovací linka

ABSTRACT

In the first chapter, the thesis concisely describes perception of harmonic frequency components by human ear. The second chapter introduces the reader into purpose of guitar effects and summary of usual types, which is possible to meet on the market. The third chapter contains functional description of chosen effects including designed schematics and simulations of functionality in time and frequency domain, eventually unrealized solution. The device contains input highpass filter with emitter follower, booster, overdrive and clean amplifier, circuit for octave-up frequency shift, delay line, output emitter follower with lowpass filter and power supply for all these circuits. Selection of the effects and its controls was subordinated especially to use in alternative rock music. The design is based on simulations executed using OrCAD PSpice. The realization process and the measurement is described in the fourth chapter and the last chapter contains conclusion of the project.

KEYWORDS

Sound, guitar effect, harmonic components, distortion, octave, delay line

KOČIŠ, M. *Efektivní zesilovač pro elektrickou kytaru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 87 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph. D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Efektivní zesilovač pro elektrickou kytaru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych vyjádřil upřímné díky vedoucímu této práce, panu doc. Ing. Tomášovi Kratochvílovi, Ph.D., za vstřícnost při výběru jejího tématu a za konstruktivní připomínky k jejímu vypracování. Děkuji také panu Vanžurovi a Voráčovi za pomoc při výrobě přístrojové krabičky a v neposlední řadě své rodině za podporu při studiu.

OBSAH

Obsah	vi
Seznam obrázků	x
Seznam tabulek	xii
Úvod	1
1 VNÍMÁNÍ HARMONICKÝCH FREKVENČNÍCH SLOŽEK	2
2 DĚLENÍ kytarových efektů	3
2.1 Konstrukční provedení kytarových efektů.....	3
2.1.1 Kompaktní pedály.....	3
2.1.2 Multiefekty.....	3
2.1.3 Rackové efekty	4
2.2 Součástková základna kytarových efektů	5
2.2.1 Analogové efekty	5
2.2.2 Digitální efekty	5
2.3 Zkreslovací efekty.....	6
2.3.1 Overdrive	6
2.3.2 Distortion	6
2.3.3 Fuzz.....	7
2.4 Modulační efekty pracující se změnou frekvenčního pásma.....	7
2.4.1 Booster	7
2.4.2 Ekvalizér	7
2.4.3 Phaser.....	8
2.4.4 Wah-wah.....	8
2.5 Modulační efekty pracující se změnou hlasitosti zvuku.....	8
2.5.1 Kompresor a expandér	8
2.5.2 Tremolo.....	8
2.6 Modulační efekty pracující se změnou časového průběhu signálu.....	9
2.6.1 Delay, looper a echo	9
2.6.2 Reverb.....	10

2.6.3	Flanger	10
2.7	Modulační efekty pracující se změnou výšky tónu	11
2.7.1	Chorus	11
2.7.2	Vibrato	11
2.7.3	Octaver	11
2.7.4	Harmonizer	12
3	VÝBĚR EFEKTŮ A JEJICH NÁVRH	13
3.1	Vstupní obvod	15
3.1.1	Teoretický úvod	15
3.1.2	Popis zapojení	15
3.2	Budič	17
3.2.1	Teoretický úvod	17
3.2.2	Popis zapojení	18
3.3	Zkreslující a nezkreslující zesilovač	21
3.3.1	Teoretický úvod	21
3.3.2	Popis zapojení	21
3.3.3	Nerealizované řešení zkreslujícího zesilovače	26
3.4	Posuv frekvence o oktávu výše	28
3.4.1	Teoretický úvod	28
3.4.2	Popis zapojení	29
3.5	Zpožďovací linka	32
3.5.1	Teoretický úvod	32
3.5.2	Popis zapojení	34
3.6	Výstupní obvod	37
3.7	Napájecí zdroj	38
4	REALIZACE A MĚŘENÍ	39
4.1	Vstupní a výstupní obvod	39
4.2	Budič	41
4.3	Zkreslující a nezkreslující zesilovač	42
4.4	Posuv frekvence o oktávu výše	46
4.5	Zpožďovací linka	48
4.6	Konečné provedení efektového zesilovače	50
5	Závěr	51

Literatura	53
Seznam symbolů, veličin a zkratk	55
A SCHÉMATA ZAPOJENÍ	57
A.1 Vstupní obvod.....	57
A.2 Budič.....	58
A.3 Zkreslující a nezkreslující zesilovač	59
A.4 Posuv frekvence o oktávu výše.....	60
A.5 Zpoždovací linka	61
A.6 Výstupní obvod.....	62
A.7 Napájecí zdroj	63
B MOTIVY DPS	64
B.1 Vstupní obvod.....	64
B.2 Budič.....	64
B.3 Zkreslující a nezkreslující zesilovač	65
B.4 Posuv frekvence o oktávu výše.....	66
B.5 Zpoždovací linka	67
B.6 Výstupní obvod.....	67
B.7 Napájecí zdroj	68
C OSAZOVACÍ VÝKRESY	69
C.1 Vstupní obvod.....	69
C.2 Budič.....	69
C.3 Zkreslující a nezkreslující zesilovač	70
C.4 Posuv frekvence o oktávu výše.....	70
C.5 Zpoždovací linka	71
C.6 Výstupní obvod.....	71
C.7 Napájecí zdroj	72
D SEZNAM SOUČÁSTEK	73
D.1 Vstupní obvod.....	73
D.2 Budič.....	74
D.3 Zkreslující a nezkreslující zesilovač	75
D.4 Posuv frekvence o oktávu výše.....	77
D.5 Zpoždovací linka	78

D.6	Výstupní obvod.....	80
D.7	Napájecí zdroj	81
E	FOTOGRAFIE HOTOVÉHO EFEKTOVÉHO ZESILOVAČE	82
F	SHRNUTÍ PARAMETRŮ EFEKTOVÉHO ZESILOVAČE	83

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK 2-1: TYPICKÉ KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ KOMPAKTNÍHO PEDÁLU.	3
OBRÁZEK 2-2: MULTIEFEKT S ELEKTRONKOU 12AX7 A KOLÉBKOVÝM PEDÁLEM.	4
OBRÁZEK 2-3: BOSS GT-PRO.	4
OBRÁZEK 2-4: ZAPOJENÍ SHAKA BRADDAH.	5
OBRÁZEK 2-5: ZÁKLADNÍ ZAPOJENÍ EFEKTU OVERDRIVE.	6
OBRÁZEK 2-6: ZÁKLADNÍ ZAPOJENÍ EFEKTU DISTORTION.	6
OBRÁZEK 2-7: TYPICKÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ EFEKTU FUZZ.	7
OBRÁZEK 3-1: BLOKOVÉ SCHÉMA EFEKTOVÉHO ZESILOVAČE.	14
OBRÁZEK 3-2: SCHÉMA VSTUPNÍHO OBVODU.	16
OBRÁZEK 3-3: MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA VSTUPNÍHO OBVODU.	17
OBRÁZEK 3-4: PRŮBĚH VSTUPNÍHO A VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ.	17
OBRÁZEK 3-5: SCHÉMA ZAPOJENÍ BUDIČE.	18
OBRÁZEK 3-6: MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA BUDIČE S PŘIPOJENÝM C_p	18
OBRÁZEK 3-7: MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA BUDIČE S ODPOJENÝM C_p	19
OBRÁZEK 3-8: ČASOVÝ PRŮBĚH VSTUPNÍHO A VÝSTUPNÍHO SIGNÁLU.	19
OBRÁZEK 3-9: AMPLITUDOVÉ SPEKTRUM VSTUPNÍHO A VÝSTUPNÍHO SIGNÁLU.	20
OBRÁZEK 3-10: SCHÉMA ZAPOJENÍ ZKRESLUJÍCÍHO A NEZKRESLUJÍCÍHO ZESILOVAČE.	22
OBRÁZEK 3-11: ROZMÍTÁNÍ POTENCIOMETRU WRAP PŘI PARAMETRU $R_{DRIVE} = 500\text{ k}\Omega$ V POROVNÁNÍ SE VSTUPNÍ SINUSOIDOU.	22
OBRÁZEK 3-12: AMPLITUDOVÉ SPEKTRUM VSTUPNÍHO A VÝSTUPNÍHO SIGNÁLU PŘI PLNĚ ASYMETRICKÉM ZKRESLENÍ. ZÁKLADNÍ FREKVENCE $F = 500\text{ HZ}$	23
OBRÁZEK 3-13: ROZMÍTÁNÍ POTENCIOMETRU DRIVE V POROVNÁNÍ SE VSTUPNÍ SINUSOIDOU.	23
OBRÁZEK 3-14: ROZMÍTÁNÍ POTENCIOMETRU FREQ PŘI PARAMETRU $R_{TONE} = 1\Omega$, TEDY F_M $= 19,4\text{ KHZ}$	24
OBRÁZEK 3-15: MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA TÓNOVÉ CLONY JAKO SAMOSTATNÉHO OBVODU.	24
OBRÁZEK 3-16: ROZMÍTÁNÍ POTENCIOMETRU TONE PŘI PARAMETRU $FREQ = 1\Omega$	25
OBRÁZEK 3-17: ROZMÍTÁNÍ POTENCIOMETRU TONE PŘI PARAMETRU $FREQ = 500\text{ k}\Omega$	25
OBRÁZEK 3-18: MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA NEZKRESLUJÍCÍHO ZESILOVAČE.	26
OBRÁZEK 3-19: NEDOKONČENÉ ZAPOJENÍ PŮVODNĚ ZAMÝŠLENÉHO ZKRESLUJÍCÍHO ZESILOVAČE.	27
OBRÁZEK 3-20: VÝSTUPNÍ SIGNÁL $F = 100\text{ HZ}$ OVLIVŇOVANÝ ROZMÍTÁNÍM R_{DRIVE_HIGH}	28
OBRÁZEK 3-21: MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA VSTUPNÍCH FILTRŮ.	28
OBRÁZEK 3-22: SCHÉMA ZAPOJENÍ EFEKTU OCTAVER.	29
OBRÁZEK 3-23: VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ SIGNÁL OCTAVERU.	30
OBRÁZEK 3-24: SROVNÁNÍ VÝSTUPNÍHO SIGNÁLU OCTAVERU (ZVÝRAZNĚNÁ BLEDEMODRÁ) OPROTI SIGNÁLU Z GENERÁTORU O SHODNÉ FREKVENCI.	30
OBRÁZEK 3-25: MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA EFEKTU OCTAVER.	31
OBRÁZEK 3-26: PRŮBĚH VSTUPNÍHO A VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ PŘI VYPOJENÍ REZISTORU R_9	31
OBRÁZEK 3-27: AMPLITUDOVÉ SPEKTRUM VSTUPNÍHO A VÝSTUPNÍHO SIGNÁLU.	32
OBRÁZEK 3-28: ANALOGOVÁ ZPOŽĎOVACÍ LINKA.	33
OBRÁZEK 3-29: VNITŘNÍ ZAPOJENÍ AUDIOPROCESORU PT2399, PŘEVZATO Z KATALOGOVÉHO LISTU [25].	33
OBRÁZEK 3-30: SCHÉMA ZPOŽĎOVACÍ LINKY S PT2399.	34
OBRÁZEK 3-31: ZÁVISLOST KLÍČOVÝCH PARAMETRŮ PT2399 NA HODNOTĚ R_{DELAY}	36
OBRÁZEK 3-32: ZÁVISLOST HARMONICKÉHO ZKRESLENÍ NA R_{DELAY}	36

OBRÁZEK 3-33: SCHÉMA ZAPOJENÍ VÝSTUPNÍHO OBVODU.....	37
OBRÁZEK 3-34: MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA VÝSTUPNÍHO OBVODU.	37
OBRÁZEK 3-35: AMPLITUDOVÉ SPEKTRUM VÝSTUPNÍHO OBVODU PRO $F = 2,5 \text{ KHZ}$	38
OBRÁZEK 3-36: SCHÉMA ZAPOJENÍ NAPÁJECÍHO ZDROJE.....	38
OBRÁZEK 4-1: VSTUPNÍ (ČERVENÁ) A VÝSTUPNÍ (MODRÁ) SIGNÁL VSTUPNÍHO OBVODU.	39
OBRÁZEK 4-2: VSTUPNÍ (ČERVENÁ) A VÝSTUPNÍ (MODRÁ) SIGNÁL VÝSTUPNÍHO OBVODU.....	40
OBRÁZEK 4-3: ZMĚŘENÁ MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA VSTUPNÍHO OBVODU.....	40
OBRÁZEK 4-4: ZMĚŘENÁ MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA VÝSTUPNÍHO OBVODU.....	40
OBRÁZEK 4-5: VSTUPNÍ (ČERVENÁ) A VÝSTUPNÍ (MODRÁ) SIGNÁL BUDIČE S ROZEPNUTÝM SPÍNAČEM PRESENCE.....	41
OBRÁZEK 4-6: VSTUPNÍ (ČERVENÁ) A VÝSTUPNÍ (MODRÁ) SIGNÁL BUDIČE SE SEPNUÝM SPÍNAČEM PRESENCE.	41
OBRÁZEK 4-7: ZMĚŘENÁ MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA BUDIČE.....	42
OBRÁZEK 4-8: VSTUPNÍ (ČERVENÁ) A VÝSTUPNÍ (MODRÁ) SIGNÁL ZKRESLUJÍCÍHO ZESILOVAČE PŘI NASTAVENÍ DRIVE, WRAP A FREQ NA MINIMUM, A-GE, B-SI A C-LED.	42
OBRÁZEK 4-9: VSTUPNÍ (ČERVENÁ) A VÝSTUPNÍ (MODRÁ) SIGNÁL ZKRESLUJÍCÍHO ZESILOVAČE PŘI NASTAVENÍ DRIVE NA MAXIMUM, WRAP A FREQ NA MINIMUM, A-GE, B-SI A C-LED.	43
OBRÁZEK 4-10: VSTUPNÍ (ČERVENÁ) A VÝSTUPNÍ (MODRÁ) SIGNÁL ZKRESLUJÍCÍHO ZESILOVAČE PŘI NASTAVENÍ DRIVE A WRAP NA MAXIMUM, FREQ NA MINIMUM, A-GE, B-SI.....	43
OBRÁZEK 4-11: VSTUPNÍ (ČERVENÁ) A VÝSTUPNÍ (MODRÁ) SIGNÁL ZKRESLUJÍCÍHO ZESILOVAČE PŘI NASTAVENÍ DRIVE , WRAP A FREQ NA MAXIMUM, ZLEVA A-GE, B-SI A C-LED.....	44
OBRÁZEK 4-12: VSTUPNÍ (ČERVENÁ) A VÝSTUPNÍ (MODRÁ) SIGNÁL NEZKRESLUJÍCÍHO ZESILOVAČE.	44
OBRÁZEK 4-13: MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA ZKRESLUJÍCÍHO ZESILOVAČE PŘI POUŽITÍ DIOD S RŮZNÝM PRAHOVÝM NAPĚTÍM A PRO 3 POLOHY POTENCIOMETRU DRIVE.	45
OBRÁZEK 4-14: ZMĚŘENÁ MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA ZKRESLUJÍCÍHO ZESILOVAČE PŘI ROZMÍTÁNÍ POTENCIOMETRU TONE.	45
OBRÁZEK 4-15: ZMĚŘENÁ MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA ZKRESLUJÍCÍHO ZESILOVAČE PŘI ROZMÍTÁNÍ POTENCIOMETRU FREQ.....	46
OBRÁZEK 4-16: ZMĚŘENÁ MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA NEZKRESLUJÍCÍHO ZESILOVAČE.	46
OBRÁZEK 4-17: VSTUPNÍ (ČERVENÁ) A VÝSTUPNÍ (MODRÁ) SIGNÁL OBVODU OCTAVER PŘI NASTAVENÍ POTENCIOMETRU BLEND NA MINIMUM.	47
OBRÁZEK 4-18: VSTUPNÍ (ČERVENÁ) A VÝSTUPNÍ (MODRÁ) SIGNÁL OBVODU OCTAVER PŘI NASTAVENÍ POTENCIOMETRU BLEND NA STŘED.....	47
OBRÁZEK 4-19: VSTUPNÍ (ČERVENÁ) A VÝSTUPNÍ (MODRÁ) SIGNÁL OBVODU OCTAVER PŘI NASTAVENÍ POTENCIOMETRU BLEND NA MAXIMUM.....	47
OBRÁZEK 4-20: ZMĚŘENÁ MODULOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA OBVODU OCTAVER.....	48
OBRÁZEK 4-21: VSTUPNÍ (ČERVENÁ) A VÝSTUPNÍ (MODRÁ) SIGNÁL ZPOŽĎOVACÍ LINKY.	49
OBRÁZEK 4-22: AMPLITUDOVÉ ROZVLNĚNÍ VÝSTUPNÍ SINUSOIDY (MODRÁ) ZPOŽĎOVACÍ LINKY PŘI ZMĚNĚ ZPOŽDĚNÍ (1. ČÁST).....	49
OBRÁZEK 4-23: AMPLITUDOVÉ ROZVLNĚNÍ VÝSTUPNÍ SINUSOIDY (MODRÁ) ZPOŽĎOVACÍ LINKY PŘI ZMĚNĚ ZPOŽDĚNÍ (2. ČÁST).....	49

SEZNAM TABULEK

TABULKA 1 PŘEHLED PARAMETRŮ PT2399 V ZÁVISLOSTI NA ODPORU R_{DELAY}	35
--	----

ÚVOD

Elektrické kytary, v první fázi snímané mikrofony, vznikly z nutnosti zesílit produkovaný zvuk pro prosazení ve větších hudebních tělesech. S rozvojem hudby i techniky však vyvstala potřeba ozvláštnit zvuk nad rámec charakteru hudebního nástroje a dovedností uživatele, případně kompenzovat akustické neduhy okolního prostředí. Vůbec první zařízení, které lze považovat za kytarový efekt, bylo čistě mechanické a z logiky věci upevněné přímo na kytarě tak, aby jím procházely struny. Jednalo se o první pohyblivou kobylku opatřenou pákou, díky které bylo možné změnou napětí strun změnit výšku tónu nahoru i dolů v závislosti na síle a rychlosti zakývání. Tato kytara byla vyráběna v třicátých letech 20. století firmou Rickenbacker pod názvem Vibrola spanish guitar.

Dalšími, již elektronickými efekty, byly reverby/hally a echa, tedy efekty, které byly vestavovány přímo do aparátů a jejichž smyslem bylo vytvořit dojem hraní v obrovských prázdných halách a celkově tak pozvednout úroveň zvuku při hudební produkci v akusticky nevhodných prostorech. Vedle digitální realizace se dodnes používá původní princip reverbu, tedy rozkmitání pružiny elektromagnetem a následný převod mechanického kmitání na elektrické. Výsledný zvuk se pomalu a plynule opakuje, jako by jej odrážely a absorbovaly zdi.

V šedesátých letech 20. století přicházejí na trh první zkreslovací efekty, na které je kladen požadavek vytvořit tvrdší charakter hudby, než jakého je možno docílit pouhým zkreslením tehdejších elektronkových aparátů. Tyto zkreslovací efekty na polovodičové bázi jsou založeny na komprimaci signálu, ořezu špiček sinusoidy a obohacení spektra o harmonické složky. Pomocí prvních zkreslovačů s germaniovými tranzistory a diodami bylo možno dosáhnout zejména jemnějšího zkreslení díky nízkému prahovému napětí germaniových polovodičových prvků. Pro větší míru zkreslení byly obvody zdvojovány, dokonce se využívalo teplotní závislosti polovodičů pro originální zvukový projev tím, že se zkreslovače skladovaly před vystoupením v lednicích. S příchodem křemíkových diod a tranzistorů se zkreslení ještě zvyšovalo a výstupní signál takových efektů byl již trojúhelníkový až obdelníkový.

Pozdější vývoj modulačních efektů možnosti práce se zvukem velmi rozšířil. Standardem se staly efekty pro vytvoření dojmu hry více kytar najednou, posuv frekvence signálu o oktávu nahoru i dolů, vytváření zpožděných kopií signálu, periodická změna hlasitosti či výšky tónu, přidávání hudebních intervalů apod. Zejména v dnešní době, kdy je trh zaplaven finančně velmi dostupnými efekty, je decentně a kvalitně upravený zvuk spíše výjimkou. Svůj podíl na tom mají také levné digitální multiefekty, kde kvantita nahrazuje kvalitu a namísto několika solidních zvukových profilů jsou jich uživateli předhozeny desítky, přičemž ne vždy je možné jednotlivé parametry daného zvukového profilu doladit dle potřeby. Také pro degradaci ojedinělého zvukového charakteru nástroje A/D a D/A převodem a rekonstrukčním filtrem mnoho uživatelů volí čistě analogový elektroakustický řetězec.

1 VNÍMÁNÍ HARMONICKÝCH FREKVENČNÍCH SLOŽEK

Hudební nástroj produkuje spolu se základním tónem o jisté frekvenci ještě tzv. harmonické frekvence, které mají oproti základní frekvenci poněkud menší amplitudu. To jsou frekvence, které jsou násobky frekvence základního tónu. Např. komorní $f_A = 440$ Hz má svoje harmonické na frekvencích 880 Hz, 1320 Hz apod. 880 Hz je první, tj. lichou harmonickou, 1320 Hz je druhou, tj. sudou harmonickou, atd.

Přítomnost harmonických ve spektru má zásadní vliv na vnímání zvuku lidských uchem. Zvuky, které mají ve spektru mnoho harmonických (zejména sudých), nám zní příjemněji, vnímáme je jako plné, barevné, muzikální a vzbuzují dojem vyšší hlasitosti. Naopak zvuky chudé na harmonické vnímáme jako tenké, neprokreslené a slabé [1].

2 DĚLENÍ KYTAROVÝCH EFEKTŮ

Kytarové efekty jsou elektronická zařízení, která slouží k úpravě signálu z nástrojových snímačů. V praxi jsou vedle hudebního hlediska děleny ještě z hlediska provedení a součástkové základny [2].

2.1 Konstrukční provedení kytarových efektů

2.1.1 Kompaktní pedály

Tyto efekty obsahují pouze jeden konkrétní efekt. Tvoří vůbec nejpočetnější skupinu kytarových efektů.

Zpravidla bývají umístěny v kovových přístrojových krabičkách, což je výhodné z hlediska stínění a mechanické odolnosti (viz obr. 2-1). Protože ne vždy je daný efekt součástí elektroakustického řetězce po celou dobu písně, jsou uzpůsobeny pro přemostění stisknutím nožního přepínače, tzv. footswitche. Tyto jsou velmi masivní konstrukce.



Obrázek 2-1: Typické konstrukční provedení kompaktního pedálu.

2.1.2 Multiefekty

Jsou to již složitější zařízení, v drtivé většině digitální, které obsahují více efektů. Tomu odpovídá i větší počet ovládacích prvků, displej a obvykle i potenciometr ovládaný pedálem, který lze přiřadit pro ovládání velikosti výstupní úrovně či pro přeladování propouštěného pásma u efektu wah-wah (viz kap. 2.4.4).

U multiefectů je dnes již běžným standardem také nástrojová ladička, metronom či automatický bubeník. Obsahují přednastavené zvukové profily, tzv. preset, které lze spouštět jednotlivými nožními přepínači. Obvykle je možné ve stejném čase použít asi 10 presetů.

Nevýhodou digitálních multiefectů je fakt, že množství presetů je většinou na úkor jejich kvality a že možnosti nastavení jednotlivých presetů jsou poměrně omezené anebo žádné. Zkreslení A/D a D/A převodem a rekonstrukčním filtrem všeobecné oblibě levných digitálních multiefectů také nepřidává, avšak kvalitní multiefekty, např. Vox Tonelab (viz obr. 2-2), jsou využívány poměrně hojně.



Obrázek 2-2: Multieffekt s elektronikou 12AX7 a kolébkovým pedálem.

2.1.3 Rackové efekty

Tyto efekty jsou určeny pro instalaci do rackových skříní o normovaných rozměrech. Jedná se o velmi kvalitní zařízení určené pro profesionální použití. Příklad takového efektu ilustruje obr. 2-3.

Jistou nevýhodou je fakt, že je nelze ovládat během hry bez externího nožního přepínače. Tyto tzv. true-bypass lišty většinou obsahují několik přiřaditelných nožních přepínačů, které dokáží komunikovat pomocí standardu MIDI.

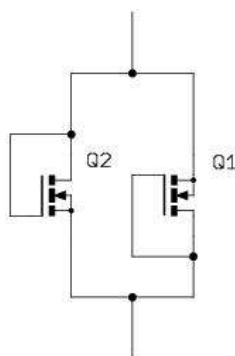


Obrázek 2-3: Boss GT-Pro.

2.2 Součástková základna kytarových efektů

2.2.1 Analogové efekty

Prakticky všechny běžné druhy efektů lze realizovat analogově a jak již bylo zmíněno, mezi uživateli jsou analogové efekty velmi preferované. Zejména zkreslovací efekty se takto realizují téměř výlučně, a to za použití jak polovodičových prvků, tak i elektronek. Jistým trendem je používání germaniových diod a tranzistorů z důvodu nižšího prahového napětí oproti křemíkovým prvkům, což umožňuje dosáhnout pouze jemného zkreslení, prakticky jen zakulacení špiček sinusoidy. Naopak ve zkreslovacích efektech určených pro vyšší zkreslení se používají kromě křemíkových diod také LED anebo FET v diodovém zapojení nazývaném „Shaka Braddah“ (viz obr. 2-4) [3].



Obrázek 2-4: Zapojení Shaka Braddah.

Obecným pravidlem je používání nízkošumových metalizovaných rezistorů, které také dosahují větší přesnosti jmenovité hodnoty oproti rezistorům uhlíkovým. Také je vhodné v signálové cestě nepoužívat elektrolytické kondenzátory, vzhledem k jejich značné toleranci kapacity, teplotní závislosti a ekvivalentnímu sériovému odporu [4]. Pro tento účel lépe vyhoví kondenzátory fóliové či tantalové.

2.2.2 Digitální efekty

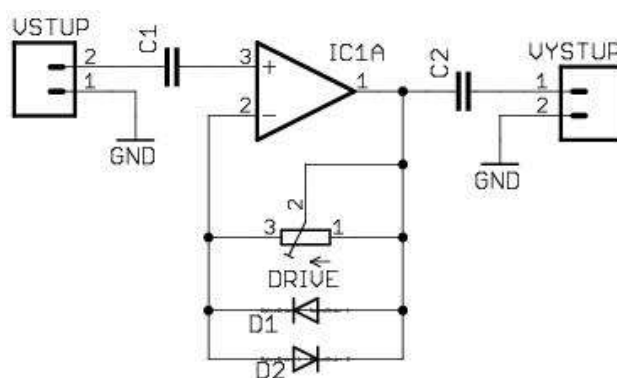
Jako digitální jsou realizovány zejména multiefekty, avšak i mezi kompaktními pedály jich nalezneme mnoho. Je to z toho důvodu, že použití signálových procesorů velmi usnadňuje návrh zapojení. Typickým příkladem jsou efekty delay, echo, chorus a jiné obvody, jejichž srdcem je zpožďovací linka.

Velmi často [5] používaným signálovým procesorem je PT2399, který pro své solidní vlastnosti umožňuje snadnou a levnou realizaci modulačních efektů.

2.3 Zkreslovací efekty

2.3.1 Overdrive

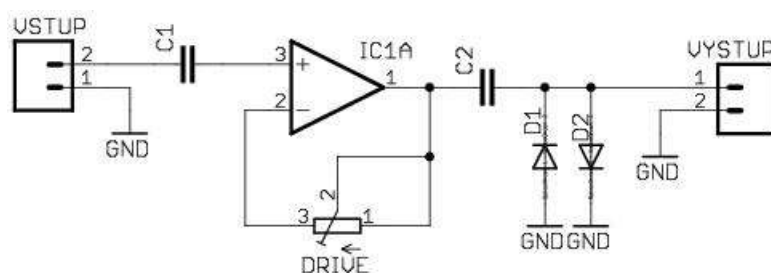
Overdrive se používá k napodobení zvuku elektronkového zesilovače, případně k jeho vybuzení. Vzhledem k tomu, že sinusoidy jsou špičky pouze zakulaceny, zkreslení není tak výrazné. Proto se používá především v klasickém rock'n'rollu, blues, apod. Diodový okrajovač je zapojen ve zpětné vazbě zesilovacího prvku (viz obr. 2-5), díky čemuž lze míru zkreslení měnit stylem hry, resp. dynamikou vstupního signálu. Dozvuk není prodloužen markantně.



Obrázek 2-5: Základní zapojení efektu overdrive.

2.3.2 Distortion

Od overdrivu se tento obvod odlišuje umístěním diodového okrajovače mezi výstup obvodu a zem (viz obr. 2-6). Výstupní signál tak podléhá tzv. tvrdé limitaci, zkreslení je v důsledku ořezu špiček sinusoidy výrazné a rovněž dozvuk je značný. Kvůli limitaci signálu je třeba nastavit vhodnou míru zkreslení, jinak tón ztratí svoji čitelnost. Distortion nachází uplatnění v žánrech jako hard rock, metal, aj.

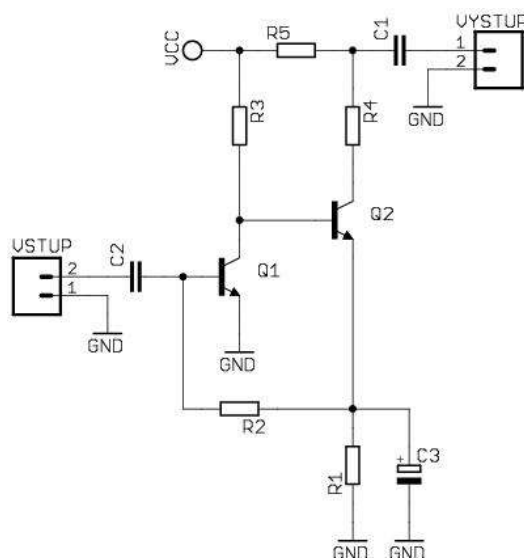


Obrázek 2-6: Základní zapojení efektu distortion.

2.3.3 Fuzz

Z uvedených zkreslovačů produkuje fuzz nejvíce zkreslený signál, jehož průběh je takřka čtvercový. Frekvenční spektrum výstupního signálu tedy obsahuje mnoho harmonických frekvencí.

Původním účelem tohoto obvodu byla simulace výrazně přebuzeného elektronkového zesilovače, zapojeného do reproduktoru s potrhanou membránou. Neobsahuje zpravidla diodové okrajovače, zkreslení je dosaženo kaskádním spojením několika zesilovacích stupňů. Vzhledem k zvukovému projevu je využíván v žánrech jako grunge, punk, atd.



Obrázek 2-7: Typické schéma zapojení efektu fuzz.

2.4 Modulační efekty pracující se změnou frekvenčního pásma

2.4.1 Booster

Kromě toho, že se booster používá k zesílení signálu v celém spektru pro větší vybuzení následujících obvodů, často se kombinuje s frekvenčním filtrem, který určuje, jaké pásmo bude zesíleno. Díky tomu lze dosáhnout např. zřetelnějšího tónu při současném hraní více kytar najednou.

Co do technické realizace jde o nejjednodušší efekt, prakticky postačuje triviální RC filtr a jednostupňový zesilovač.

2.4.2 Ekvalizér

Ekvalizér je nejrozšířenějším modulačním efektem. Je to soustava aktivních filtrů, díky kterým můžeme vedle různých zvukových možností také kompenzovat malé anebo příliš velké zesílení výkonového zesilovače v určitém frekvenčním pásmu. Typicky lze

nastavit zesílení ± 12 dB v 6 až 10 pásmech napříč slyšitelným spektrem [2].

2.4.3 Phaser

Phaser je určen k fázovému posuvu kopie vstupního signálu. Tato kopie je sloučena s originálním signálem, takže dojde k překryvu obou sinusoid. Fázi lze u kvalitnějších phaserů posouvat i tonálně, tedy nahoru a dolů. Fázový posuv roste s rostoucí frekvencí. Tím docílíme toho efektu, že část spektra je potlačena a jiná zvýrazněna, přičemž středové frekvence se stále mění a vzniká tak dojem, že zvuk se „točí“. Základem pro phaser je filtr s hřebenovou charakteristikou [6].

2.4.4 Wah-wah

Jde o zvláštní druh rezonančního filtru, který je v rozsahu cca 400 Hz – 2 kHz přeladován potenciometrem, jež je spřažen s kolébkovým pedálem. Jde tedy přeladovat během hry, aniž by byla pozornost kytaristy výrazně odvedena jinam. Při sešlápnutí patou jsou propouštěny nízké frekvence, při sešlápnutí špičkou vysoké. Při plynulém přenesení váhy z paty na špičku tak dojde k jakémusi „kváknutí“, od čehož je odvozen i název wah-wah - kvákadlo.

Zvláštním druhem efektu wah-wah je obálkový filtr neboli auto-wah. Princip je podobný, ale filtr je přeladován dynamikou vstupního signálu.

2.5 Modulační efekty pracující se změnou hlasitosti zvuku

2.5.1 Kompresor a expandér

Kompresor se používá ke sjednocení dynamiky signálů, silné zeslabuje a slabé zesiluje. Zvláštním případem kompresoru je limiter, který dynamiku sjednocuje pouze při překročení jisté nastavitelné úrovně.

Tento efekt velmi usnadňuje nazvučení jednotlivých nástrojů na živých vystoupeních. Zjednodušuje mixáž, dává vyniknout zvukům, které by za normálních okolností byly zamaskovány hlukem prostředí, urovnává nepřesnou dynamiku hry, příp. odstraňuje nežádoucí dynamiku vzniklou nekázní muzikanta.

Opakem kompresoru je expandér, který silné signály zesiluje a slabé zeslabuje. To umožňuje zlepšit poměr užitečného signálu a šumu. Praktické využití je také v pauzách mezi skladbami, kdy by jinak mohl být slyšet brum ze snímačů, nestíněných kabelů, apod. Používá se také pro mikrofony, aby byl snímán pouze požadovaný zvuk a nikoliv hluk prostředí [6].

2.5.2 Tremolo

Slouží k periodickému zeslabování a zesilování signálu. Tremolo vznikla z toho důvodu, že v počátcích amplifikace kytar byly kytary elektrické v porovnání s klasickými španělskými kytarami zvukově chudší. Zvukový projev postrádal jemnost a plnost, které bylo nakonec dosaženo střídavou změnou hlasitosti. Zvuk se tak stal „houpavým“.

Z technického pohledu lze tremolo realizovat pomocí fototranzistoru, který je osvětlován LED řízenou nízkofrekvenčním oscilátorem. Ten je plynule přeladitelný v rozsahu cca 0,5 - 20 Hz. Zajímavého zvuku lze dosáhnout při rozdělení vstupního signálu na dva kanály, přičemž každý je řízen jinou frekvencí. V případě složitějších tremolo efektů je LED řízena funkčním generátorem, který zpravidla umožňuje měnit výstupní sinusoidu v trojúhelníkový či čtvercový signál.

Dalším způsobem, jak realizovat tremolo efekt, je periodická změna pracovního bodu zesilovacího prvku. Taková realizace byla používána zejména v minulosti, a to jako součást elektronkových zesilovačů. Používá se dodnes, ale ne v tak hojné míře.

Velmi zajímavého zvuku lze dosáhnout při ovládání frekvence LFO dynamikou vstupního signálu. V takovém případě může být slabší signál rozkmitáván pomalu a silnější signál rychleji.

2.6 Modulační efekty pracující se změnou časového průběhu signálu

2.6.1 Delay, looper a echo

Delay je velmi oblíbeným efektem. Vytváří zpožděné kopie vstupního signálu, které s ním smíchává. Ve výsledku lze jediným úhodem o struny docílit několika periodických opakování s konstantní amplitudou. Při vhodném nastavení počtu opakování a časového intervalu vzniká zejména při hraní jednohlasých melodií tonálně bohatý zvuk, který evokuje pocit, jakoby jednotlivé tóny „pršely“.

Jádrem efektu delay je zpožďovací linka, dříve často realizovaná analogově pomocí bucket-brigade device [7], dnes převážně digitální. V ní se signál uloží do paměti, z které potom po uplynutí nastaveného časového intervalu pokračuje částečně na výstup a částečně zpětnou vazbou opět na začátek zpožďovací linky, aby šlo realizovat vícenásobné zpoždění. To lze nastavit u analogových linek v řádu jednotek až stovek ms, u digitálních i o 1 - 2 řády více. Ve většině případů se používá zpoždění v řádu desítek ms (poté vzniká dojem delšího dozvuku nástroje) anebo nízkých stovek ms (pro ozvěny).

Větší zpoždění má smysl realizovat pro hraní více melodií (typicky akordového základu a sólové melodie) jedním kytaristou. Takovým zvláštním případem efektu delay je tzv. looper, který obvykle umožňuje zpožďovat signál až o jednotky minut. Periodickým opakováním původních melodií a nahráváním nových můžeme zvukové stopy vrstvit na sebe. Jejich počet a doba trvání je omezena pouze vestavěnou RAM pamětí. Tak lze, s nadsázkou řečeno, nahradit větší počet muzikantů.

Echo efekt bývá často s delayem nesprávně zaměňován. Odlišuje se v tom, že časová prodleva mezi jednotlivými repeticemi se postupně prodlužuje a jejich amplituda klesá. V praxi se někdy efekty echo a delay umísťují do jedné přístrojové krabičky.

2.6.2 Reverb

Reverb je typickým příkladem efektu, který je vedle lepšího zvukového projevu používán zejména pro kompenzaci nedokonalosti elektroakustického řetězce. V tomto případě se jedná o kompenzaci akusticky nevhodných prostor, tedy prostor, které jsou malé a příp. obsahují mnoho předmětů pohlcujících zvuk. Jde tedy vlastně o simulaci ozvěny.

Zvuk bez dozvuku anebo ozvěny vnímá lidské ucho jako nepřírozený a nenesoucí informaci o prostoru. První a dodnes s oblibou používanou realizací simulace ozvěny je pružinový reverb [8].

Princip funkce je následující: vstupní signál je zesílen a jsou jím v elektromagnetickém převodníku rozkmitány pružiny v kovové skříni. Velikost zesílení udává rozkmit pružin a tedy i velikost „prostoru“. Jejich mechanická oscilace je v druhém elektromagnetickém převodníku převedena na napěťovou oscilaci, což je signál zpožděný o setrvačnost pružin. Aby správná funkce tohoto efektu nebyla znehodnocena případnými vnějšími vibracemi (např. otřesy způsobené ráznou chůzí), je blok pružin uložen v pružných závěsech. Tato elektromechanická realizace je mnohdy oproti digitální levnější a dle některých názorů také přirozenější.

2.6.3 Flanger

Flanger je obvod, který vznikl za účelem simulace zvuku, který vzniká zpomalením kotouče magnetofonu tlakem ruky. Takto zpomalený a mírně rozladěný zvuk je smícháván se zvukem originálním a vzniká tak velmi zajímavá kombinace, která byla (typicky u hudební skupiny Pink Floyd) a stále je s oblibou využívána.

Základem efektu flanger je opět zpožďovací linka s rozsahem 1-10 ms. Ta je řízena nízkofrekvenčním oscilátorem o frekvenci 0,5 - 3 Hz. U kvalitnějších flangerů lze volit tvar generovaného signálu LFO (trojúhelník, sinusoida). Pro zajištění požadovaného efektu je třeba signál též zpožďovat o konstantní časový interval. V efektu je také zavedena zpětná vazba pro dosažení očekávané funkce. V případě, že se zpětnou vazbou vrací signál o příliš vysoké úrovni, může dojít k rozkmitání celého obvodu [6]. To v některých hudebních žánrech není na škodu, protože tak lze vytvářet nové a nové zvuky, které nelze označit za špatné. Hudba je totiž velmi subjektivní a takřka všechny zvuky v ní nachází své uplatnění napříč hudebními žánry. Celkově se dá efekt flanger označit za kombinaci efektů auto-wah a chorus (viz kap. 2.4.4 a 2.7.1).

Výsledný signál je v nastavitelném poměru smícháván s originálním signálem. Celý obvod má hřebenovou frekvenční charakteristiku, která má řádově jednotky pásem [6].

2.7 Modulační efekty pracující se změnou výšky tónu

2.7.1 Chorus

Chorus umožňuje vytvořit dojem hry více nástrojů najednou. Velmi často je používán pro zhutnění a harmonické obohacení nezkráceného i zkráceného zvuku.

Obvod je tvořen několika paralelními zpožďovacími linkami, přeladitelnými v rozmezí cca 20 - 50 ms. Ty jsou řízeny LFO v řádu jednotek Hz, které u kvalitnějších efektů lze ovládat nezávisle. Časový průběh LFO lze u některých chorusů měnit ze sinusoidy na „náhodný“ průběh, který simuluje reálné chování muzikanta. Míchání upravených signálů s originálních je řízeno buď potenciometrem anebo dalším LFO, který řídí poměr upraveného signálu k originálnímu. Do výsledného zvuku to vnáší mírné kolísání hlasitosti, tedy další prvek, který přibližuje efekt k dokonalému napodobení sborové hry [6].

Z popsaného principu funkce vyplývá, že s přirozeným chorusem vytváří zvuk dvanáctistrunná kytara. Ta je opatřena šesti dvojicemi strun, kde první dvě dvojice jsou standardně laděny stejně a zbylé čtyři dvojice jsou laděny tak, aby v každé dvojici byly struny navzájem posunuté o oktávu (ve dvojici je tedy jedna struna laděna na dvojnásobnou frekvenci oproti druhé struně). Při hře na dvanáctistrunnou kytaru tedy vlastně hrajeme tutéž skladbu na „dvě kytary“ zároveň a v jednotlivých dvojicích jsou struny vzájemně velmi mírně rozladěny a jedna je vždy rozeznívána dříve, než druhá.

2.7.2 Vibrato

Vedle klasického vibrato efektu, kterého lze docílit chvěním prstů na struně či periodickou změnou jejího mechanického napětí a tedy i frekvence, je v praxi používán jeho elektrický ekvivalent. Efekt vibrato vzniknul z potřeby uplatnit jev i na nestrunné nástroje, např. elektronické klávesy.

Elektronická realizace efektu vibrato staví na využití Dopplerova jevu, který říká, že při přibližování zdroje zvuku k posluchači vnímáme frekvenci jako rostoucí, zatímco při jeho vzdalování jako klesající [9] [10].

Měnicí se vzdálenost je simulována zpožďovací linkou s proměnným zpožděním, které je řízeno LFO. Při rostoucím zpoždění frekvence klesá, při klesajícím zpoždění frekvence roste.

2.7.3 Octaver

Při hře na kytaru mnohdy vzniká nutnost obohatit spektrum o oktávu, tedy hudební interval. Pro posuv tónu o oktávu výše je třeba jeho frekvenci zvojnásobit, pro posuv o oktávu níže dělit dvěma [11].

Častější je posuv o oktávu výše, kterého se využívá zejména při sólové hře. Nejjednodušší realizací je invertování záporné půlvlny sinusoidy do kladných hodnot použitím dvoucestného operačního usměrňovače. Tím vzniká nový signál o poloviční dynamice a dvojnásobné frekvenci [12].

Posuv o oktávu níže je využíván především pro zhutnění zvuku doprovodné kytary. Možnou analogovou realizací je např. využití děličky s bistabilním klopným obvodem [13]. Vedle analogových se používají také digitální realizace.

2.7.4 Harmonizer

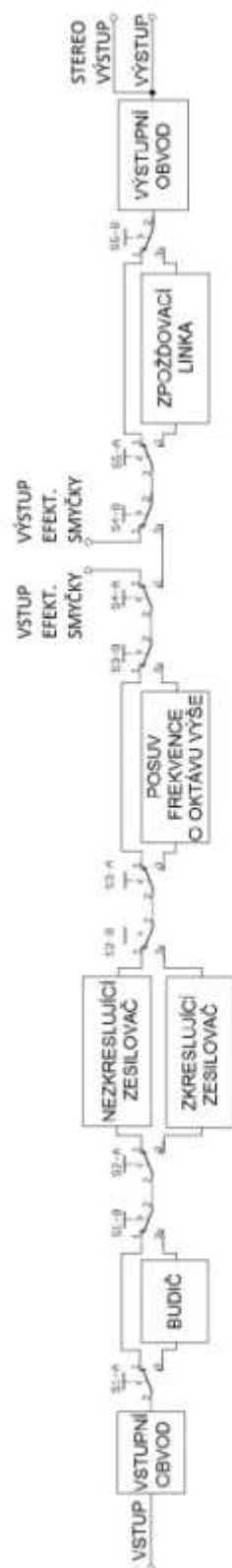
Účelem harmonizeru je obohacení spektra originálního signálu o harmonický hudební interval, především tercií a kvintu.

Vedle digitálních audioprocesorů jej lze v nejjednodušší podobě sestavit z přeladitelného LFO, jehož výstup se násobí se vstupním signálem. Do skupiny harmonizerů tak vlastně spadá i efekt octaver.

3 VÝBĚR EFEKTŮ A JEJICH NÁVRH

Výběr jednotlivých efektů do efektového zesilovače byl podřízen využití zejména v alternativní rockové hudbě. To předpokládá jemné až střední zkreslení signálu obvodem overdrive s možností přebuzení budičem pro sólovou hru, případně posuv kopie signálu z frekvenčního hlediska o oktávu výše pro harmonicky bohatší melodie. Zároveň lze použít zpožďovací linku pro zvýšení dozvuku nástroje, při větším zpoždění také pro ozvěny. Řazení efektů, které koresponduje s doporučeným pořadím [2], demonstruje obr. 3-1.

Jednotlivé efekty je možné přemostit nožním přepínačem a okamžitě tak odstranit jejich vliv na procházející signál. Jen vstupní a výstupní obvody, které obsahují filtry a napěťové sledovače, jsou z logiky věci zapojeny v řetězci stále. Pro dosažení nezkresleného signálu není vhodné přemostit blok zesílení úplně. Je vhodnější pouze přepnout signálovou cestu na nezkreslující zesilovač. Ten sice signál také v malé míře zkresluje, avšak tato je v porovnání se zkreslujícím zesilovačem zanedbatelná. Pokud by pro dosažení nezkresleného zvuku byl blok zesílení přemostěn úplně, docházelo by k značným, v praxi nežádoucím změnám v hlasitosti.



Obrázek 3-1: Blokové schéma efektového zesilovače.

3.1 Vstupní obvod

3.1.1 Teoretický úvod

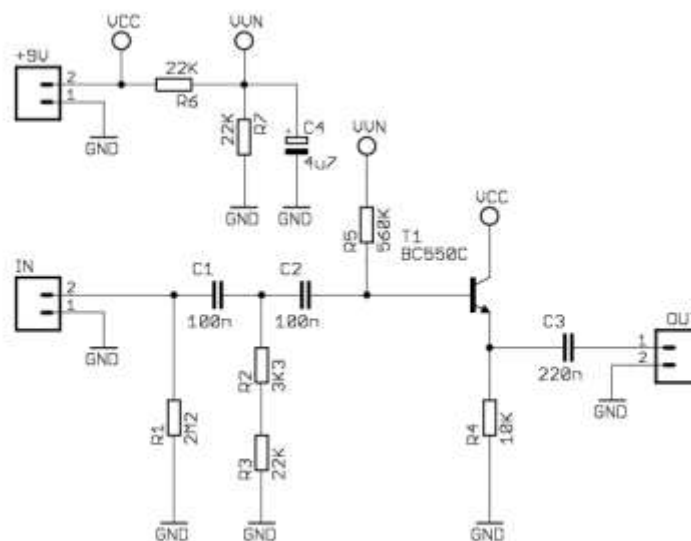
Primárním účelem snímačů na elektrické kytare je převádět oscilaci strun na oscilaci napětíovou. Tento signál ale v závislosti na počtu cívek na snímači apod. obsahuje také rušivé složky, především síťový brum [14]. Je proto třeba zvolit vhodný vstupní filtr, který co nejméně ovlivňuje užitečný signál z elektrické kytary.

Nejhlubší tón standardně laděné kytary má frekvenci 82,5 Hz [15]. Na této frekvenci by již měla být modulová frekvenční charakteristika co nejrovnější, aby nejnížší tón nebyl oproti ostatním výrazně zeslaben. Je také praktické zohlednit fakt, že v praxi se kytary často podlaďují ze standardního ladění EADGBE např. na DADGBE, kde nejhlubší tón má frekvenci 73 Hz. To s sebou nese nutnost snížení mezní frekvence vstupní horní propusti.

Druhou částí vstupního obvodu je emitorový sledovač, který pro svou vysokou vstupní a nízkou výstupní impedanci slouží právě k impedančnímu přizpůsobení [16]. Díky tomu není zdroj signálu nevhodně zatěžován. Napětíové zesílení je menší než jedna, zatímco proudové zesílení je velké a fáze výstupního signálu je rovna fázi vstupního signálu. Právě pro tyto vlastnosti je zesilovač v zapojení SC typickým vstupním blokem nízkofrekvenčních zesilovačů.

3.1.2 Popis zapojení

Jako vstupní filtr byla zvolena horní propust v podobě pasivního CR článku. Tento obvod i přes svou jednoduchost dostačuje, protože síťový brum je dostatečně frekvenčně vzdálen od nejnížší užitečné složky a je tedy i dostatečně utlumen. Během hry je pak užitečný signál několikanásobně silnější a nežádoucí složky nejsou patrné. Pro dokonalejší vstupní filtraci by bylo možno použít tzv. šumovou bránu, ta ale z principu funkce zabraňuje přirozenému náběhu a dozvuku tónu [2], což je pro mnoho uživatelů nepřijatelné. Schéma vstupního obvodu ilustruje obr. 3-2.



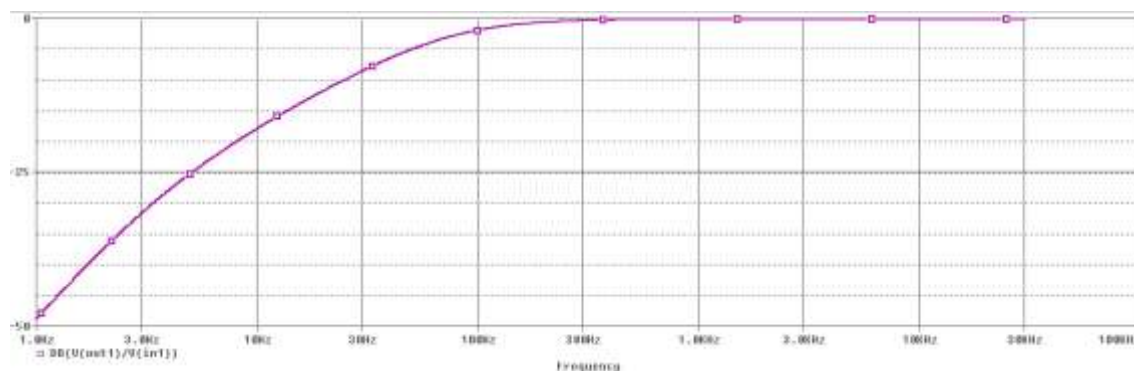
Obrázek 3-2: Schéma vstupního obvodu.

S ohledem na výše zmíněné skutečnosti byla zvolena mezní frekvence $f_m = 70$ Hz. Při výpočtu byla primárně volena hodnota kondenzátoru $C_1 = 100$ nF, protože vypočtené hodnoty odporu lze snadněji dosáhnout rezistorem ze standardních řad (příp. jejich kombinací).

$$f_m = \frac{1}{2\pi(R_2 + R_5)C_1} \quad (1)$$

$$(R_2 + R_5) = \frac{1}{2\pi f_m C_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 70 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} = 22\,736\,\Omega$$

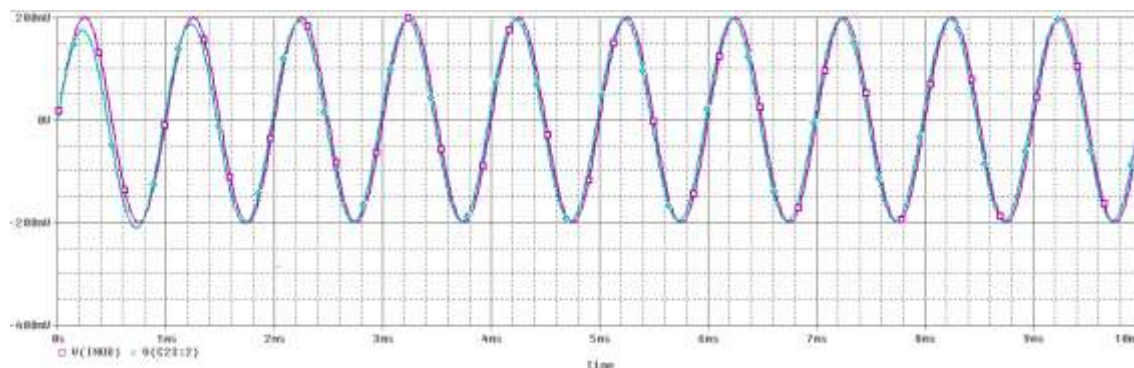
Podle výpočtu by měla být zvolena nejbližší vyráběná hodnota rezistoru, a to 22 kΩ. V takovém případě by ale podle modulové frekvenční charakteristiky na obr. 3-3 byla mezní frekvence asi 75 Hz, což je způsobeno připojením oddělovacího kondenzátoru C_3 . Aby nebyl nejnižší uvažovaný tón o frekvenci 73 Hz zbytečně moc utlumen, byla experimentováním stanovena hodnota odporu 25,3 kΩ, kterou lze realizovat pomocí sériového spojení rezistorů $R_2 = 3,3$ kΩ a $R_5 = 22$ kΩ. V takovém případě vychází mezní frekvence na přijatelných 69 Hz.



Obrázek 3-3: Modulová frekvenční charakteristika vstupního obvodu.

Pro impedanční přizpůsobení snímačů je na vstupu zapojen uzemněný rezistor R_6 , jehož jmenovitá hodnota by měla být v řádu jednotek $M\Omega$. Po seznámení s některými schémata kytarových efektů byla zvolena typická hodnota $2,2 M\Omega$ [5].

Na vstupu emitorového sledovače je třeba užitečný signál superponovat na polovinu napájecího napětí. Proto je sem přes rezistor $R_3 = 560 k\Omega$ připojen potenciál tzv. virtuální nuly, tedy $4,5 V$. Aby nedošlo k znehodnocení funkce horní propusti, je tato oddělena od vstupu emitorového sledovače fóliovým kondenzátorem $C_3 = 100 nF$. Tranzistor BC550 byl vybrán na základě dobrých šumových vlastností [17] a dostupnosti. Z časového průběhu vstupního a výstupního signálu na obr. 3-4 je zřejmé, že obvod pracuje správně a výstupní signál je jen zanedbatelně napětově utlumen.



Obrázek 3-4: Průběh vstupního a výstupního napětí.

3.2 Budič

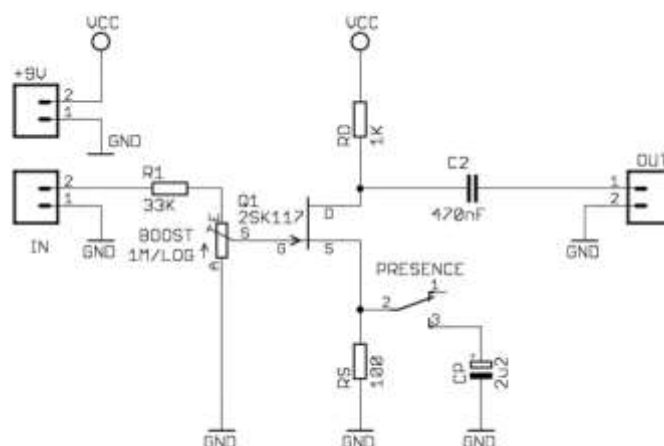
3.2.1 Teoretický úvod

Budič je v podstatě jednostupňový zesilovač, jehož účelem je zesílit signál buď v celém jeho spektru anebo jen ve vybraném frekvenčním pásmu. Tím docílíme výraznějšího přebuzení zkreslujícího zesilovače a tím pádem i většího zkreslení. Toho se využívá zejména při hraní sólových melodií, případně akordů složených z maximálně tří tónů. S rostoucím zkreslením roste také dozvuk, což napomáhá přirozenému vzniku akustické

zpětné vazby, tedy jevu, který je v elektroakustické praxi potlačován, kytaristy však často vyhledáván.

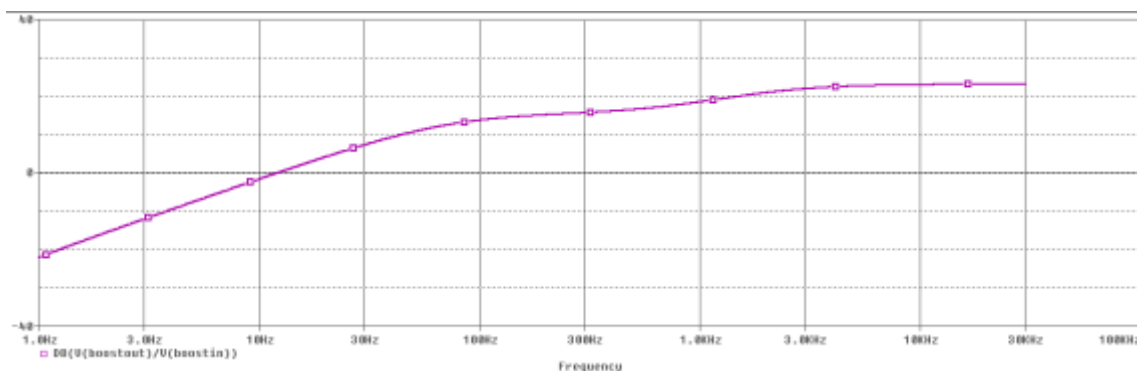
3.2.2 Popis zapojení

Navržené schéma ukazuje obr. 3-5. Pro nastavení vybuzení tranzistoru 2SK117 slouží logaritmický potenciometr BOOST o maximálním odporu $1\text{ M}\Omega$. Vzhledem k tomu, že v závislosti na dynamice vstupního signálu by bylo možné vybudit tranzistor příliš mnoho, je potenciometru BOOST předřazen rezistor $R_1 = 33\text{ k}\Omega$. Použitý JFET tranzistor 2SK117 byl vybrán na základě pozitivních zkušeností, dostupnosti a především pro parametr $U_{GS\text{off}}$, který je podobný uživatelsky oblíbenému J201 [18] [19].



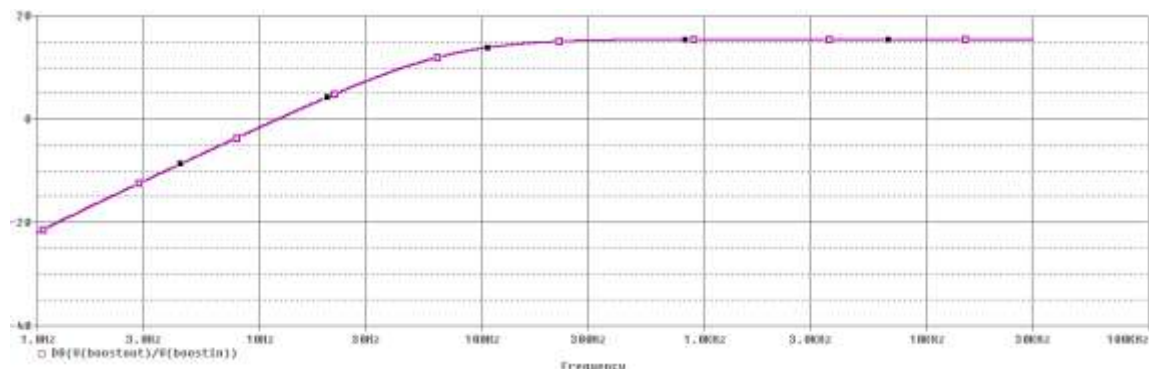
Obrázek 3-5: Schéma zapojení budiče.

K elektrodě source je kromě rezistoru R_S připojen přes spínač PRESENCE tantalový kondenzátor $C_P = 2,2\text{ }\mu\text{F}$. Jak ukazuje obr. 3-6, jeho připojením k elektrodě source vzroste zesílení na vyšších frekvencích počínaje asi 1 kHz a zvuk se tím „zjasní“. Naproti tomu, bez kondenzátoru C_P zůstává modulová frekvenční charakteristika budiče téměř konstantní (viz obr. 3-7) v celém pásmu frekvencí produkovaných kytarou. Hodnota C_P byla stanovena dle (1).



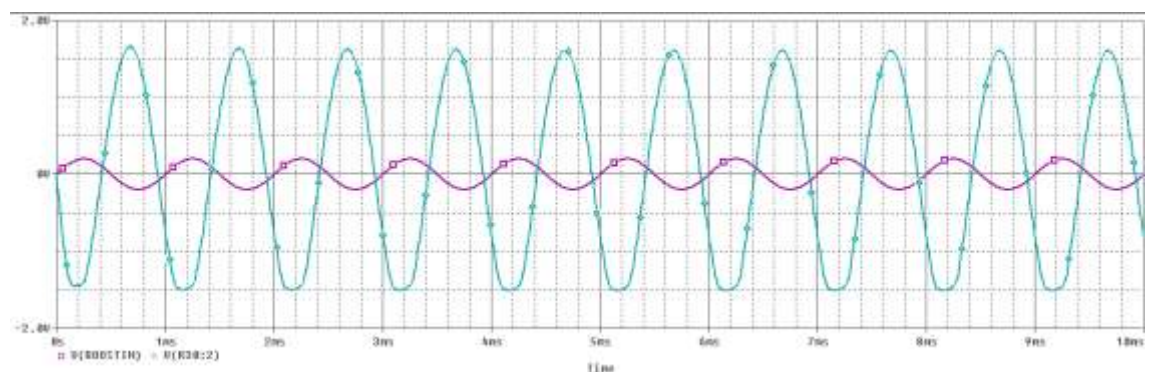
Obrázek 3-6: Modulová frekvenční charakteristika budiče s připojeným C_P .

Dle obr. 3-7 je zesílení budiče od frekvence cca 100 Hz asi 14 dB, což odpovídá výpočtu (viz kap. 3.2.3) dle (8).

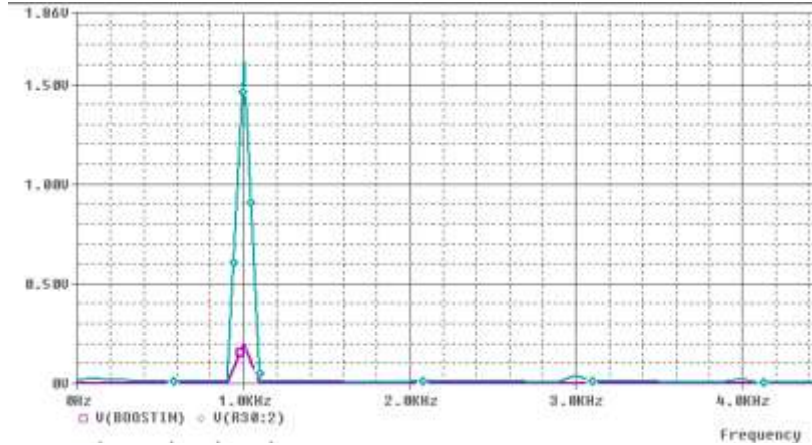


Obrázek 3-7: Modulová frekvenční charakteristika budiče s odpojeným C_p .

Z časového průběhu vstupního a výstupního signálu na obr. 3-8 je zřejmé, že zesilovač otáčí fázi o 180° a signál mírně asymetricky zkresluje zakulacením špiček spodní půlvlny, což je pro tuto aplikaci vhodné a svědčí to o tom, že JFET tranzistory zesilují signál podobně jako elektronky [20]. Tomu nasvědčuje i amplitudové spektrum vstupního a výstupního signálu na obr. 3-9, kde je patrný vznik sudé harmonické složky, byť o velmi malé amplitudě.



Obrázek 3-8: Časový průběh vstupního a výstupního signálu.



Obrázek 3-9: Amplitudové spektrum vstupního a výstupního signálu.

Pro výpočty byly použity vztahy uvedené v [20].

$$\text{zvolen } I_{DSS} = 7 \text{ mA} \rightarrow U_{GS\text{off}} = U_p = -0,8 \text{ V} \quad [19]$$

$$U_D = 0,6U_{cc} + 0,7|U_p| = 0,6 \cdot 9 + 0,7 \cdot 0,85 = 5,995 \text{ V} \quad (2)$$

$$R_D = \frac{0,9 \cdot (U_{cc} - 2|U_p|)}{I_{DSS}} = \frac{0,9 \cdot (9 - 2 \cdot 0,8)}{7 \cdot 10^{-3}} = 951 \, \Omega \quad (3)$$

$$I_D = \frac{I_{DSS}(0,44U_{cc} - 0,78 \cdot U_p)}{U_{cc} - 2U_p} = \frac{7 \cdot 10^{-3} \cdot (0,44 \cdot 9 - 0,78 \cdot (-0,8))}{9 - 2 \cdot (-0,8)} = 3,03 \text{ mA} \quad (4)$$

$$U_S = \frac{|U_p|(0,37U_{cc} - 0,65U_p)}{U_{cc} - 2U_p} = \frac{0,8 \cdot (0,37 \cdot 9 - 0,65 \cdot (-0,8))}{9 - 2 \cdot (-0,8)} = 0,3 \text{ V} \quad (5)$$

$$R_S = \frac{0,83 \cdot |U_p|}{I_{DSS}} = \frac{0,83 \cdot 0,8}{7 \cdot 10^{-3}} = 95 \, \Omega \quad (6)$$

Pro vypočtené rezistory byly zvoleny nejbližší hodnoty z řady E12, a to $R_S = 100 \, \Omega$ a $R_D = 1 \text{ k}\Omega$.

$$A_U = 0,5 \frac{R_D}{R_S} = 0,5 \cdot \frac{1000}{100} = 5 \quad [-] \quad (7)$$

$$A_{U_{dB}} = 20 \log(A_U) = 20 \cdot \log(5) = 13,97 \text{ dB} \quad (8)$$

3.3 Zkreslující a nezkreslující zesilovač

3.3.1 Teoretický úvod

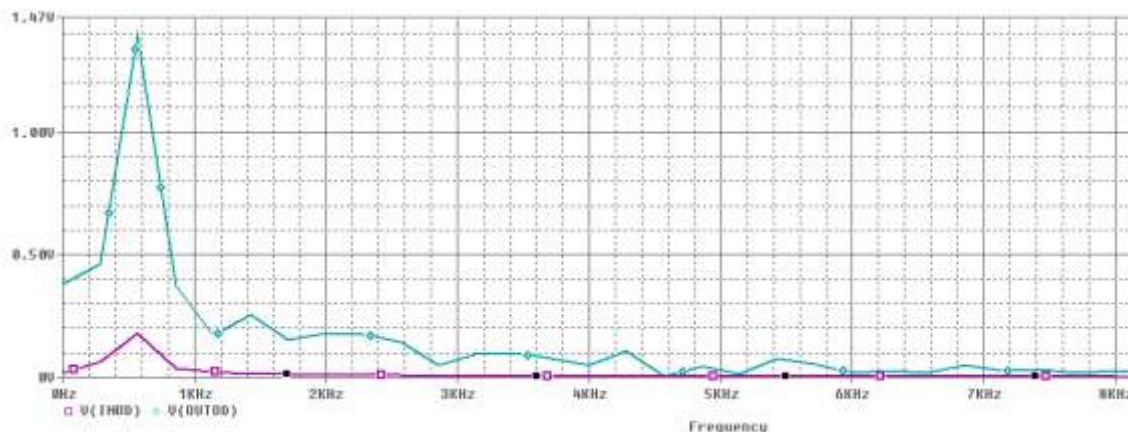
Zkreslení efektem overdrive je jedním z nejpoužívanějších. Používá se ke komprimaci a lehkému až střednímu zkreslení signálu, který se zvukově podobá přebuzenému elektronkovému zesilovači [2].

Bývá zapojen buď z diskretních tranzistorů anebo s využitím operačních zesilovačů. V případě diskretních tranzistorů jde obvykle o kaskádu čtyř až pěti zesilovacích stupňů, mezi nimiž mohou být zapojeny diodové okrajovače a pasivní ekvalizace. Při použití zapojení s operačními zesilovači se diodové okrajovače zapojují do zpětné vazby a paralelně připojeným potenciometrem a kondenzátorem se řídí míra zkreslení. Obvykle také bývá do zpětné vazby zapojen RC členek, který upravuje modulovou frekvenční charakteristiku operačního zesilovače v bloku zkreslení a také posouvá fázi limitačního signálu [21]. Velkou výhodou obvodů overdrive je fakt, že míra zkreslení roste s rostoucí amplitudou vstupního signálu. Tím pádem je možné, na rozdíl od obvodů distortion (viz kap. 2.3.2), značně ovlivňovat charakter zvuku dynamikou hry.

3.3.2 Popis zapojení

Protože impedanční přizpůsobení a oddělení z hlediska stejnosměrné složky je již součástí výstupů předchozích obvodů, vstupní signál je v závislosti na poloze přepínače S_1 veden přímo na neinvertující vstup zkreslujícího či nezkreslujícího zesilovače.

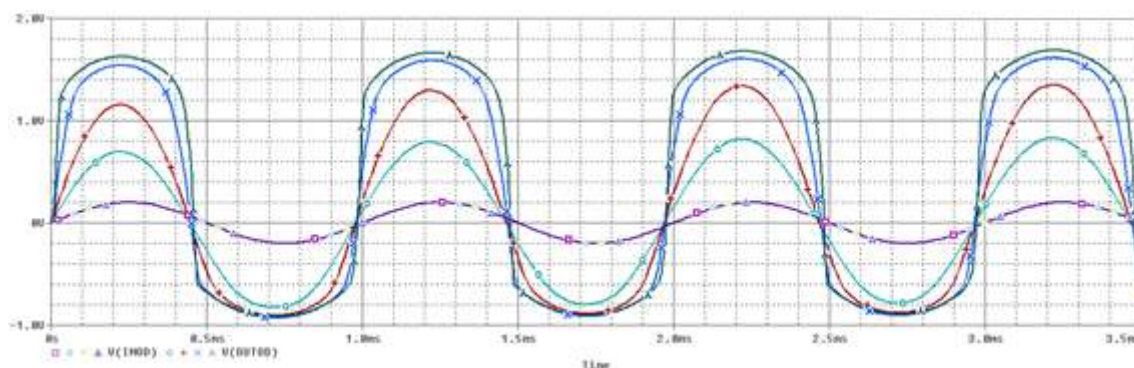
Zkreslující zesilovač představuje základní zapojení efektu overdrive, doplněné o jednoduché modifikace. Navržené zapojení ilustruje obr. 3-10. Operační zesilovač pracuje v neinvertujícím zapojení a ve zpětné vazbě jsou umístěny dva diodové okrajovače, přičemž jejich zapojení do obvodu lze volit přepínačem Ge/Si.



Obrázek 3-12: Amplitudové spektrum vstupního a výstupního signálu při plně asymetrickém zkreslení. Základní frekvence $f = 500$ Hz.

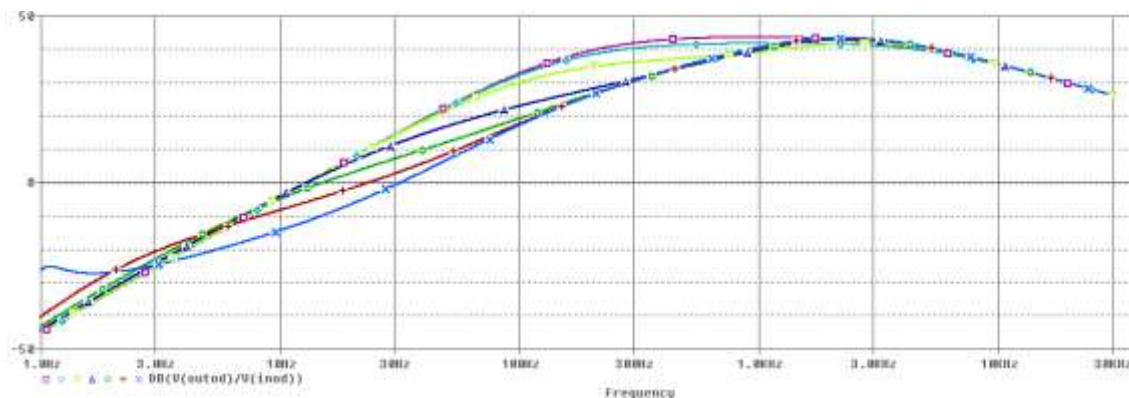
Druhý diodový okrajovač je tvořen antiparalelním zapojením běžných křemíkových diod 1N4148 ($U_p = 0,7$ V). V tomto se jedná o symetrické okrajování a vzhledem k vyššímu prahovému napětí o je jejich použití vhodné pro dosažení více zkresleného signálu. Při fyzické realizaci budou do desky plošných spojů všechny diody v okrajovačích připojeny přes patice, aby bylo možno posoudit více variant.

Kondenzátor $C_1 = 22$ pF nachází uplatnění při maximálním nastaveném zkreslení, kdy vyhlazuje zkreslenou část signálu a výsledný zvuk je pak „měkčí“ [21]. Pokud bychom zvyšovali jeho kapacitu, zesílení, resp. zkreslení by se stále zmenšovalo a od určité hodnoty by výrazně pokleslo. Vlastní zkreslení je řízeno potenciometrem DRIVE v míře zřejmé z obr. 3-13.



Obrázek 3-13: Rozmítání potenciometru DRIVE v porovnání se vstupní sinusoidou.

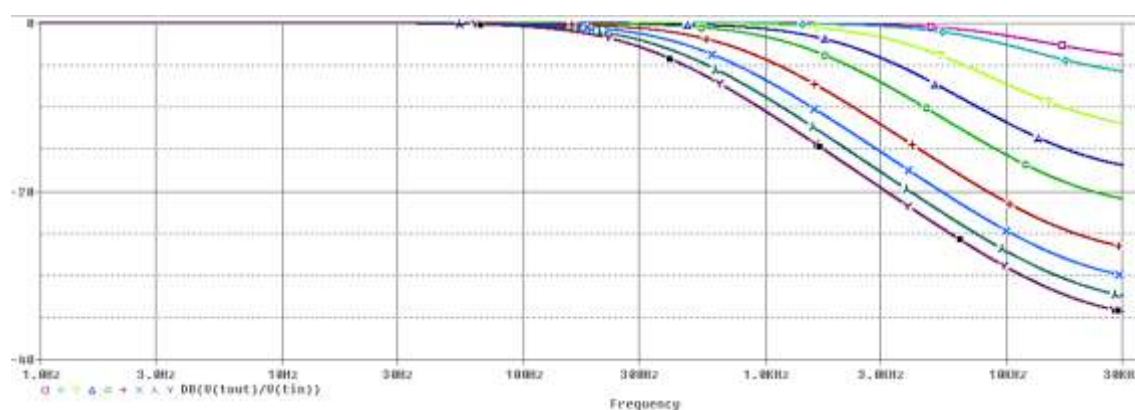
Vzhledem k tomu, že v praxi se na nižších frekvencích hrají obvykle doprovodné akordy složené z 2-6 tónů, je třeba zabezpečit čitelnost výsledného zvuku. To zajišťuje přeladitelná horní propust, připojená k invertujícímu vstupu operačního zesilovače. Jejím přeladováním potenciometrem FREQ lze spojitě měnit modulovou frekvenční charakteristiku, tedy zesílení, resp. zkreslení operačního zesilovače na různých frekvencích. To je patrné z obr. 3-14. Na vyšších frekvencích se obvykle hrají sólové melodie složené z 1 - 2 tónů, zde tedy vyšší zkreslení nachází větší uplatnění.



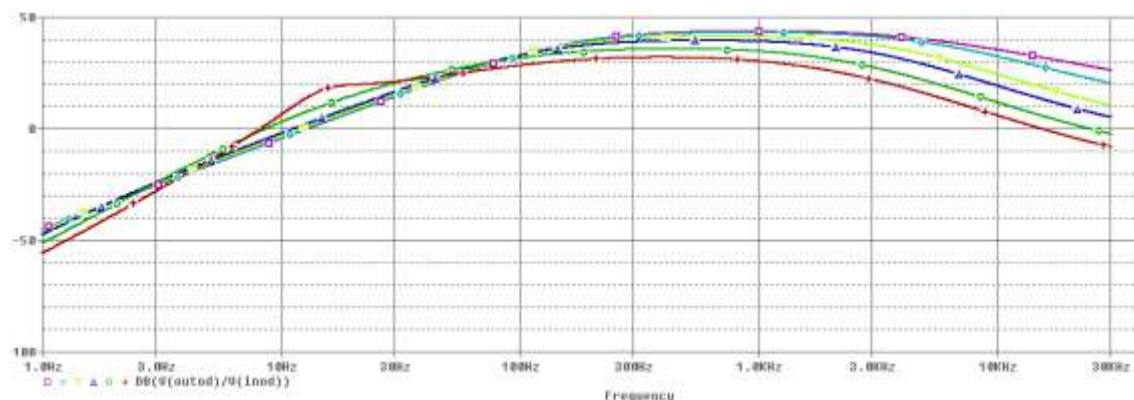
Obrázek 3-14: Rozmítání potenciometru FREQ při parametru $R_{TONE} = 1\Omega$, tedy $f_m = 19,4\text{ kHz}$.

Spojité změny modulové frekvenční charakteristiky operačního zesilovače má ještě jednu výhodu. V praxi se na kytarách poměrně často využívá změna tóniny pomocí kapodastru, což z technického hlediska znamená posuv dolní hranice pracovního pásma frekvencí výše. Při pevně dané modulové frekvenční charakteristice by již ty nejnižší tóny byly zkresleny takřka stejnou mírou, jako tóny vyšší, což z výše zmíněných důvodů není vhodné. Změnou modulové frekvenční charakteristiky zkreslujícího zesilovače lze výsledný zvuk přesněji nastavit podle potřeby.

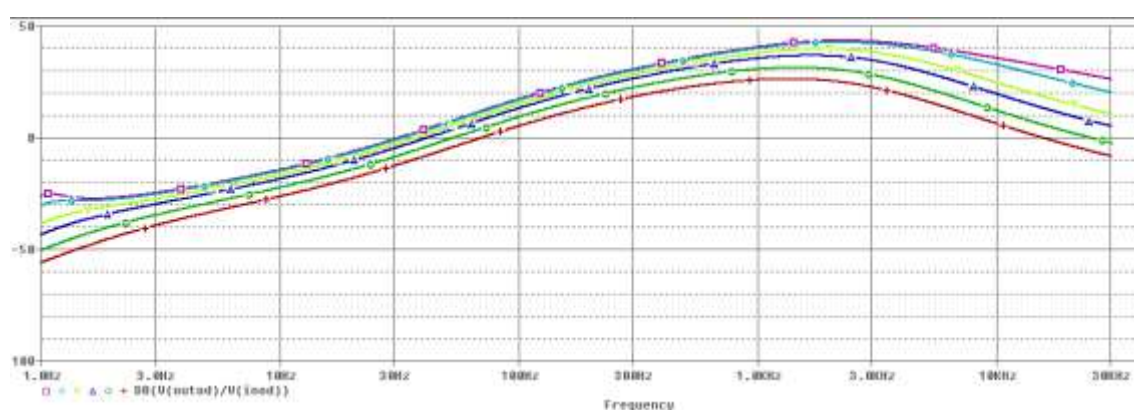
Posledním blokem zkreslujícího zesilovače je pasivní tónová clona, jejíž modulovou frekvenční charakteristiku ilustruje obr. 3-15. Je realizována pro efekty overdrive typickým způsobem [3], a to jako pasivní dolní propust přeladitelná potenciometrem TONE v rozsahu mezních frekvencí 313 Hz až 19,4 kHz, kde hodnoty R_4 , R_{TONE} a C_4 byly určeny dle (1). Nejvyšší mezní frekvenci je třeba volit v blízkosti horní hranice slyšitelného pásma, tedy 20 kHz. Vyšší, již neužitečné frekvence, by mohly v následujících obvodech zapříčinit nežádoucí intermodulační zkreslení [23]. Tónová clona, která propouští již upravený signál, v kombinaci s potenciometrem FREQ, který určuje, jakou mírou budou zkresleny nižší a vyšší frekvence, umožňuje nastavení výsledného zvuku v poměrně širokých mezích, viz obr.3-16 a obr.3-17.



Obrázek 3-15: Modulová frekvenční charakteristika tónové clony jako samostatného obvodu.



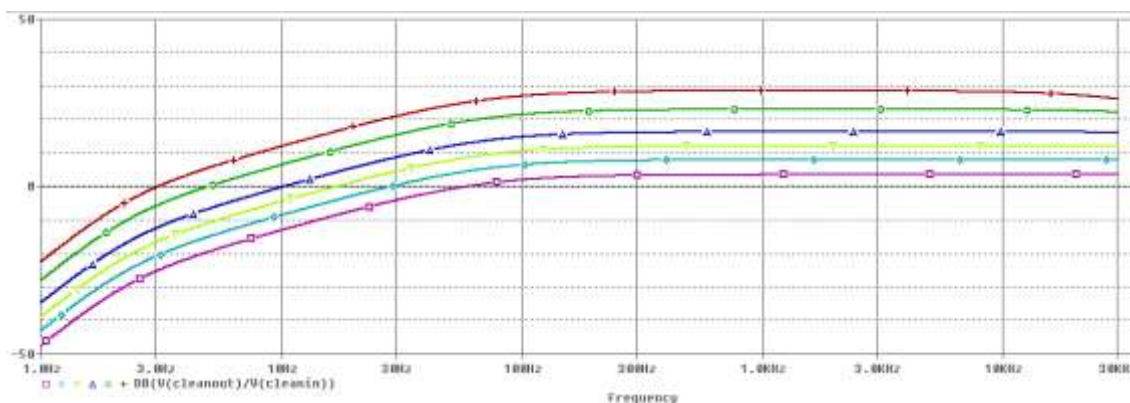
Obrázek 3-16: Rozmítání potenciometru TONE při parametru $FREQ = 1\Omega$.



Obrázek 3-17: Rozmítání potenciometru TONE při parametru $FREQ = 500\text{ k}\Omega$.

Výstup zkreslujícího zesilovače tvoří potenciometr LEVEL, kterým lze nastavit výstupní úroveň a kondenzátor C_5 , určený pro oddělení stejnosměrné složky.

Nezkreslující zesilovač je tvořen prostým zapojením neinvertujícího operačního zesilovače. Slouží k tomu, aby v případě potřeby přepínání zkresleného a nezkresleného zvuku nedocházelo k nežádoucím změnám hlasitosti, které by nastaly při pouhém přemostění zkreslujícího zesilovače. Nezkreslující zesilovač je určen pouze k zesílení vstupního signálu, a proto je jeho charakteristika v rozsahu frekvencí produkovaných kytarou [15] téměř konstantní, viz obr. 3-18.



Obrázek 3-18: Modulová frekvenční charakteristika nezkreslujícího zesilovače.

Vzhledem k tomu, že operační zesilovač zesiluje rozdíl napětí mezi oběma vstupy, je zesílení neinvertujícího zesilovače dáno vztahem [16]:

$$A_U = 1 + \frac{R_{OUT-INV}}{R_{INV-GND}} \quad (9)$$

$R_{OUT-INV}$ značí rezistor připojený mezi výstup operačního zesilovače a invertující vstup, $R_{INV-GND}$ pak rezistor mezi invertujícím vstupem a zemí. Zesílení zkreslujícího zesilovače tedy je:

$$A_{Uz} = 1 + \frac{R_1 + R_{DRIVE}}{R_2} = 1 + \frac{10000 + 500000}{3300} = 155,5 [-]$$

To dle (8) odpovídá zesílení 43,8 dB. Zesílení nezkreslujícího zesilovače je:

$$A_{UN} = 1 + \frac{R_4 + R_{CLEAN}}{R_3} = 1 + \frac{10000 + 250000}{8200} = 32,7 [-]$$

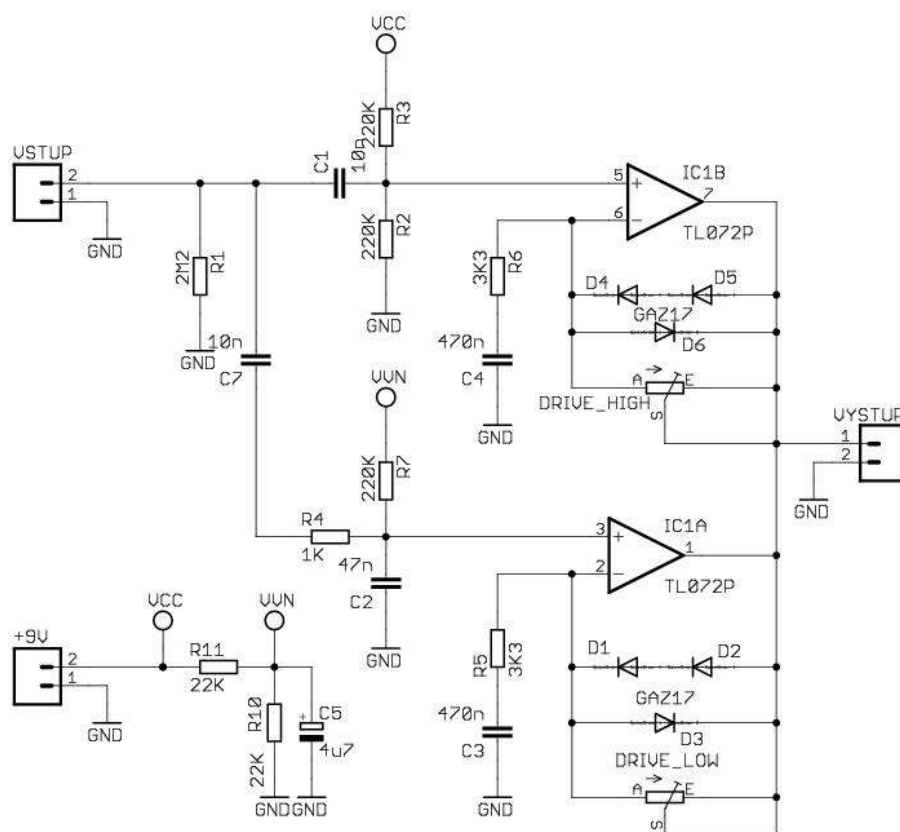
Tento poměr dle (8) odpovídá 30,3 dB. Při zvětšování zpětnovazebního odporu R_{CLEAN} docházelo k nežádoucímu zkreslení výstupního signálu. Pro větší zesílení při zachování nezkresleného výstupního signálu by tedy bylo třeba zvýšit napájecí napětí daného operačního zesilovače anebo použít jiné, vhodnější zapojení. To ale není třeba, protože uvedená zesílení by zapříčinila příliš vysoké výstupní úrovně pro další zpracování, a proto se utlumují potenciometry ovládajícími jejich velikost (CLEAN a LEVEL), aby nedošlo k přebuzení následujících obvodů. Utlumením lze nastavit výstupní úrovně tak, aby byly přibližně stejné a nevznikal tak markantní rozdíl v hlasitosti při přepnutí ze zkreslujícího zesilovače na nezkreslující.

3.3.3 Nerealizované řešení zkreslujícího zesilovače

V prvotní fázi návrhu bylo zamýšleno navrhnout zkreslující zesilovač jako dvoupásmový, a to tak, aby bylo možno jedním potenciometrem nastavit zkreslení pro frekvence pod 300 Hz a druhým potenciometrem nastavit rozdílné, zpravidla vyšší zkreslení pro frekvence nad 300 Hz.

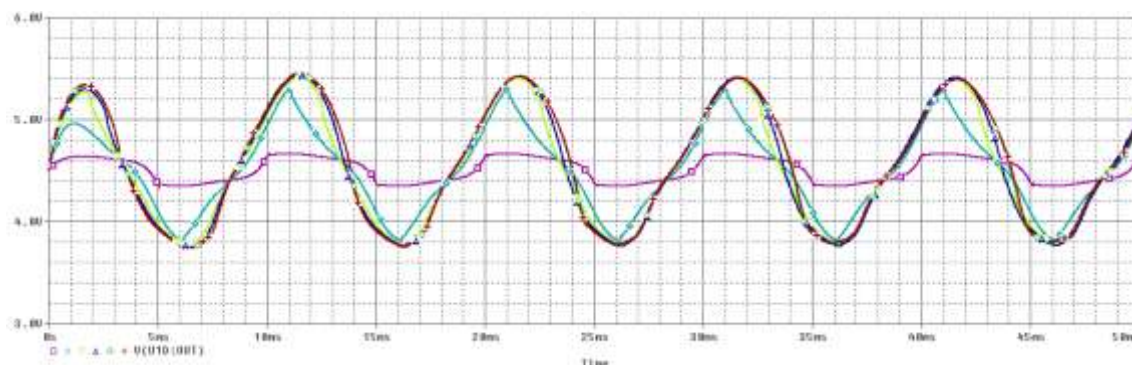
Toto řešení mělo spočívat v rozdělení signálu vstupní horní a dolní propustí,

přičemž v každé větvi by byl jeden zkreslující zesilovač. Za blokem zkreslení se měly oba signály sloučit a dále pokračovat do společné tónové clony. V souladu s touto myšlenkou bylo navrženo zapojení na obr. 3-19.



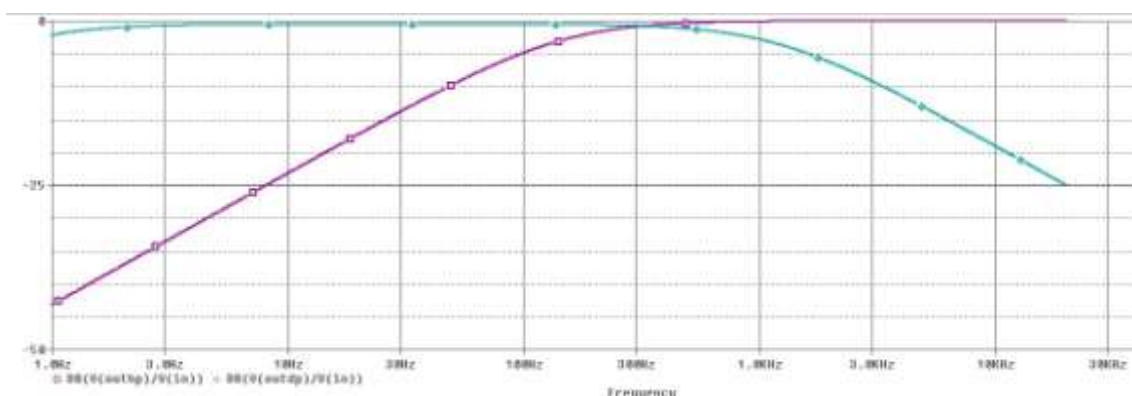
Obrázek 3-19: Nedokončené zapojení původně zamýšleného zkreslujícího zesilovače.

Výsledek ovšem vůbec neodpovídal předpokladům. Největší nedostatek tohoto zapojení je spojení výstupů jednotlivých operačních zesilovačů. Tím pádem se nastavení zesílení, resp. zkreslení jednoho pásma velmi promítne do zesílení druhého pásma v důsledku uzemnění výstupu jednoho operačního zesilovače přes zpětnovazební, zesílení nastavující odpor a RC člen druhého operačního zesilovače. Tento nedostatek by bylo možno eliminovat při spojení obou výstupů přes odporový dělič, jehož střed by představoval výstup bloku zkreslení, příp. sčítacím zesilovačem [16], na jehož vstupu by byly také odporové děliče, oddělující jednotlivé výstupy. Obr. 3-20 ukazuje výstupní signál o frekvenci 100 Hz, který je nepřípustně ovlivňován rozmitáním potenciometru $R_{\text{DRIVE_HIGH}}$.



Obrázek 3-20: Výstupní signál $f = 100$ Hz ovlivňovaný rozmítáním $R_{\text{DRIVE_HIGH}}$.

Dalším podstatným nedostatkem je malá strmost vstupních filtrů, kterou ještě zhoršuje připojení potenciálu virtuální nuly přímo na výstup horní propusti. Obr. 3-21 ukazuje, že strmost jednotlivých filtrů je v okolí klíčové frekvence 300 Hz zcela nedostatečná.



Obrázek 3-21: Modulová frekvenční charakteristika vstupních filtrů.

Tyto hlavní nedostatky by bylo možné odstranit vstupními filtry s větší strmostí (příp. spolu se zvýšením počtu pásem), oddělovacím kondenzátorem mezi výstupy filtrů a vstupy operačních zesilovačů a sloučením individuálně zkreslených signálů již naznačeným způsobem. Po zjištění, že problém rozdílného zkreslení nižších a vyšších frekvencí lze snadněji a lépe vyřešit korekcí frekvenční charakteristiky operačního zesilovače RC článkem, bylo toto řešení definitivně zamítnuto

3.4 Posuv frekvence o oktávu výše

3.4.1 Teoretický úvod

Oktávou v hudební praxi rozumíme takový interval mezi dvěma tóny, kde jeden tón má oproti druhému dvojnásobnou frekvenci. Takové tóny mají stejné písmenné označení a rozdílný index. Např. $f_{a1} = 440$ Hz, $f_{a2} = 880$ Hz. V tomto případě je na efekt octaver kladen obvyklý požadavek, a to vytvořit kopii původního signálu, která je posunuta o oktávu výše. To umožňuje vytvořit dojem dvanáctistrunné kytary a zajímavě tak

obohatit melodické linky.

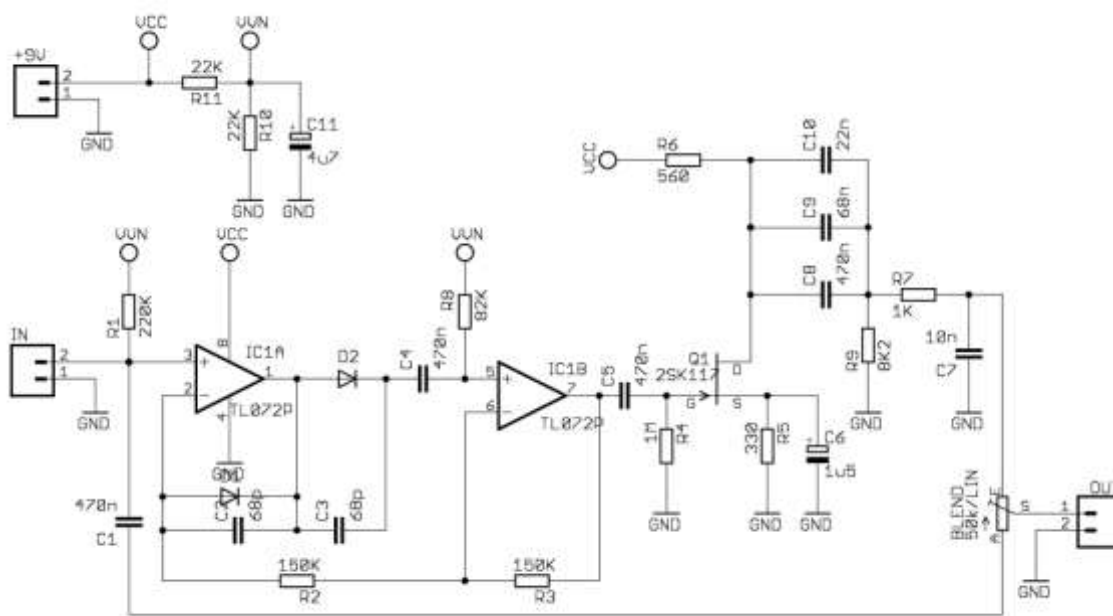
Pro realizaci zdvojnásobení frekvence signálu analogovou cestou existují dvě varianty. První variantou je vytvořit nízkofrekvenční oscilátor s výstupním signálem o frekvenci 2 Hz, který se v analogové násobičce násobí se vstupním signálem. Na výstupu obvodu tedy dostáváme signál o dvojnásobné frekvenci oproti vstupnímu signálu. Toto řešení je náročné na přesnost frekvence výstupního signálu LFO, protože při odchylkách od požadované frekvence 2 Hz již výstupní signál nemá přesně dvojnásobnou frekvenci oproti vstupnímu signálu a vzniká tak dojem, že tón je tzv. falešný. Z toho vyplývá, že i při pečlivém výběru součástek a precizním nastavení frekvence LFO je nutno zajistit, aby vlivem stárnutí součástek a teplotních změn nedocházelo k její nepřijatelné nepřesnosti.

Výhodou tohoto řešení je fakt, že signál je zkreslován pouze zanedbatelnou mírou, a proto je takto koncipovaný octaver vhodný i do hudebních stylů, ve kterých se zkreslený zvuk příliš neuplatňuje.

Podstatně jednodušší variantou je docílit oktávového efektu pomocí dvoucestného operačního usměrňovače, který invertuje zápornou půlvlnu signálu do kladných hodnot a tím vytvoří signál o poloviční dynamice a dvojnásobné frekvenci [12]. Vzhledem k použití diod v signálové cestě je výstupní signál oproti vstupnímu zkreslený, což nemusí nutně představovat problém a pro použití v rockové hudbě, kdy je tento efekt využíván zejména při sólové hře, je toto řešení vhodné. V konečné fázi je třeba zesílit signál na úroveň stejnou anebo větší, než je úroveň vstupního signálu.

3.4.2 Popis zapojení

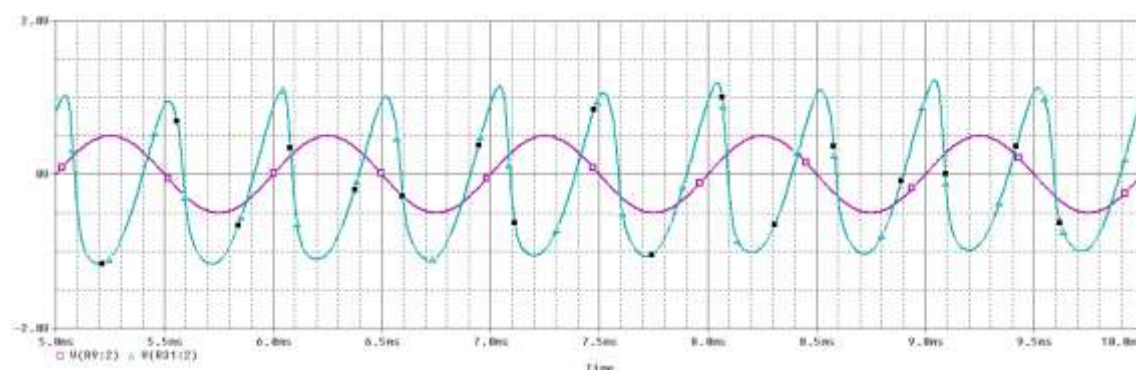
Navržené zapojení na obr. 3-22 vychází vzhledem k popsanému principu činnosti ze zapojení dvoucestného operačního usměrňovače [16].



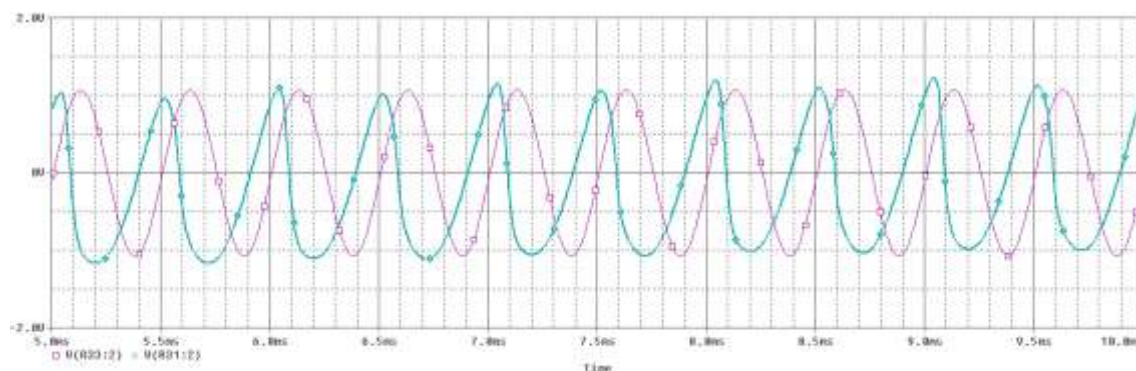
Obrázek 3-22: Schéma zapojení efektu octaver.

Vzhledem k zapojení vzniká v signálové cestě úbytek napětí o hodnotu prahového napětí použitých diod. Oba operační zesilovače jsou proto spojeny kapacitní vazbou [16] a na oba neinvertující vstupy je napětí virtuální země přiváděno zvlášť.

V závislosti na orientaci usměrňovacích diod je horní nebo spodní špička nově vzniklého signálu velmi ostrá. Tento jev částečně eliminují k diodám paralelně připojené kondenzátory o kapacitě v řádu desítek pF. Výstupní sinusoida je stranově mírně zkosená. Vzhledem k těmto faktům bude i zvukový projev efektu octaver zkreslený. Srovnání časového průběhu vstupního (1 kHz) a výstupního (2 kHz) signálu je zřejmé z obr. 3-23, srovnání výstupního signálu se signálem z generátoru o stejné frekvenci, tedy 2 kHz, je na obr. 3-24.



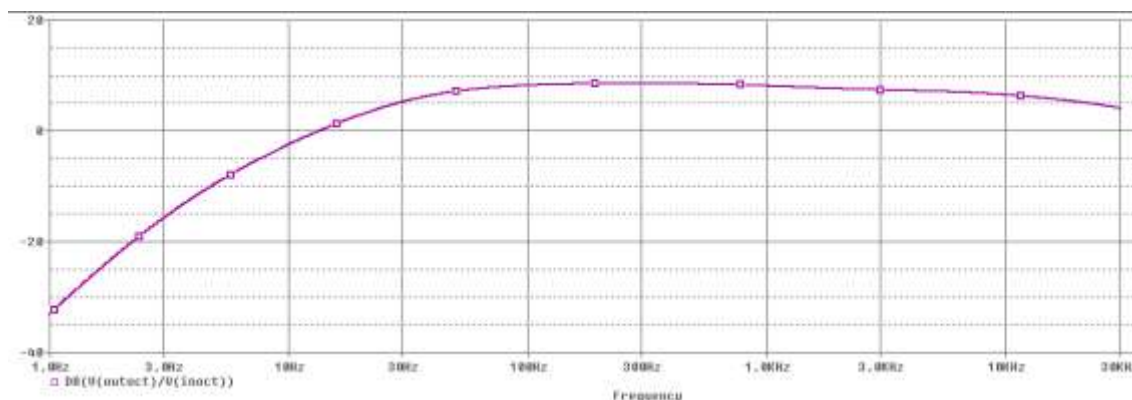
Obrázek 3-23: Vstupní a výstupní signál octaveru.



Obrázek 3-24: Srovnání výstupního signálu octaveru (zvýrazněná bleděmodrá) oproti signálu z generátoru o shodné frekvenci.

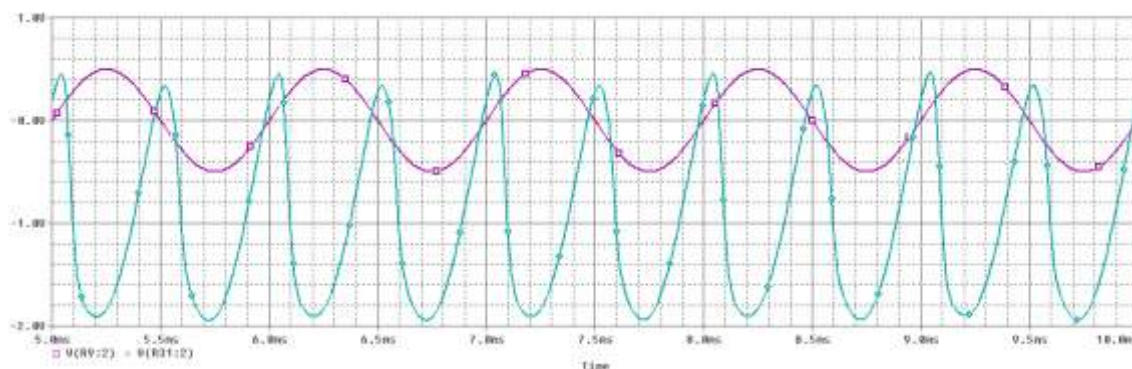
Protože impedance kondenzátoru klesá s rostoucí frekvencí, použití k diodám paralelních kondenzátorů o příliš vysoké kapacitě by zapříčinilo znehodnocení správné funkce obvodu pro vyšší frekvence.

V další fázi je nutno signál zesílit. To zajišťuje jednoduchý zesilovač s JFET tranzistorem 2SK117 v obdobném zapojení, jako v případě budiče. Frekvenční charakteristiku efektu octaver ilustruje obr. 3-25.



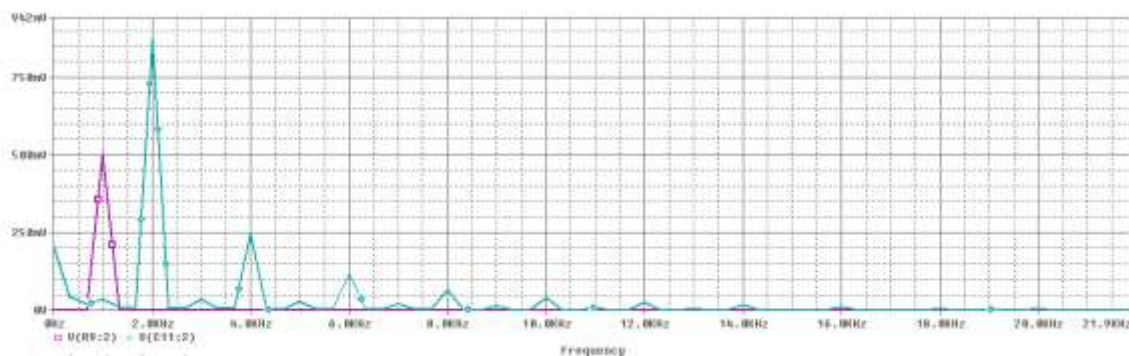
Obrázek 3-25: Modulová frekvenční charakteristika efektu octaver.

Výstup zesilovače tvoří elektroda drain, na kterou je připojen vstup horní propusti, jejíž smysl je jednak v odstranění stejnosměrné složky a jednak symetrizace signálu vzhledem k nulové úrovni. Její mezní frekvence je dle (1) 34,6 Hz, což není podstatné, protože nijak neovlivňuje frekvence produkované kytarou [15]. Pokud by byl v zapojení vynechán rezistor $R_9 = 8,2 \text{ k}\Omega$, výstupní signál by byl nesymetrický vzhledem k nulové úrovni (viz obr. 3-26).



Obrázek 3-26: Průběh vstupního a výstupního napětí při vypojení rezistoru R_9 .

Mezní frekvence následující dolní propusti je dle (1) 19,4 kHz a je v obvodu zařazena pro útlum harmonických frekvencí nad slyšitelným pásmem, které by mohly způsobit nežádoucí intermodulační zkreslení v následujících obvodech [23]. Obvod produkuje poměrně velké množství harmonických složek, což lze vidět na obr. 3-27.



Obrázek 3-27: Amplitudové spektrum vstupního a výstupního signálu.

Výstupem celého obvodu je jezdec potenciometru BLEND, kterým lze nastavovat poměr originálního signálu a signálu posunutého o oktávu výše. Tento potenciometr je kromě přepínače přemostění jediným ovládacím prvkem efektu.

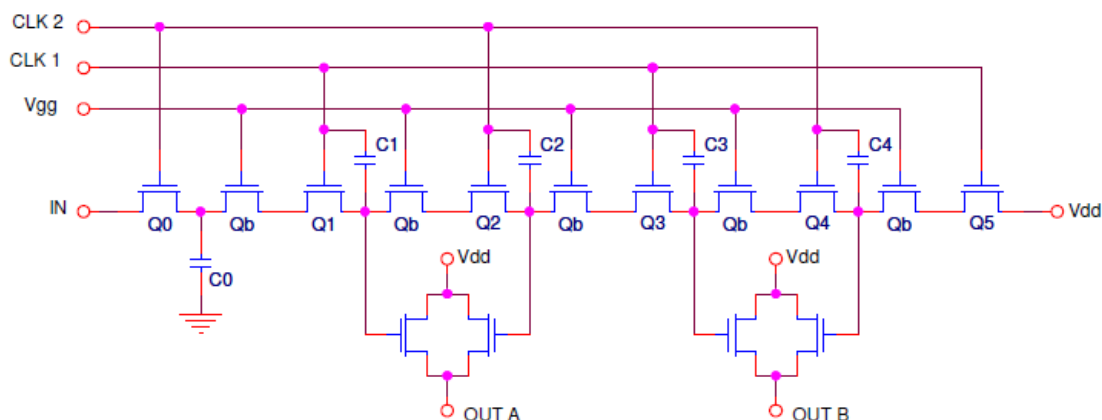
Obvod frekvenčního posuvu o oktávu výše měl být původně součástí zpětné vazby ve zpožďovací lince (viz kap. 3.5). V takovém případě by ale jeho samostatné použití nebylo možné, příp. by bylo podmíněno nepraktickým přepínáním vstupu a výstupu ze zpětné vazby zpožďovací linky do hlavní větve. Vzhledem k tomu a také k doporučenému řazení kytarových efektů [2] byl tento obvod se souhlasem vedoucího práce přesunut do hlavní větve.

3.5 Zpožďovací linka

3.5.1 Teoretický úvod

Účelem zpožďovací linky v efektu delay je vytvářet zpožděné kopie vstupního signálu a v nastavitelném poměru je s ním smíchat. Tyto kopie jsou zpožďovány o časový interval v řádu desítek až stovek ms, přičemž je možno vedle zpoždění nastavovat také počet těchto kopií. Amplituda kopií je shodná s originálem, čímž se odlišuje od efektu typu echo, u kterého amplituda kopií postupně klesá.

Analogově lze efekt delay realizovat pomocí tzv. bucket-brigade device [7], což je zpožďovací linka pracující v diskrétním čase. Sestává z unipolárních tranzistorů a kondenzátorů, přičemž signál prochází jedním kondenzátorem během každého hodinového cyklu. Schéma takové zpožďovací linky zobrazuje obr. 3-28.

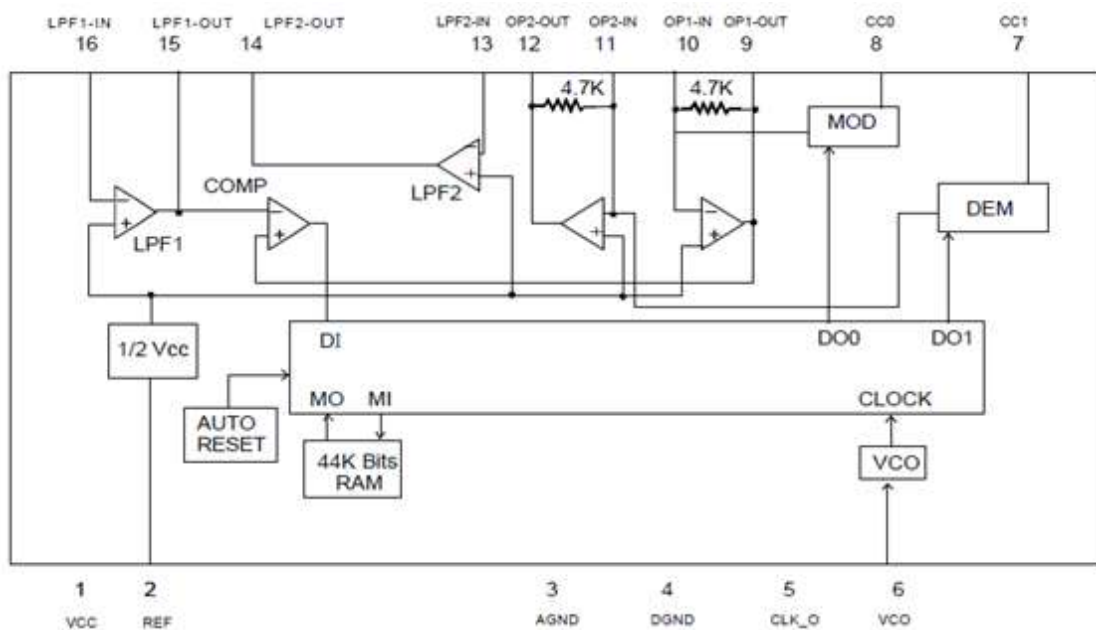


BBD Output Tapper Topology ElectroSmash.com

Obrázek 3-28: Analogová zpožďovací linka.

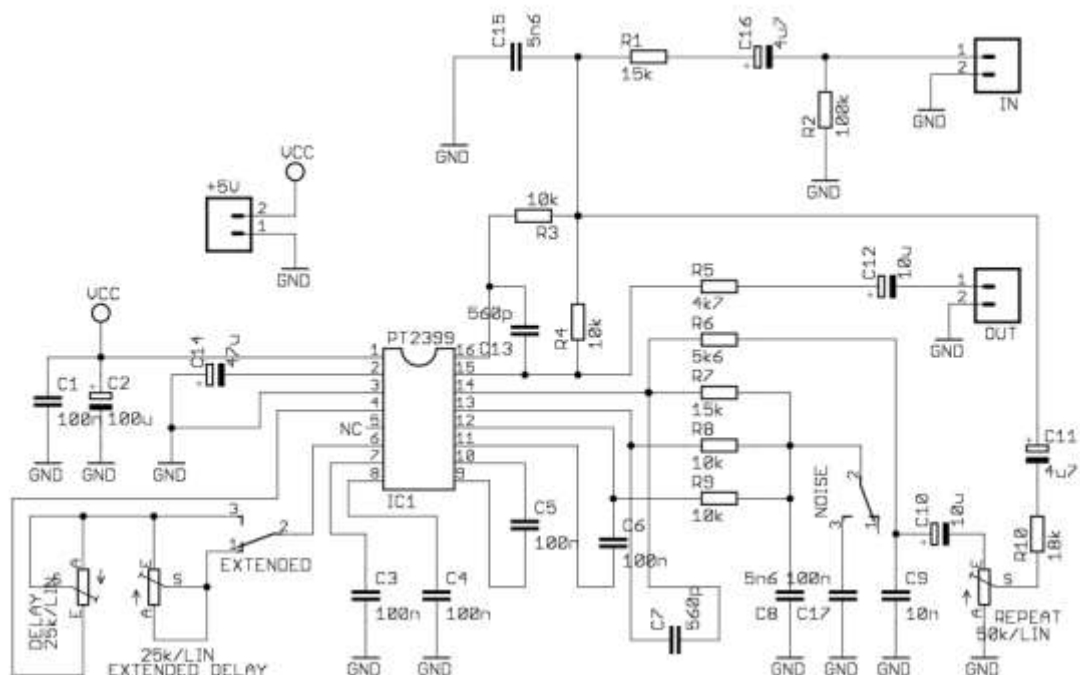
Analogové efekty delay jsou však cenově poměrně náročné [24] a jejich zapojení poměrně složitá.

Použití digitálních signálových procesorů nabízí jednodušší a levnější zapojení při zachování kvality zvuku, která sice není zpravidla porovnatelná s analogovými zpožďovacími linkami, ale je stále dostatečná pro široké spektrum uživatelů. Velmi rozšířeným audioprocesorem je PT2399, který lze nalézt ve velkém množství komerčně vyráběných efektů [5], jejichž srdcem je zpožďovací linka. Vzhledem k vnitřnímu zapojení (viz obr. 3-29) ke své funkci potřebuje minimum externích součástek. Produkovaný šum má úroveň méně než -90 dBV a harmonické zkreslení je typicky menší, než 0,5% [25]. Cena tohoto audioprocesoru se pohybuje v řádu desetikorun (v zahraničních obchodech, např. Musikding.de) [26].



Obrázek 3-29: Vnitřní zapojení audioprocesoru PT2399, převzato z katalogového listu [25].

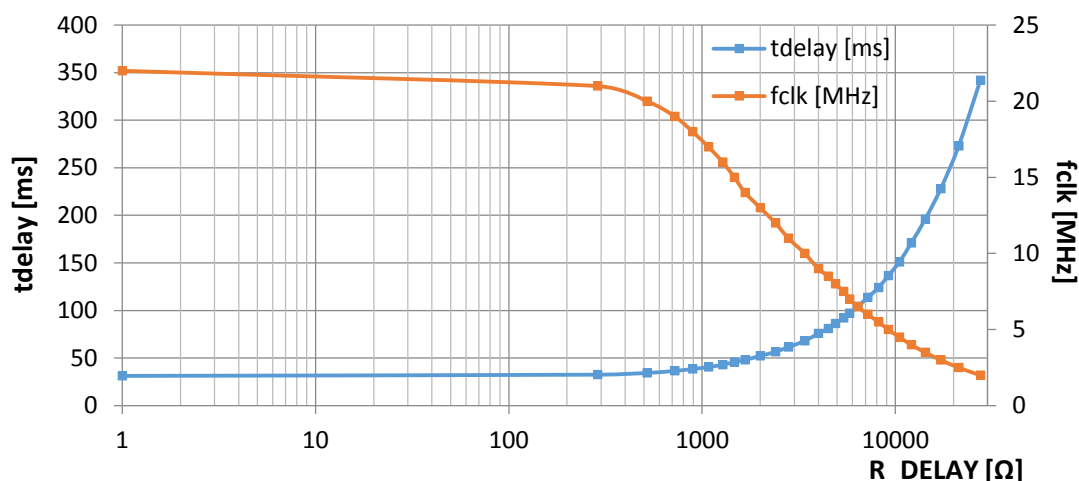
S ohledem na fakt, že pro PT2399 simulační knihovný nejsou dostupné a návrhové vztahy taktéž, bylo výsledné schéma zapojení na obr. 3-30 z velké části převzato z katalogového listu, kde je uvedeno pod názvem „PT2399 Delay application circuit“ [25] a také z oblíbeného zapojení „Rebote delay“, které je uvedeno v [5].



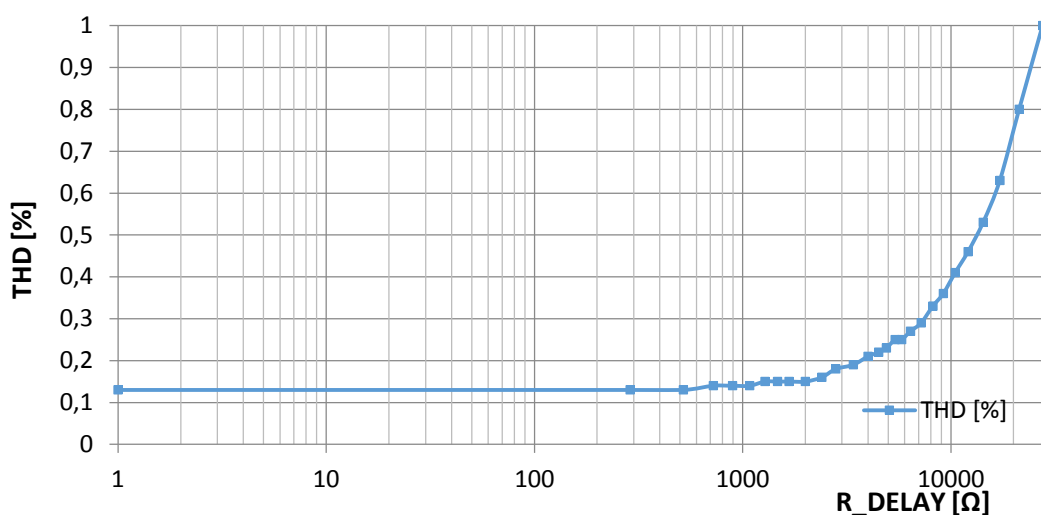
Efekt disponuje třemi potenciometry. Nejdůležitější parametr, tedy časový interval zpoždění, lze nastavit potenciometrem DELAY, příp. EXTENDED DELAY, který je připojen přes nožní přepínač EXTENDED. Smysl nastavení doby zpoždění dvěma potenciometry spočívá v tom, že je možno nastavit krátké zpoždění (např. pro zvýšení dozvuku kytary během hraní akordů) jedním potenciometrem a během hry dle potřeby zvýšit dobu zpoždění (např. při sólové hře) sériovým připojením druhého potenciometru. Celkový odpor potenciometrů DELAY a EXTENDED DELAY upravuje napětí na pinu 6, na které reaguje napětím řízený oscilátor, který generuje hodinový signál pro celý procesor. Tabulka 1 a grafické závislosti na obr. 3-31 a 3-32 znázorňují, jak se od velikosti odporu potenciometrů R_{DELAY} odvíjí ostatní parametry PT2399. Potenciometr REPEAT slouží k nastavení počtu ozvěn.

Tabulka 1: Přehled parametrů PT2399 v závislosti na odporu R_{DELAY} .

$R_{\text{DELAY}} [\Omega]$	$f_{\text{clk}} [\text{MHz}]$	$t_{\text{delay}} [\text{ms}]$	THD [%]
1	22,0	31,3	0,13
288	21,0	32,6	0,13
519	20,0	34,4	0,13
723	19,0	36,6	0,14
894	18,0	38,5	0,14
1080	17,0	40,6	0,14
1280	16,0	43,0	0,15
1470	15,0	45,8	0,15
1670	14,0	48,1	0,15
2000	13,0	52,3	0,15
2400	12,0	56,6	0,16
2800	11,0	61,6	0,18
3400	10,0	68,1	0,19
4000	9,0	75,9	0,21
4500	8,5	81,0	0,22
4900	8,0	86,3	0,23
5400	7,5	92,2	0,25
5800	7,0	97,1	0,25
6400	6,5	104,3	0,27
7200	6,0	113,7	0,29
8200	5,5	124,1	0,33
9200	5,0	136,6	0,36
10500	4,5	151,0	0,41
12100	4,0	171,0	0,46
14300	3,5	196,0	0,53
17200	3,0	228,0	0,63
21300	2,5	273,0	0,80
27600	2,0	342,0	1,00



Obrázek 3-31: Závislost klíčových parametrů PT2399 na hodnotě R_{DELAY} .

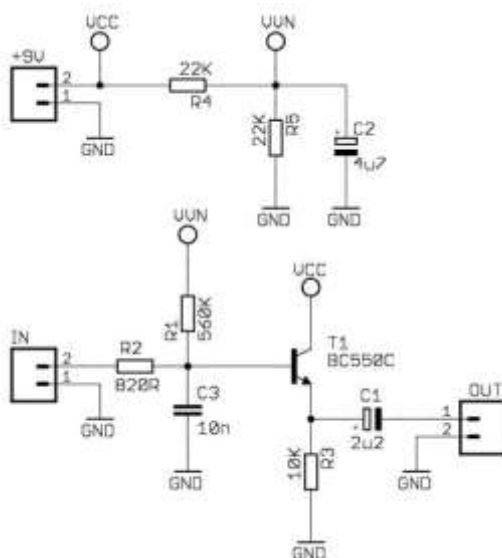


Obrázek 3-32: Závislost harmonického zkreslení na R_{DELAY} .

Procesor je napájen napětím +5 V na pin 1. To je zajišťováno stabilizátorem 7805 na desce napájecího zdroje. Na pin 2, na kterém je napětí virtuální nuly, potřebné pro nesymetricky napájené interní operační zesilovače, je připojen pouze kondenzátor 47 μF , uzemněný na analogovou zem, tedy pin 3. Pin 4 je vývod digitální země, kam se připojuje pouze jeden krajní vývod potenciometru DELAY. Jeho druhý vývod, spojený s jezdcem, je připojen (příp. spolu s potenciometrem EXTENDED DELAY) na napětím řízený oscilátor na pinu 6. Zmenšení tohoto napětí v důsledku zmenšení odporu potenciometrů DELAY a EXTENDED DELAY způsobí zmenšení doby zpoždění, zmenšení harmonického zkreslení a vzrůst frekvence hodinového signálu. Pro případné použití hodinového signálu mimo procesor je tento vyveden na pin 5, v této aplikaci ale jiné využití nemá. Piny 7 a 8 slouží pro proudové nastavení. Zbylé piny, tedy 9-16, slouží jako vstupy či výstupy interních operačních zesilovačů [25]. Externími pasivními součástkami lze jejich zapojení modifikovat na dolní propusti, integrátory apod.

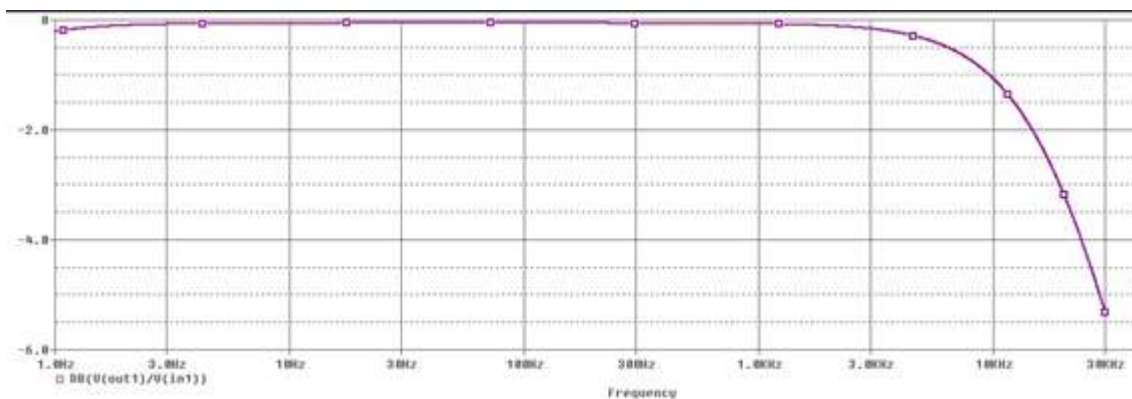
3.6 Výstupní obvod

Výstupní obvod je tvořen emitorovým sledovačem a dolní propustí. Schéma zapojení výstupního obvodu na obr. 3-33 vychází ze vstupního obvodu (viz kap. 3.1).



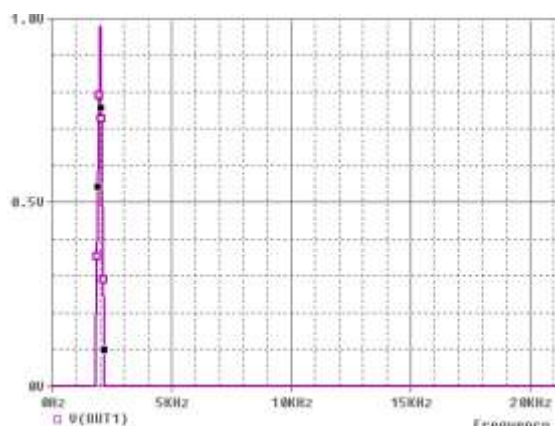
Obrázek 3-33: Schéma zapojení výstupního obvodu.

Tranzistor BC550 byl stejně jako v případě vstupního obvodu vybrán na základě dobrých šumových vlastností [17] a dostupnosti. Dolní propust složená z R_2 a C_3 zaručuje pokles přenosu o 3dB na frekvenci 19,4 kHz (viz obr. 3-34), aby bylo eliminováno riziko vzniku intermodulačního zkreslení v obvodech, které by mohly být zařazeny za efektním zesilovačem [23]. Mezní frekvence byla určena dle (1).



Obrázek 3-34: Modulová frekvenční charakteristika výstupního obvodu.

Z amplitudového spektra (viz obr. 3-35) vyplývá, že výstupní obvod do něj nevznáší harmonické složky.

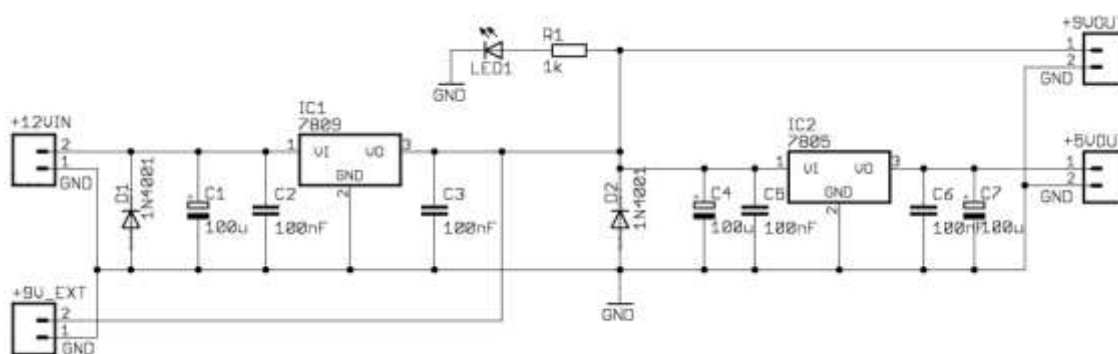


Obrázek 3-35: Amplitudové spektrum výstupního obvodu pro $f = 2,5$ kHz.

Výstupní obvod má nízkou výstupní impedanci [16], zaručuje tedy bezproblémové napájení výstupního kabelu, kterým lze zařadit do elektroakustického řetězce nástrojový zesilovač (pro výkonové zesílení a následnou reprodukci), sluchátka, další efekty, příp. externí zvukovou kartu.

3.7 Napájecí zdroj

Jednotlivé obvody v efektovému zesilovači jsou navrženy na napájení obvyklým napětím, tedy +9 V. Procesor PT2399 ve zpožďovací lince vyžaduje napájení +5 V. Předpokládané napájení zdroje je z 12 V adaptéru či akumulátoru. Z těchto důvodů je napájecí zdroj tvořen dvěma stabilizátory, a to 7809 a 7805. Navržené schéma zapojení napájecího zdroje je na obr. 3-36.



Obrázek 3-36: Schéma zapojení napájecího zdroje.

Pro menší výkonovou ztrátu je stabilizátor 7805 napájen z výstupu stabilizátoru 7809. Každý ze stabilizátorů je chráněn usměrňovací diodou proti přepólování, keramickými kondenzátory o kapacitě 100 nF proti rozkmitání a elektrolytickými kondenzátory o kapacitě 100 μ F pro filtraci případných rušivých složek a kompenzaci možného zvlnění napětí. Napětíové děliče pro vytvoření potenciálu virtuální nuly jsou součástí jednotlivých obvodů.

4 REALIZACE A MĚŘENÍ

Desky plošných spojů jednotlivých obvodů byly navrženy v programu EAGLE. Při návrhu byla respektována zejména tato kritéria, která s rezervou odpovídají požadavkům na výrobu DPS v dílně UREL:

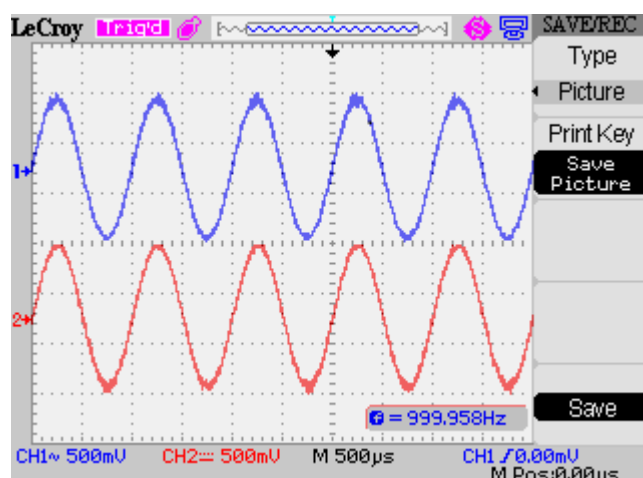
- minimální šířka spoje 0,6 mm (využito pouze v nutných oblastech, jako např. spoje vedené pod integrovanými obvody, jinak 0,8 mm)
- minimální šířka mezery mezi spoji 0,6 mm
- minimální odstup od polygonu 0,8 mm
- minimální průměr vrtaného otvoru 0,8 mm

Všechny desky plošných spojů byly navrženy s ohledem na využití plochy i na bezproblémové osazení. Vodivé motivy jednotlivých desek byly vytisknuty pomocí laserové tiskárny na pauzovací papíry, nažehleny na cuprexit a následně vyleptány. Po vyleptání následovalo rozstříhání cuprexitu na jednotlivé desky, vyvrtání otvorů pro součástky a montáž a konečně ošetření vodivého motivu pájitelným lakem.

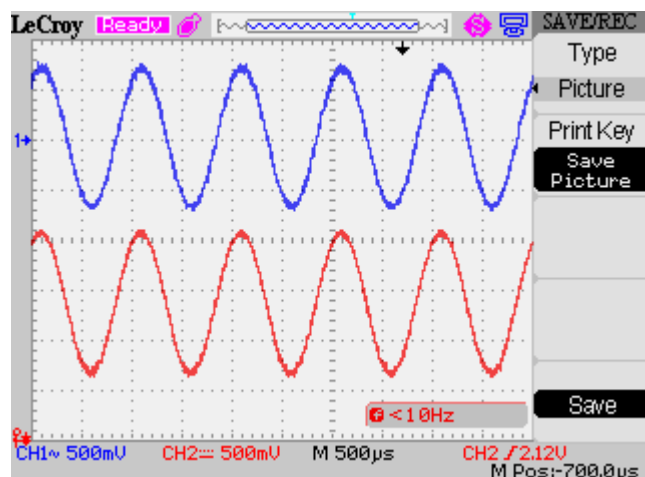
Celý efektový zesilovač je realizován modulárním způsobem, tj. každý jednotlivý obvod má svou vlastní desku plošných spojů. Oproti jedné velké desce je toto řešení praktičtější z hlediska případných pozdějších zásahů do zapojení, příp. výměny celého obvodu. Oživení jednotlivých desek, s výjimkou zpožďovací linky (viz kap. 4.5), s sebou neneslo žádné potíže.

4.1 Vstupní a výstupní obvod

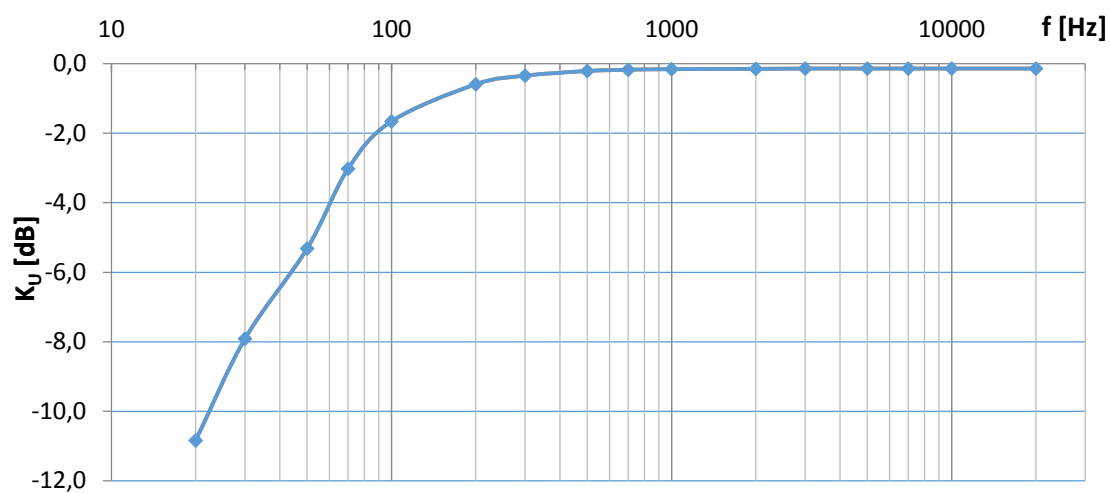
Vstupní obvod jako horní propust a výstupní obvod jako dolní propust mají zajistit vysokou vstupní a nízkou výstupní impedanci, nezkrslit procházející signál a potlačit frekvence nižší než 70 Hz a vyšší než 20 kHz. Z časových průběhů (viz obr. 4-1 a 4-2) a modulových frekvenčních charakteristik (viz obr. 4-3 a 4-4) je zřejmá správná funkčnost těchto obvodů.



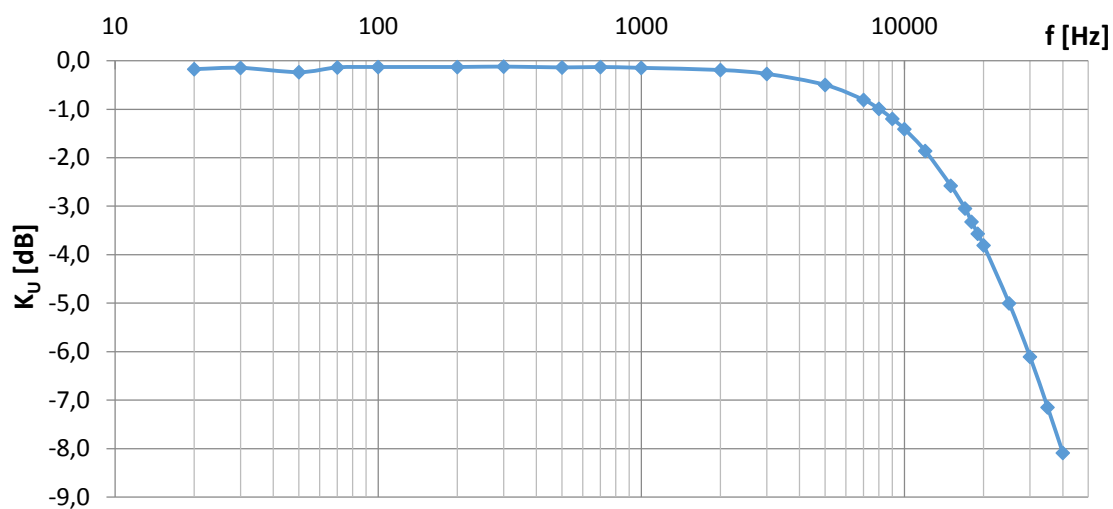
Obrázek 4-1: Vstupní (červená) a výstupní (modrá) signál vstupního obvodu.



Obrázek 4-2: Vstupní (červená) a výstupní (modrá) signál výstupního obvodu.



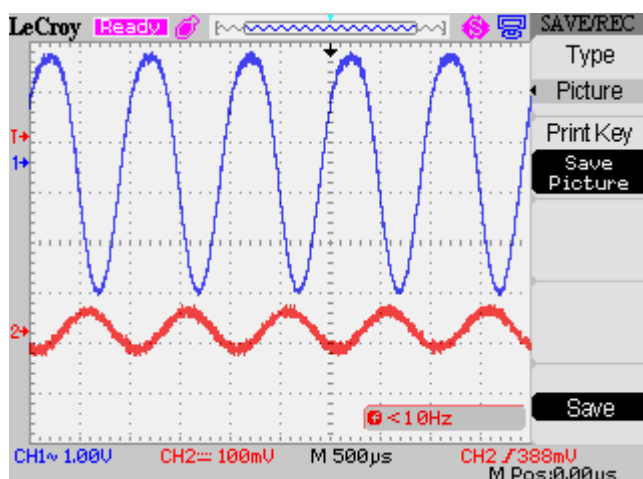
Obrázek 4-3: Změřená modulová frekvenční charakteristika vstupního obvodu.



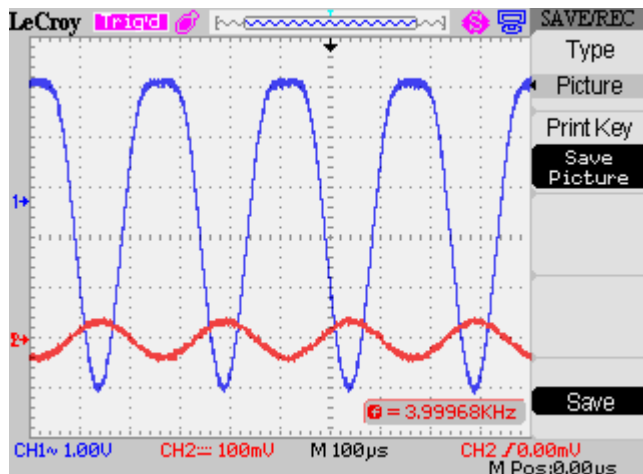
Obrázek 4-4: Změřená modulová frekvenční charakteristika výstupního obvodu.

4.2 Budič

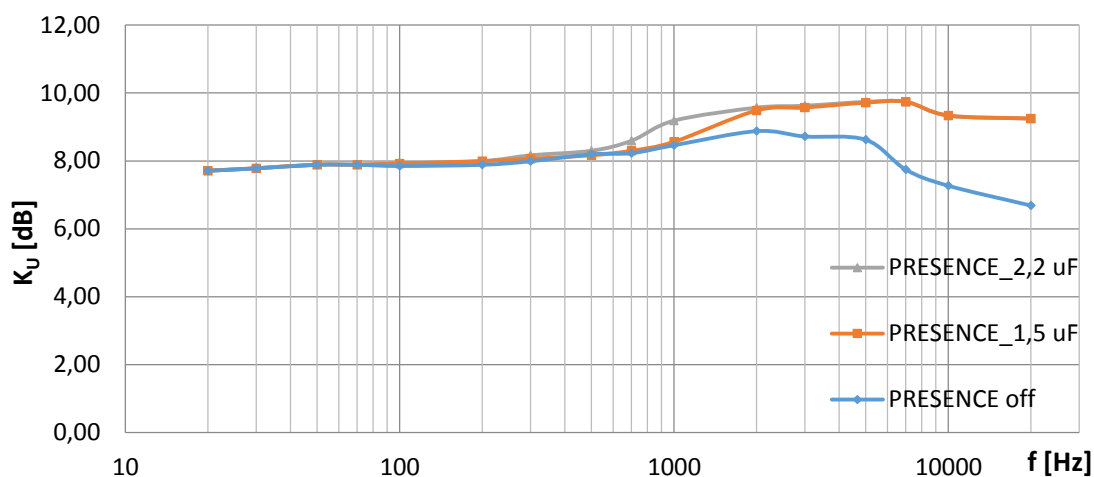
Časový průběh signálu procházejícího budičem lze vidět na obr. 4-5 a 4-6, kde je zřetelně vidět, jak se signál (zde o frekvenci $f = 4$ kHz) zesílí a mírně zkreslí při připojení kondenzátoru C_p spínačem PRESENCE. Při zvukovém testu bylo zjištěno, že použití kondenzátoru $C_p = 1,5 \mu\text{F}$ nemá až tak výrazný vliv na výsledný zvuk (resp. pouze na malou část kytarou produkovaných frekvencí), což mělo být vzhledem k simulované frekvenční charakteristice (viz kap. 3.2.2) a znalosti frekvencí produkovaných kytarou [15] předpokládáno. Proto byl kondenzátor nahrazen hodnotou $C_p = 2,2 \mu\text{F}$, čímž bylo dosaženo úpravy frekvenční charakteristiky do praktičtější podoby, viz obr. 4-7.



Obrázek 4-5: Vstupní (červená) a výstupní (modrá) signál budiče s rozepnutým spínačem PRESENCE.



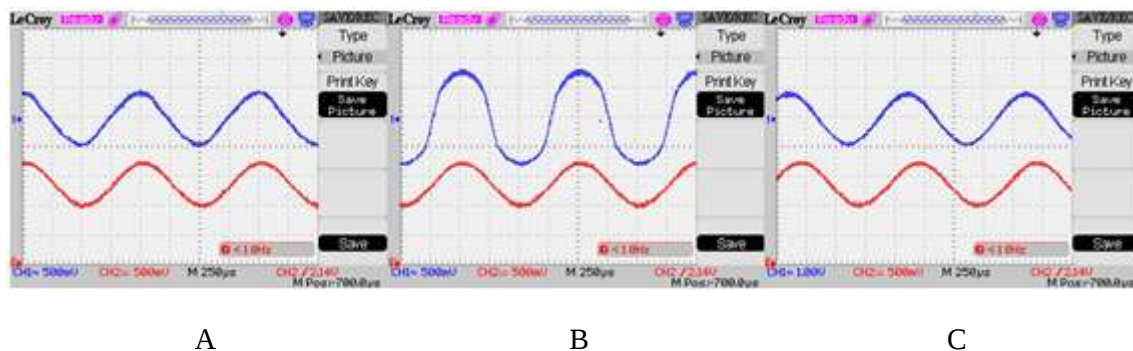
Obrázek 4-6: Vstupní (červená) a výstupní (modrá) signál budiče se sepnutým spínačem PRESENCE.



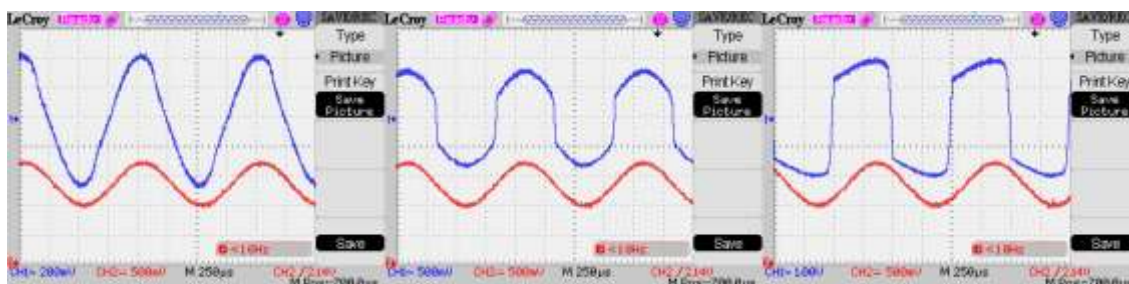
Obrázek 4-7: Změřená modulová frekvenční charakteristika budiče.

4.3 Zkreslující a nezkreslující zesilovač

Zkreslující zesilovač byl změřen a zvukově testován s diodami germaniovými (D9E, $U_p = 0,45$ V), křemíkovými (1N4148, $U_p = 0,7$ V) a LED (červená, $U_p = 1,8$ V). Tónová clona TONE byla stažena na minimum ($f_m = 19,4$ kHz) a výstupní úroveň (LEVEL) nastavena na maximum. Následující obrázky (4-8 až 4-11) ukazují, jak se s kterými diodovými okrajovači mění tvar a velikost výstupního signálu při různém nastavení potenciometrů DRIVE (zkreslení), WRAP (asymetrie zkreslení) a FREQ (úprava frekvenční charakteristiky zkreslovacího bloku).



Obrázek 4-8: Vstupní (červená) a výstupní (modrá) signál zkreslujícího zesilovače při nastavení DRIVE, WRAP a FREQ na minimum, A-Ge, B-Si a C-LED.



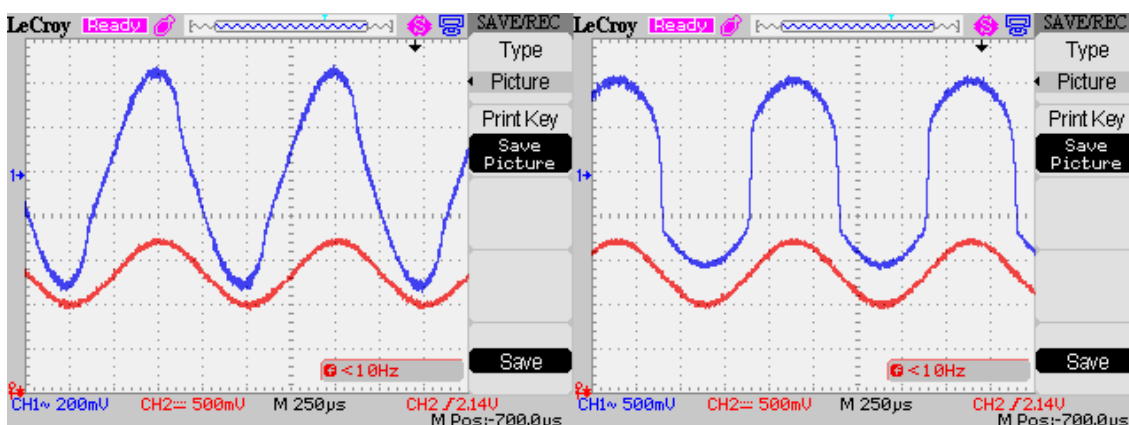
A

B

C

Obrázek 4-9: Vstupní (červená) a výstupní (modrá) signál zkreslujícího zesilovače při nastavení DRIVE na maximum, WRAP a FREQ na minimum, A-Ge, B-Si a C-LED.

Při zkoušce asymetrie zkreslení (WRAP) byly testovány pouze germaniové a křemíkové diody, jelikož s LED do hlavního okrajovače počítáno nebylo. Na levé části (A) obr. 4-14 lze jasně vidět, že spodní půlvlna má větší amplitudu než horní půlvlna. Při použití křemíkových diod není asymetrie zkreslení na výstupním průběhu patrná, navzdory tomu šlo jistý zvukový rozdíl pozorovat.

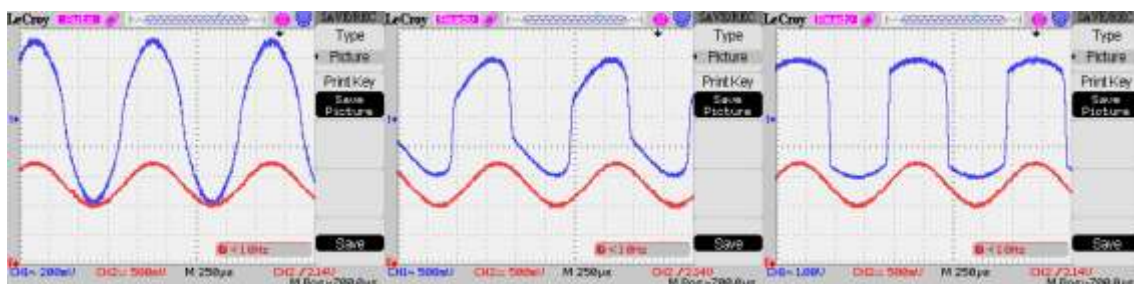


A

B

Obrázek 4-10: Vstupní (červená) a výstupní (modrá) signál zkreslujícího zesilovače při nastavení DRIVE a WRAP na maximum, FREQ na minimum, A-Ge, B-Si.

Další průběhy (viz obr. 4-15) ilustrují tvar výstupního signálu při všech třech rozmítaných potenciometrech, tedy DRIVE, WRAP a FREQ, nastavených na maximum. Na LED nemá potenciometr WRAP žádný vliv, protože tyto jsou zapojeny ve vedlejším diodovém okrajovači, viz kap. 3.3.2.



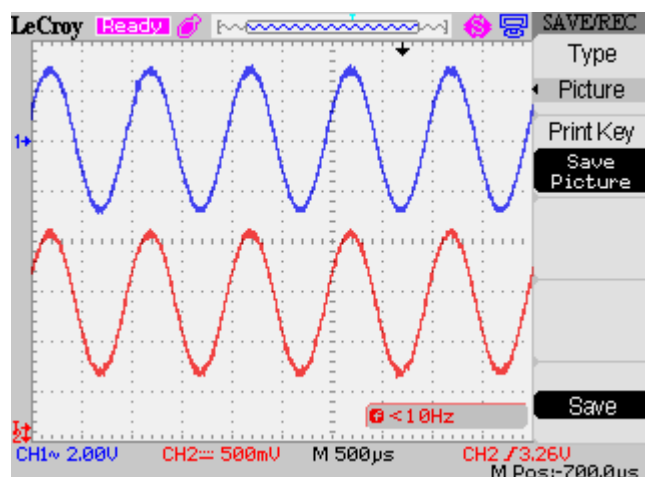
A

B

C

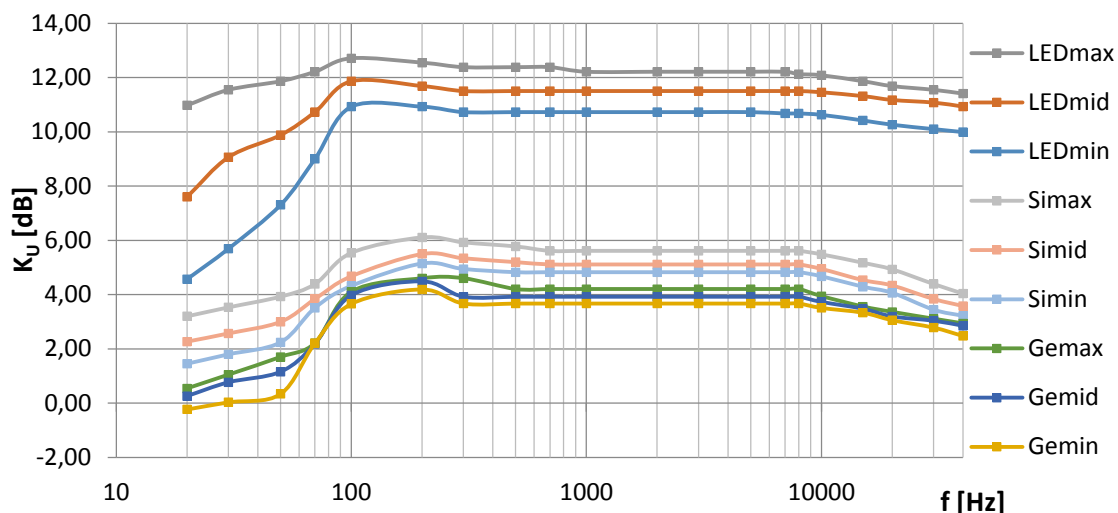
Obrázek 4-11: Vstupní (červená) a výstupní (modrá) signál zkreslujícího zesilovače při nastavení DRIVE, WRAP a FREQ na maximum, zleva A-Ge, B-Si a C-LED.

Poslední průběhy (viz obr. 4-12) se týkají nezkreslujícího zesilovače, jehož úkolem je pouze odstranit rozdíly v hlasitosti při potřebě nezkresleného zvuku (přepnutí signálové cesty ze zkreslujícího zesilovače na nezkreslující).



Obrázek 4-12: Vstupní (červená) a výstupní (modrá) signál nezkreslujícího zesilovače.

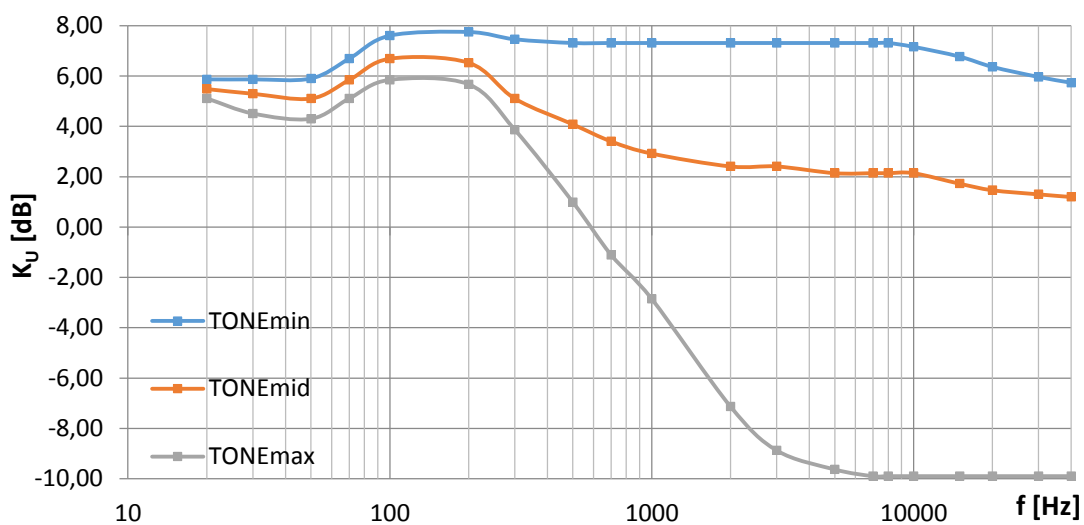
Měření ukázalo, že velikost prahového napětí diod použitých v okrajovači má zásadní vliv na velikost zesílení, jak ukazuje obr. 4-13.



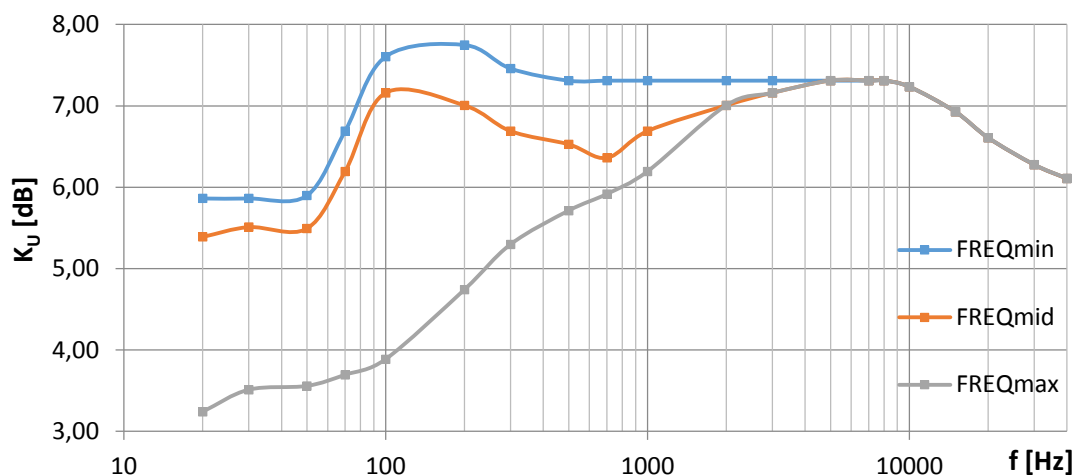
Obrázek 4-13: Modulová frekvenční charakteristika zkreslujícího zesilovače při použití diod s různým prahovým napětím (LED 2,0 V, Si 0,7 V, Ge 0,45 V) pro 3 polohy potenciometru DRIVE.

S diodami OA1182 ($U_p = 0,3$ V) byl výstupní signál velmi slabý a zkreslení stěží patrné jen při maximálním vytočení potenciometru DRIVE. Evidentně z tohoto důvodu bývá zařazen za operačním zesilovačem s okrajovačem ve zpětné vazbě (zkreslovacím blokem) ještě jeden operační zesilovač v jednom z triviálních zapojení (invertující/neinvertující zesilovač). Při použití diod D9E ($U_p = 0,45$ V) je již výstupní signál silnější a harmonicky bohatší. Proto byly tyto diody vybrány do hlavního okrajovače. Namísto původně zamýšlených LED byly do vedlejšího okrajovače vybrány křemíkové diody 1N4148 ($U_p = 0,7$ V). Důvodem jest subjektivně lepší využitelnost v žánru alternative rock, pro který je tento efektový zesilovač primárně navržen.

Další modulové frekvenční charakteristiky byly měřeny pro rozmítání potenciometrů TONE (viz obr. 4-14) a FREQ (viz obr. 4-15).

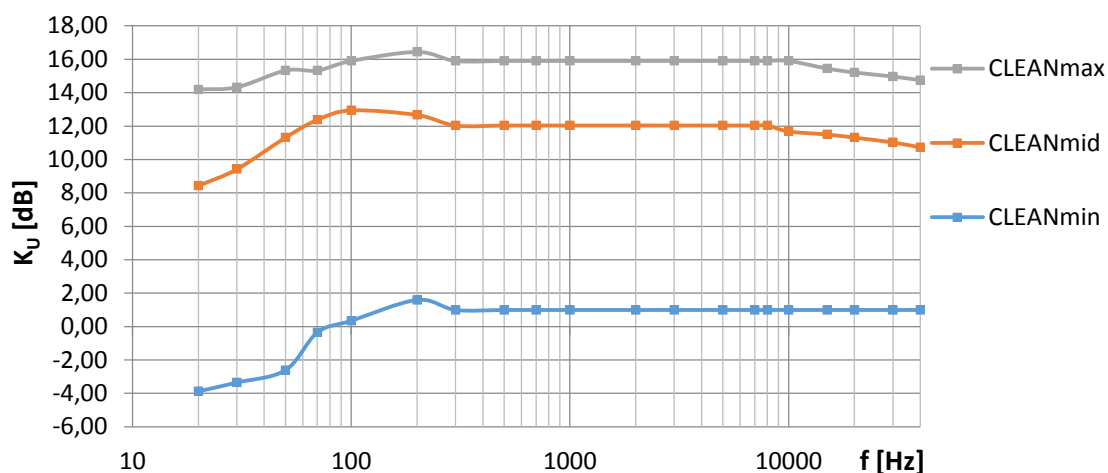


Obrázek 4-14: Změřená modulová frekvenční charakteristika zkreslujícího zesilovače při rozmítání potenciometru TONE.



Obrázek 4-15: Změřená modulová frekvenční charakteristika zkreslujícího zesilovače při rozmítání potenciometru FREQ.

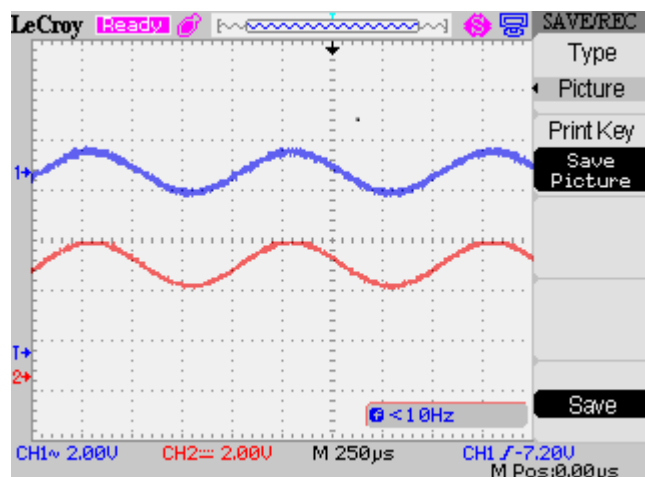
Poslední měřenou modulovou frekvenční charakteristikou na této desce bylo rozmítání potenciometru CLEAN, viz obr. 4-11.



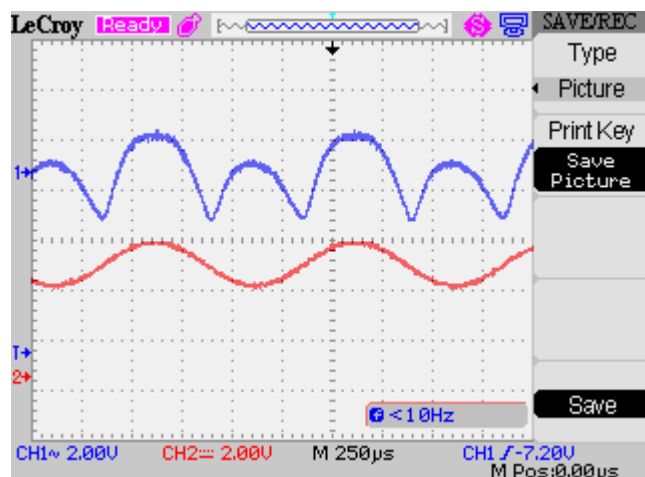
Obrázek 4-16: Změřená modulová frekvenční charakteristika nezkreslujícího zesilovače.

4.4 Posuv frekvence o oktávu výše

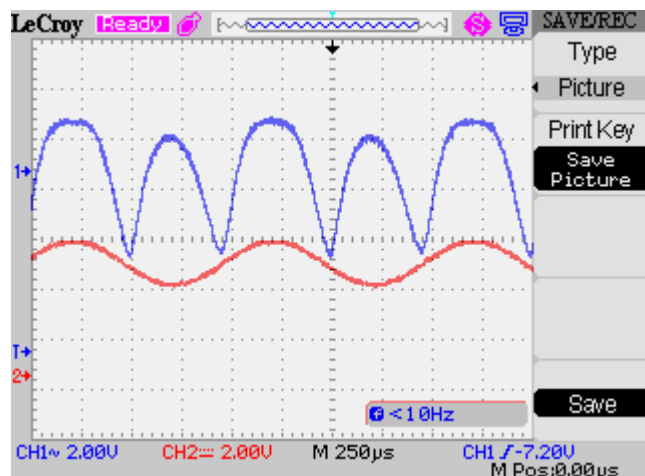
Od tohoto tzv. octaveru byla očekávána schopnost zdvojnásobit frekvenci vstupního signálu a z principu funkce i jeho zkreslení. Obr. 4-17 až 4-19 ukazují, jak se mění výstupní signál oproti vstupnímu při rozmítání potenciometru BLEND, obr. 4-20 pak frekvenční charakteristiku obvodu.



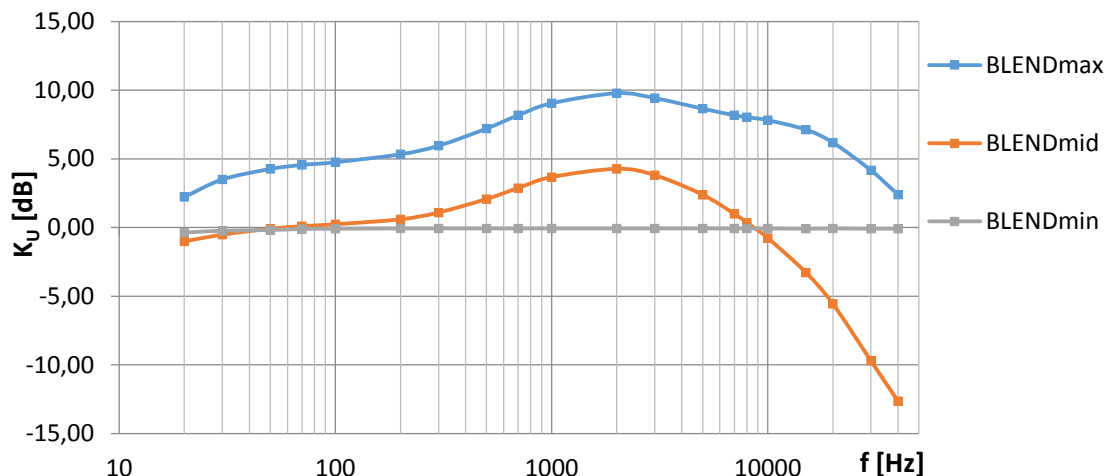
Obrázek 4-17: Vstupní (červená) a výstupní (modrá) signál obvodu octaver při nastavení potenciometru BLEND na minimum.



Obrázek 4-18: Vstupní (červená) a výstupní (modrá) signál obvodu octaver při nastavení potenciometru BLEND na střed.



Obrázek 4-19: Vstupní (červená) a výstupní (modrá) signál obvodu octaver při nastavení potenciometru BLEND na maximum.



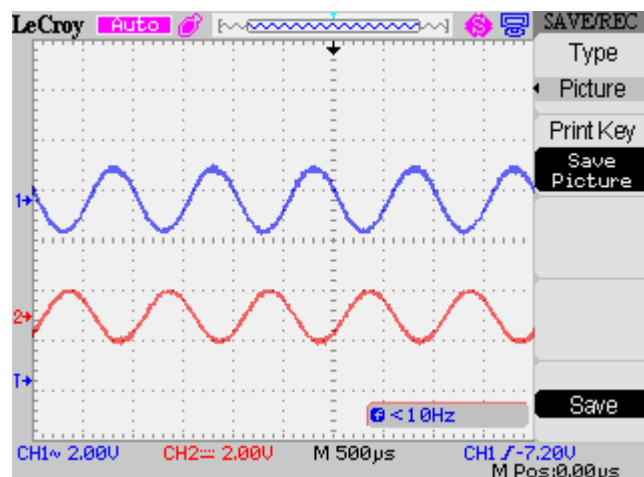
Obrázek 4-20: Změřená modulová frekvenční charakteristika obvodu octaver.

4.5 Zpožďovací linka

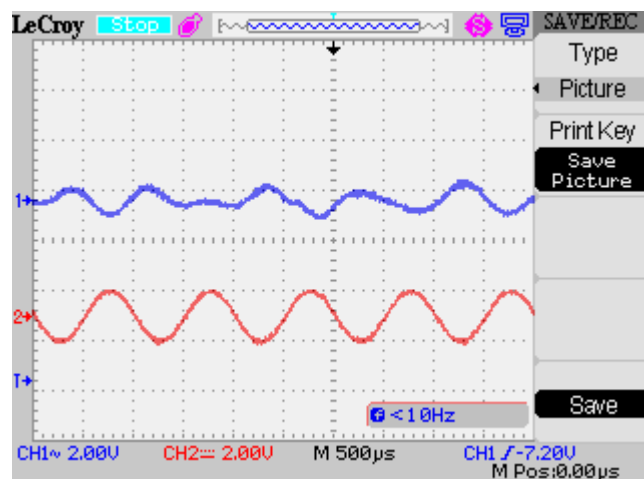
Tento obvod byl jediný, jehož oživení s sebou neslo jisté problémy. V první fázi vůbec nereagoval na vstupní signál, otáčení potenciometrů způsobovalo zpětnou vazbu a procesor PT2399 se zahříval. Měření ukázalo, že tento odebírá z 5 V zdroje 118 mA. Studium konvenčních schémat s procesorem PT2399 bylo zjištěno, že vývody 3 a 4 (analogová a digitální zem) bývají propojeny a signál je před přivedením do procesoru zesílen operačním zesilovačem či jednostupňovým tranzistorovým zesilovačem. Vývody 3 a 4 byly tedy propojeny, procesor se přestal zahřívat a jeho proudový odběr klesl na 31 mA.

Dále byl jako hlavní příčina nefunkčnosti řešen slabý vstupní signál. Vstupní uzemněný rezistor $R = 100 \text{ k}\Omega$ byl nahrazen hodnotou $R = 2,2 \text{ M}\Omega$ a obvod byl vyzkoušen s předřazeným nezkreslujícím zesilovačem (OZ v neinvertujícím zapojení). Tyto úpravy vedly k částečné funkčnosti obvodu a jediným problémem zůstávala zpětná vazba při vytočení potenciometru REPEAT o více než cca 20 %. Částečně pomohlo snížení kapacity kondenzátorů C_{10} a C_{11} , problém však byl definitivně vyřešen až razantním snížením kapacity kondenzátoru C_8 z 330 nF na 5,6 nF. Pozoruhodné je, že zmíněná hodnota $C_8 = 330 \text{ nF}$ pochází právě z doporučeného schématu v katalogovém listu. Protože nastavení potenciometru REPEAT na mezi stability vytváří subjektivně zajímavý zvuk, byl k ovládacím prvkům přidán spínač NOISE, který paralelně připojí ke kondenzátoru $C_8 = 5,6 \text{ nF}$ kondenzátor $C_{17} = 100 \text{ nF}$.

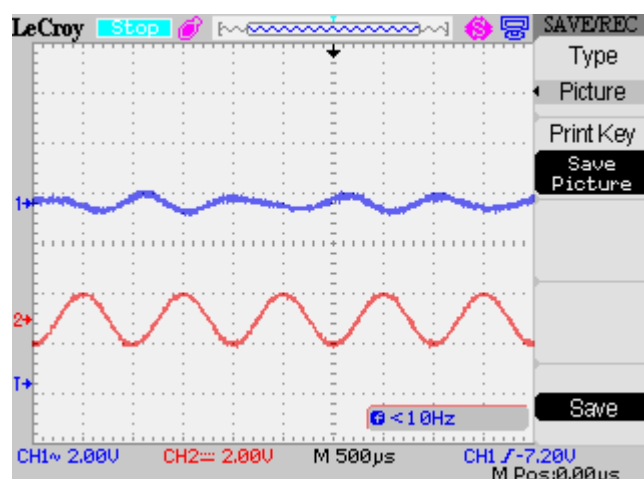
Zobrazení vstupního a výstupního průběhu signálu zpožďovací linky nemělo valnou výpovědní hodnotu. Výstupní signál je oproti vstupnímu fázově posunut o 180° (viz obr. 4-21). S otáčením potenciometru REPEAT se, jak bylo předpokládáno, mění amplituda výstupního signálu. Změna časového intervalu zpoždění (potenciometry DELAY a EXTENDED) vyvolá v obvodu přechodný děj, při kterém se na necelou 1 s rozvlní výstupní sinusoida. Tento přechodný děj se na osciloskopu podařilo částečně zachytit funkcí RUN-STOP (viz obr. 4-22 a 4-23).



Obrázek 4-21: Vstupní (červená) a výstupní (modrá) signál zpožďovací linky.



Obrázek 4-22: Rozvlnění výstupní sinusoidy (modrá) zpožďovací linky při změně zpoždění (1. část).



Obrázek 4-23: Rozvlnění výstupní sinusoidy (modrá) zpožďovací linky při změně zpoždění (2. část).

4.6 Konečné provedení efektového zesilovače

Celý zesilovač je umístěn do vlastnoručně vyrobené přístrojové krabičky o vnějších rozměrech 320x165x50 mm, která sestává ze dvou U-profilů z hliníkového plechu o síle 1,5 mm, což má výhodu jednak ve stínění a jednak v mechanické odolnosti, která je velmi důležitá vzhledem k ovládání nožními přepínači. Tyto profily byly následně sešroubovány skrze čtyři sloupky, resp. čtyřhranné hliníkové tyče o příčném průřezu 8x8 mm. Povrchová úprava krabičky byla provedena pískováním a následným práškovým lakováním v odstínu RAL 9003 v profesionální lakovně. Ovládací a indikační prvky jsou umístěny na horní straně, konektory na zadní straně a spolu s deskami plošných spojů jsou všechny umístěny na horním U-profilu, což usnadňuje montáž a umožňuje používat vodiče o nezbytné délce. Popisky ovládacích prvků byly vytištěny laserovou tiskárnou na samolepící fólii. Spodní U-profil slouží pouze jako kryt.

Během realizace projektu došlo k jistým návrhovým změnám, které byly provedeny s cílem zlepšit využitelnost a zajistit správnou funkčnost jednotlivých efektů. Změny spočívaly jednak v úpravě jmenovitých hodnot některých pasivních součástek, které byly již popsány a jednak v přidání jistých ovládacích prvků, jako je spínač NOISE (viz kap. 4.5) a přepínač MOD FX.

Přepínač MOD FX slouží k přepnutí signálové cesty z výstupu obvodu frekvenčního posuvu audio signálu o oktávu výše na výstupní konektor SEND, kam lze připojit vstup smyčky dalších modulačních efektů, jako např. tremolo (viz kap. 2.5.2) či chorus (viz kap. 2.7.1). Výstup této efektové smyčky se pak připojí na konektor RETURN, odkud signál vede na vstup zpožďovací linky či do výstupního obvodu (dle stavu nožního přepínače DELAY). Přepínač MOD FX tedy umožňuje použít efektový zesilovač v kombinaci s modulačními efekty, které se zapojují mezi zkreslení a zpožďovací linku, která musí být v řetězci efektů jako poslední [2].

Naproti tomu, jeden ovládací prvek byl z efektového zesilovače vyřazen, a to přepínač S_1 , kterým mělo být možno volit napájení efektového zesilovače 9 V baterií či 12 VDC adaptérem. Důvod vyřazení je ten, že 9 V baterie by stačila na napájení zesilovače pouze na poměrně omezenou dobu. Větší uplatnění (při napájení efektového zesilovače 12 VDC adaptérem) najde 9 V konektor při napájení efektů např. právě ve zmiňované efektové smyčce. Pokud by přece jen vyvstala potřeba napájet efektový zesilovač elektrochemickým zdrojem, je možné použít např. tříčlánkové Li-Pol akumulátory, na jejichž svorkách je v plně nabitém stavu napětí asi 12,6 V a které disponují kapacitou obvykle v jednotkách Ah.

5 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout tranzistorový zesilovač pro elektrickou kytaru, který by obsahoval filtr typu horní propust, booster (budič), overdrive (zkreslující zesilovač), zpožďovací linku s možností frekvenčního posuvu audio signálu o oktávu výše a napájecí zdroj pro tyto dílčí obvody. Dle uvážení měla být využita moderní součástková základna i alternativní obvodové prvky. Při návrhu měly být použity dostupné simulační modely.

V prvních dvou částech práce byly popsány teoretické základy funkce kytarových efektů. V třetí části byl popsán důvod výběru jednotlivých kytarových efektů, návrh jejich zapojení a simulace v prostředí OrCAD PSpice. V případě každého navrhovaného efektu byly v teoretickém úvodu nastíněny možnosti jeho realizace a v popisu zapojení popsán princip funkce. Správnou funkci obvodů v signálové cestě dokazují simulace v časové i frekvenční oblasti. Výjimku tvoří zpožďovací linka, pro jejíž klíčovou součástku, tedy audioprocesor PT2399, nejsou simulační modely dostupné. Schéma zapojení tedy bylo převzato z katalogového listu a doplněno o ovládací prvky s využitím citovaných zdrojů. Obvod frekvenčního posuvu o oktávu výše měl být původně součástí zpětné vazby ve zpožďovací lince, avšak z důvodů popsanych v závěru kap. 3.4.2 byl tento se souhlasem vedoucího práce přesunut do hlavní větve. Za alternativní obvodové prvky lze považovat germaniové diody D9E, které byly použity v hlavním okrajovači zkreslujícího zesilovače (overdrive). Prvkem moderní součástkové základny je např. zmíněný audioprocesor PT2399. Napájecí zdroj, který sestává ze stabilizátorů 7809 a 7805, byl navržen s ohledem na obvyklé napájení jednotlivých obvodů nesymetrickým napětím +9 V a +5 V. Je napájen síťovým adaptérem 12 VDC/1A, chráněn proti přepólování a má vyveden výstupní 9 V konektor pro napájení externích efektů, které lze zapojit do efektové smyčky mezi obvod frekvenčního posuvu audio signálu o oktávu výše a zpožďovací linku. Vstupní obvod efektového zesilovače obsahuje horní propust a emitorový sledovač pro vysokou vstupní a nízkou výstupní impedanci, výstupní obvod je tvořen dolní propustí a také emitorovým sledovačem. Práce tedy byla splněna nad rámec zadání.

Efektový zesilovač byl navržen pro využití zejména v alternativní rockové hudbě. Umožňuje zesílit a zkreslit signál ze snímačů elektrické kytary dle požadavků různých hudebních žánrů, tedy malou a střední mírou, v případě použití budiče i velkou mírou, což je využíváno především v sólové hře. V té může být také využita možnost frekvenčního posuvu audio signálu o oktávu výše, což harmonicky obohacuje výsledný zvuk. Zpožďovací linka může být v případě nastavení zpoždění v řádu desítek ms využita pro prodloužení přirozeného dozvuku elektrické kytary. Zpoždění lze nastavit až na vysoké stovky ms, čímž lze v kombinaci s nastavením více repetitivním hraním např. rozložených akordů při malém zkreslení dosáhnout zajímavých hudebních variací, které v hudebním žánru alternative rock nachází uplatnění. Každý z efektů lze přemostit nožním přepínačem a okamžitě tak odstranit jeho vliv na procházející signál (zkreslující zesilovač je přepínán na nezkreslující z důvodu eliminace rozdílů v hlasitosti).

Množství ovládacích prvků je poměrně velké (zejména u zkreslujícího zesilovače), každý z nich však má své opodstatnění. U budiče lze potenciometrem BOOST ovládat míru vybudování tranzistoru, tedy úroveň přebudování obvodů, které následují v signálové cestě. Spínačem PRESENCE lze upravit frekvenční charakteristiku tak, aby byly vyšší frekvence zesilovány více než nižší. U zkreslujícího zesilovače lze nastavit míru

zkreslení potenciometrem DRIVE, míru asymetrie zkreslení potenciometrem WRAP, frekvenční charakteristiku operačního zesilovače (pro rozdílné zkreslení nízkých a vysokých frekvencí) potenciometrem FREQ, požadovaný diodový okrajovač přepínačem Ge/Si, mezní frekvenci tónové clony potenciometrem TONE a velikost výstupní úrovně potenciometrem LEVEL. Při potřebě nezkresleného zvuku lze signálovou cestu přepnout na nezkreslující zesilovač, čímž nevzniká nežádoucí rozdíl v hlasitosti. Velikost výstupní úrovně nezkreslujícího zesilovače je nastavitelná potenciometrem CLEAN. Obvod frekvenčního posuvu o oktávu výše umožňuje nastavit poměr originálního a upraveného signálu potenciometrem BLEND. Zpožďovací linka disponuje zdvojeným ovládáním doby zpoždění potenciometry DELAY a EXTENDED, přičemž potenciometr EXTENDED je možné stejnojmenným nožním spínačem sériově předřadit potenciometru DELAY, ovládáním počtu repetící potenciometrem REPEAT a uvedením obvodu na mez stability spínačem NOISE při současném vhodném nastavení potenciometru REPEAT. Zařazení každého efektu do signálové cesty je indikováno příslušnou LED.

Pro větší využitelnost je možno použít k efektovému zesilovači i externí efekty (např. pro modulaci úrovně hlasitosti, výšky tónu apod.), jejichž vstup (příp. vstup celé smyčky) je připojen na konektor SEND a výstup na konektor RETURN. Smyčka externích modulačních efektů je zařazena do signálové cesty přepínačem MOD FX a může být napájena z 9 V konektoru, který je vyveden ze zdroje.

Zvukovými ukázkami i měřením byla ověřena funkčnost jednotlivých efektů. Součástí této práce je i CD s demonstračními nahrávkami. Náklady na veškerý materiál pro výrobu efektového zesilovače byly přibližně 2500 Kč, což zahrnuje jak elektronické součástky vč. nadbytečných pro testování různých jmenovitých hodnot, tak i mechanické spínací prvky, kabeláž, konektory, materiál na výrobu přístrojové krabičky, práškové lakování, poštovné apod. Tyto náklady by bylo možné významně snížit použitím levnějších součástek, které však mají horší šumové parametry a teplotní závislost, větší ekvivalentní sériový odpor, menší životnost apod.

Nedostatkem vyrobeného efektového zesilovače je fakt, že jeho frekvenční charakteristiku lze korigovat pouze potenciometrem TONE, FREQ a příp. spínačem PRESENCE, což nemusí vždy dostačovat. Mohl by zde být využit např. třípásmový pasivní korektor za blokem zkreslení, který by utlumoval části frekvenčního spektra již upraveného signálu. V případě potřeby by však takový korektor bylo možno zařadit na vstup efektové smyčky (konektor SEND). Další nevýhodou fakt, že výstupní signál obvodu frekvenčního posuvu o oktávu výše je více zkreslený než bylo předpokládáno s přihlédnutím k simulovanému průběhu, spodní špičky této sinusoidy jsou podstatně ostřejší i při použití 68 pF kondenzátorů připojených paralelně k usměrňovacím diodám. Na vyšší úroveň by efektový zesilovač pozvedly také vstupní a výstupní filtry s větší strmostí. Za nepraktickou může být považována i zbytečně velká výška (50 mm) přístrojové krabičky, která snižuje komfort při stlačování nožních přepínačů. Rozměr např. 35 mm by zde byl zcela dostatečný.

V příloze A-D je uvedena veškerá výrobní dokumentace, fotografie hotového efektového zesilovače je ke zhlédnutí v příloze E a konečně část F obsahuje shrnutí parametrů a naměřených charakteristik.

LITERATURA

- [1] Vyšší harmonické: *Přednáška č.1* [online]. Brno [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: <http://www.audified.com/projekt/vavcjamu/vyuka/prednasky/files/B1VyssiHarmonicke.pdf>. Janáčkova akademie múzických umění.
- [2] To základní o kytarových efektech. *Hudební fórum* [online]. 2008 [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: <http://hudebniforum.cz/kytarove-efekty/to-zakladni-o-kytarovych-efektech-t6945.html>
- [3] Design your own distortion. *General guitar gadgets* [online]. 2000 [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: <http://www.generalguitargadgets.com/how-to-build-it/technical-help/articles/design-distortion/>
- [4] KUBÍČEK, M. *Napájení elektronických zařízení: Přednáška 3* [online]. Brno [cit. 2015-12-04]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky.
- [5] Tonepad: *FX projects* [online]. [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: <http://tonepad.com/projects.asp?projectType=fx>
- [6] PTÁČEK, L. Jak pracují efekty. *Muzikus* [online]. 2009 [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-clanky/Jak-pracuji-efekty-I~19~leden~2009/>
- [7] Bucket-brigade device. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Bucket-brigade_device
- [8] Amplified Parts: *Spring Reverb Tanks Explained and Compared* [online]. 2010 [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: https://www.amplifiedparts.com/tech_corner/spring_reverb_tanks_explained_and_compared
- [9] Dopplerův jev. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Doppler%C5%AFv_jev
- [10] Vibrato. *Donreiman* [online]. [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: <http://www.donreiman.com/Vibrato/Vibrato.htm>
- [11] Octave. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Octave>
- [12] Octave effect. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Octave_effect
- [13] Octaves and diodes. *DIYstompboxes* [online]. 2003-04-13 [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: <http://www.diystompboxes.com/smfforum/index.php?topic=1146.0>
- [14] To základní o snímačích. *Hudební fórum* [online]. 2008 [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: <http://hudebniforum.cz/snimace-hardware-prislusenstvi-udrzba/to-zakladni-o-snimacich-t7031.html>
- [15] DOUG, R. Telecaster discussion page reissue. *TDPRI* [online]. 2003-03-28 [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: <http://www.tdpri.com/forum/telecaster-discussion-forum/8530-frequency-range-guitar-hz.html>

- [16] BRANČÍK, L. a DOSTÁL, T. Analogové elektronické obvody: Přednášky. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007. ISBN 978-80-214-3525- 4.
- [17] BC546/BC547/BC548/BC549/BC550 datasheet: NPN Epitaxial silicon transistor. *Fairchild Semiconductor* [online]. [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/BC/BC547.pdf>
- [18] J201 datasheet: N-Channel JFET general purpose amplifier. *Nightfire: electronic kits* [online]. [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: http://vakits.com/sites/default/files/J203_0.pdf
- [19] 2SK117 datasheet: N-Channel JFET low noise audio amplifier. *Futurlec: The electronic components superstore* [online]. [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: <https://www.futurlec.com/Datasheet/Transistor/2SK117.pdf>
- [20] Run off groove: *A closer look at the Fetzer Valve*. [online]. [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: <http://www.runoffgroove.com/fetzervalue.html#4>
- [21] ZAPLETAL, O. *Analogový kytarový multieffekt* [online]. Brno, 2014 [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84428.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Ing. Miroslav Staněk.
- [22] Symmetrical vs. assymmetrical clipping. *The Gear page* [online]. [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: <http://www.thegearpage.net/board/index.php?threads/symmetrical-vs-asymmetrical-clipping.520950/>,
- [23] Zkreslení II - definice zkreslení: Intermodulační zkreslení TID. *Zesilovače* [online]. [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: <http://www.zesilovace.cz/view.php?cislocclanku=2002122406>
- [24] Analog delay. *Kytary.cz* [online]. [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: <http://kytary.cz/Search/?term=analog%20delay>
- [25] PT2399 datasheet. *Princeton Technology Corp.* [online]. [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: http://www.princeton.com.tw/Portals/0/Product/PT2399_1.pdf
- [26] PT2399. *Das Musikding* [online]. [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: http://www.musikding.de/PT2399_1
- [27] ANDERTON, C. *Electronic Projects for Musicians*. Music Sales America, 1992
- [28] WIRSUM, S. *Abeceda nf techniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2003.

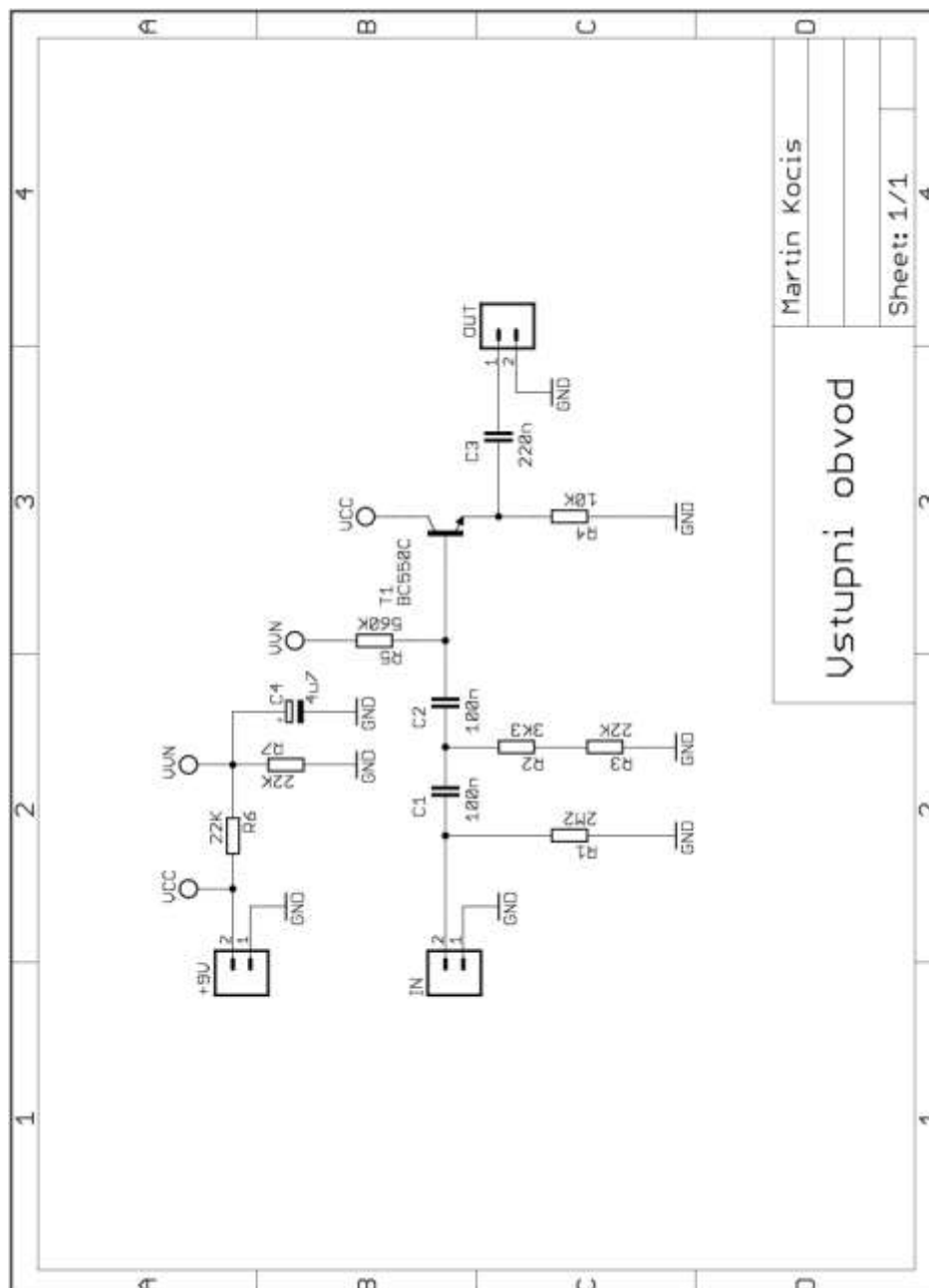
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

R	rezistor
C	kondenzátor
D	dioda
Q	tranzistor
GND	zemní svorka, ground
VSTUP	vstupní svorka
VYSTUP	výstupní svorka
IC	integrovaný obvod, integrated circuit
S	přepínač
LED	světlo emitující dioda, light emitting diode
Ge	germanium, germaniová dioda
Si	křemík, křemíková dioda
Ω	ohm
F	farad
V	volt
dB	decibel
ms	milisekunda
Ah	Ampérhodina
Hz	hertz
U	napětí
U_p	prahové napětí diody
U_{GSoff}	limitační napětí gate-source
V_{CC}	napájecí napětí
V_{VN}	napětí virtuální země
I_{DSS}	proud elektrodou drain v saturaci
A_U	napěťové zesílení
f	frekvence
f_m	mezní frekvence
f_{clk}	frekvence hodinového signálu
THD	celkové harmonické zkreslení, total harmonic distortion
LFO	nízkofrekvenční oscilátor, low frequency oscillator
FET	tranzistor řízený elektrickým polem, field effect transistor

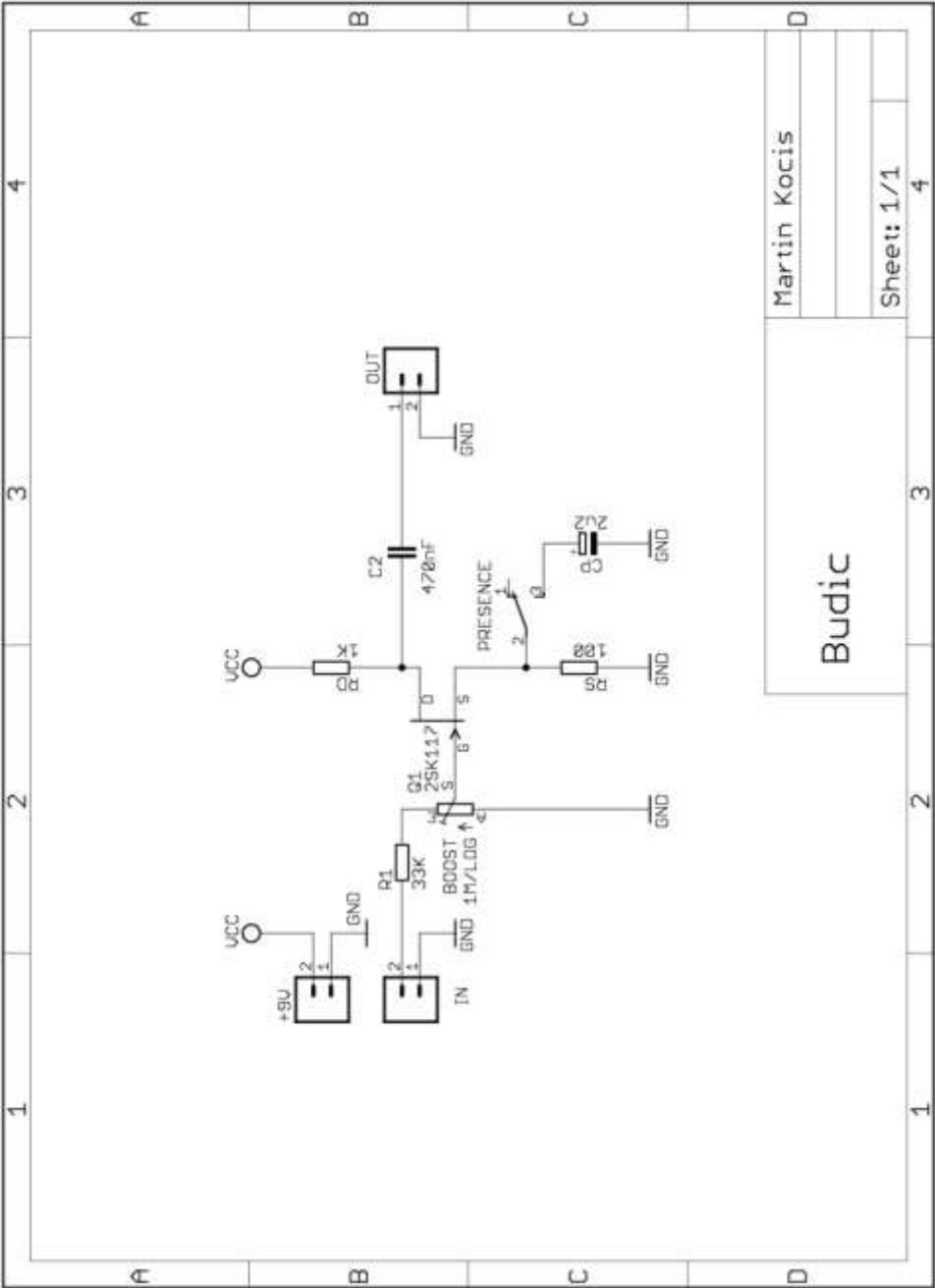
JFET	tranzistor řízený elektrickým polem se substrátem propojeným s elektrodou gate, junction field effect transistor
MIDI	mezinárodní komunikační protokol pro hudební nástroje, musical instrument digital interface
BBD	analogová zpožďovací linka, bucket-brigade device
t_{delay}	časový interval zpoždění
A/D a D/A	analogově-digitální převod, digitálně-analogový převod
RAM	paměť s náhodným přístupem, random access memory
SC	zapojení se společným kolektorem
DPS	deska plošných spojů
R_{VST}	vstupní odpor

A SCHÉMATA ZAPOJENÍ

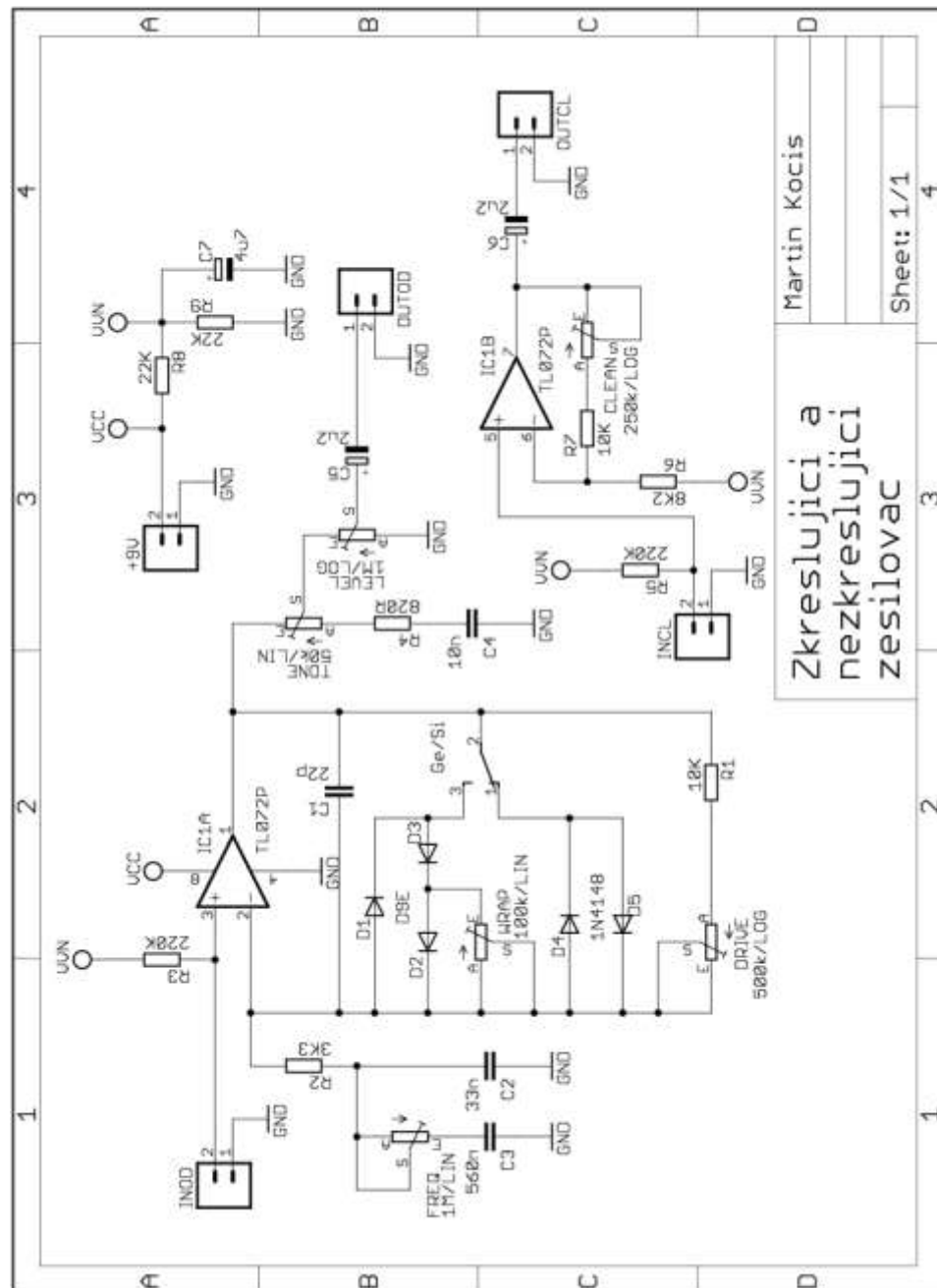
A.1 Vstupní obvod



A.2 Budič



A.3 Zkreslující a nezkreslující zesilovač

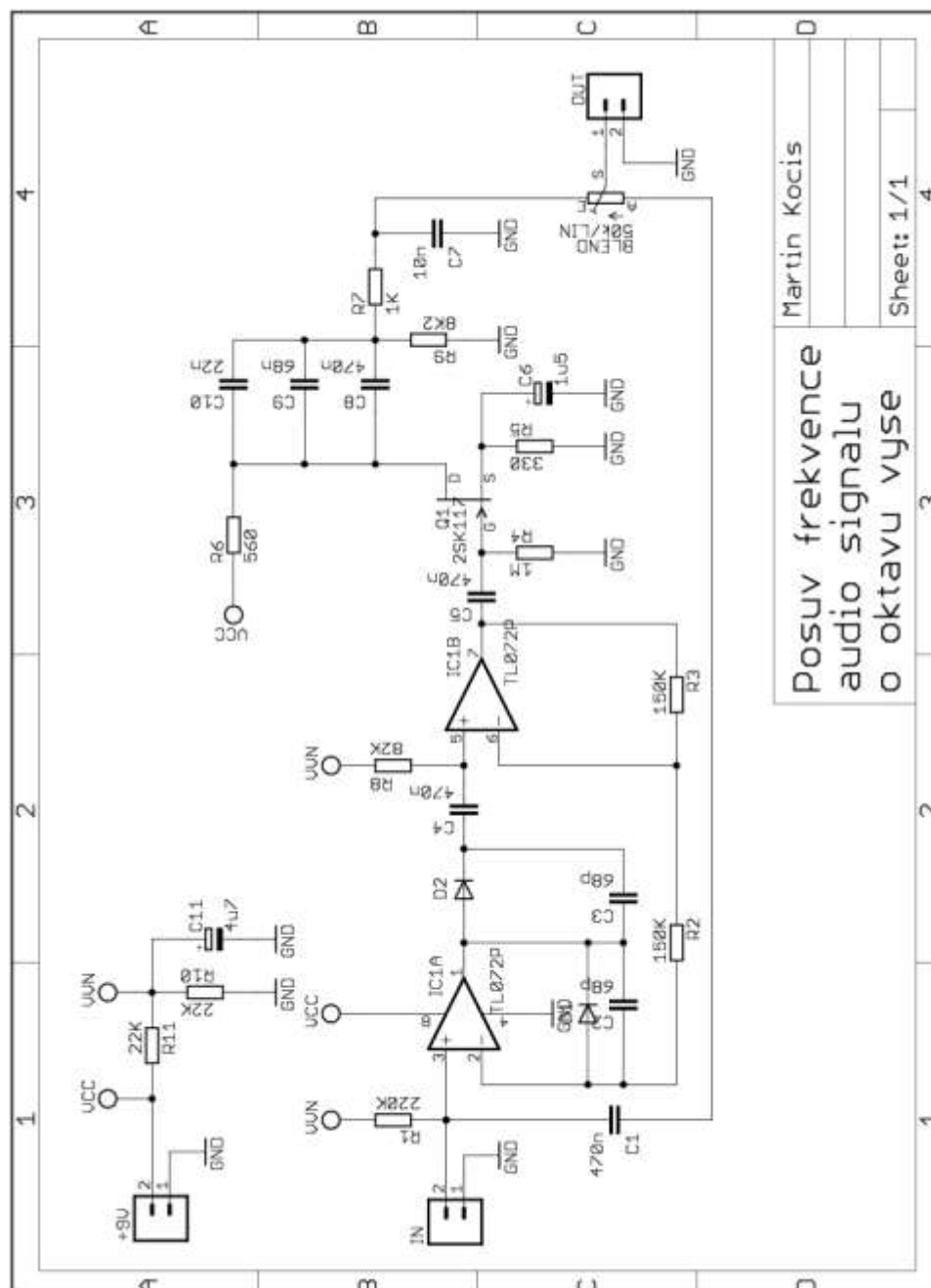


Zkreslující a
nezkreslující
zesilovač

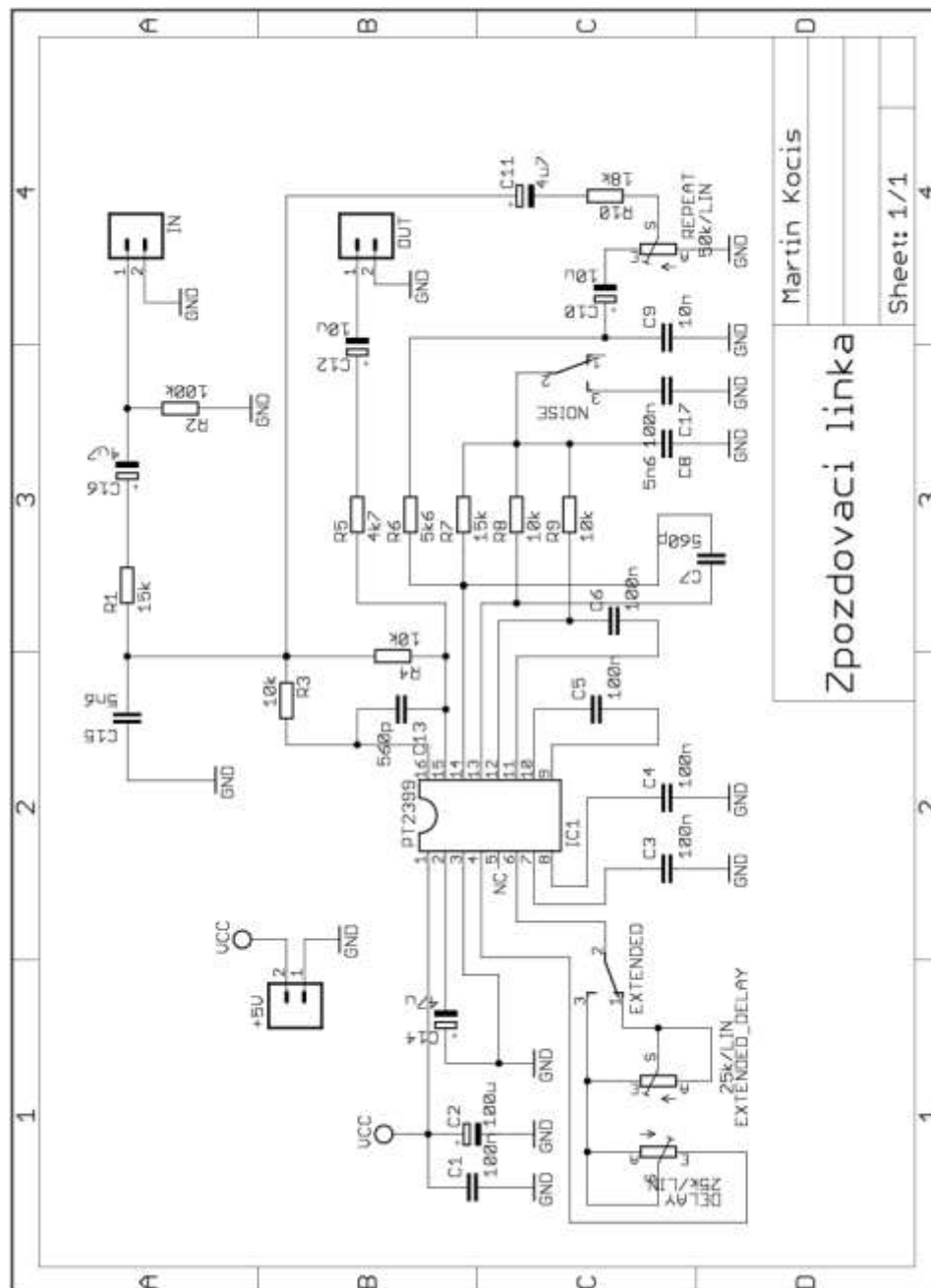
Martin Kocis

Sheet: 1/1

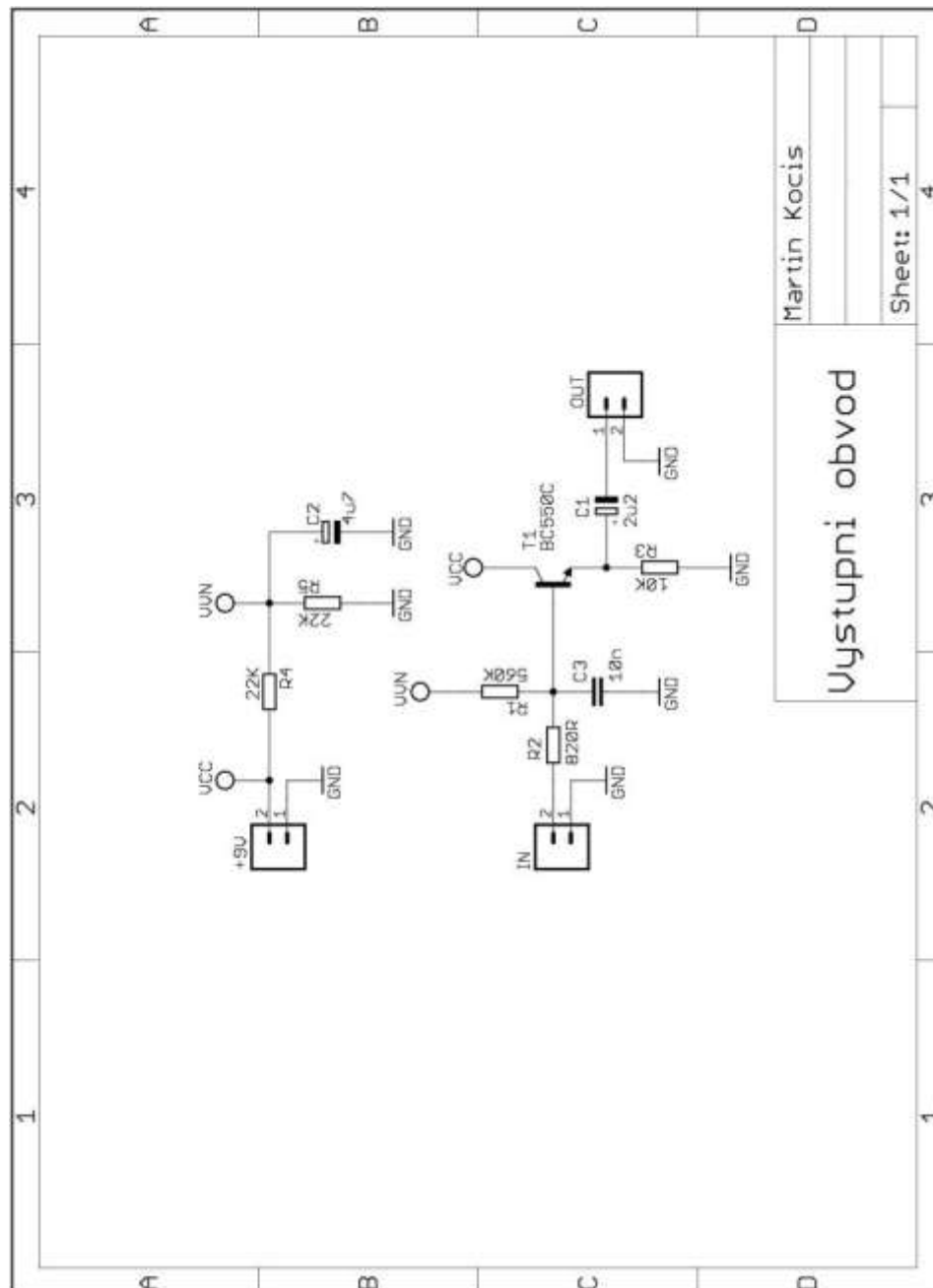
A.4 Posuv frekvence o oktávu výše



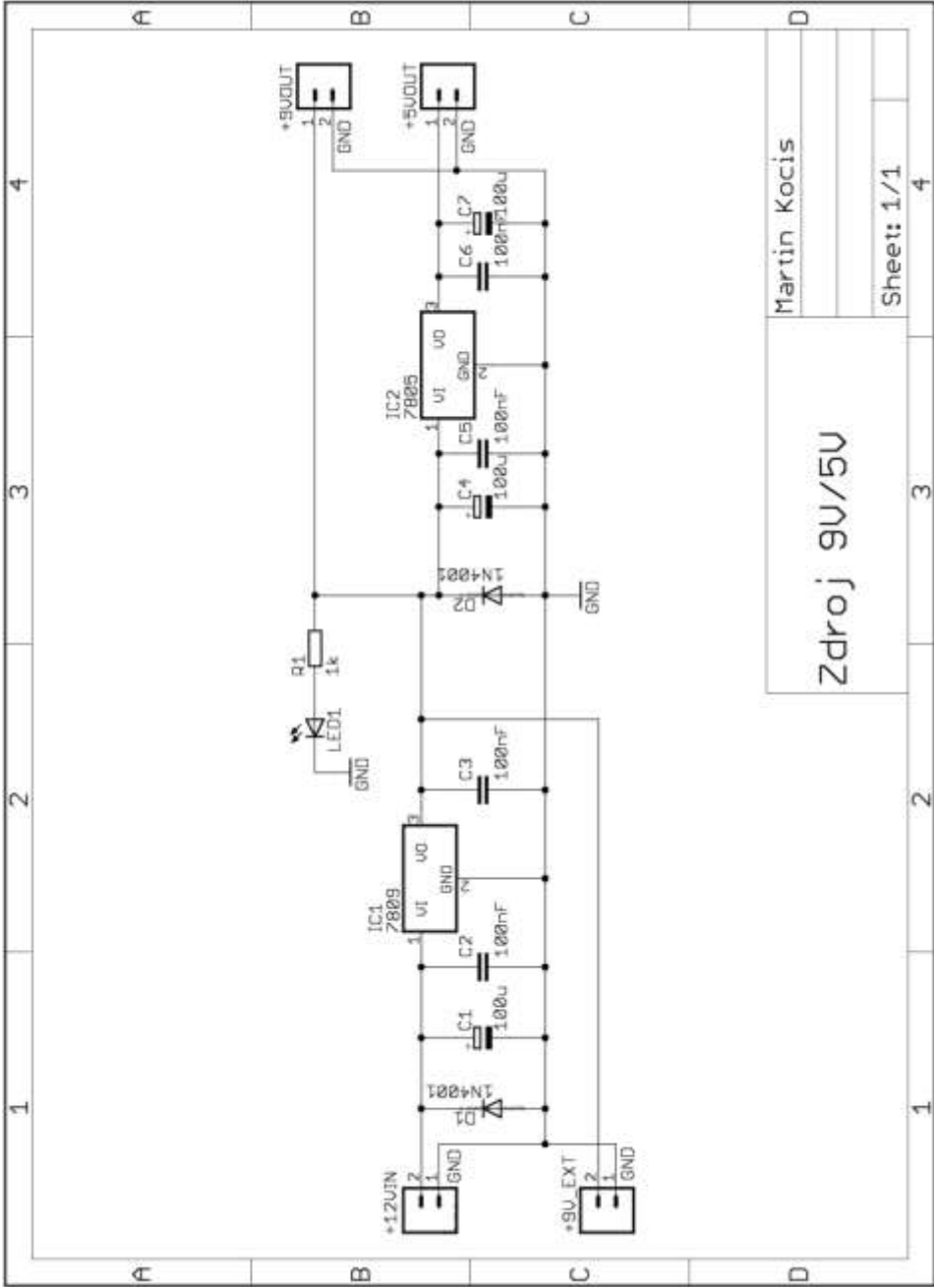
A.5 Zpožd'ovací linka



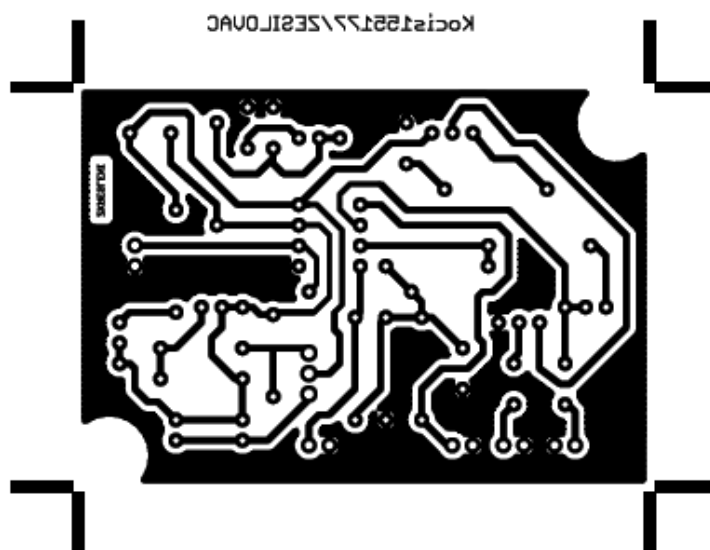
A.6 Výstupní obvod



A.7 Napájecí zdroj

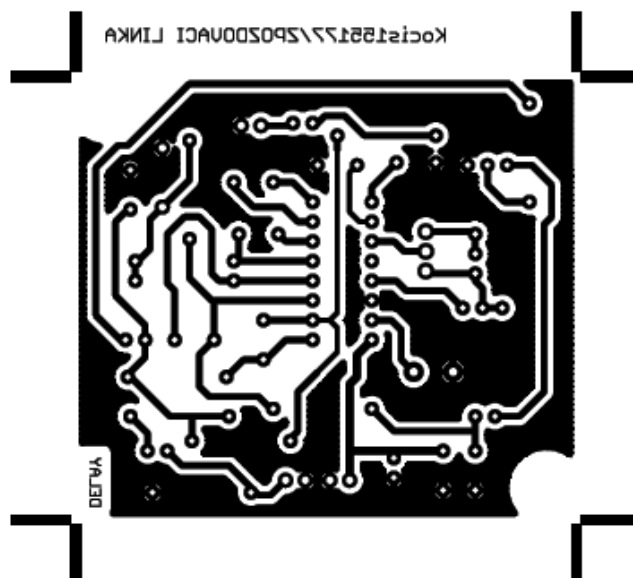


B.3 Zkreslující a nezkreslující zesilovač



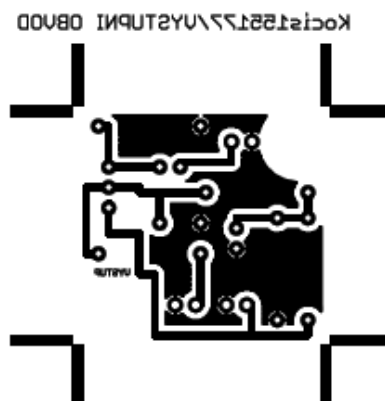
Měřítko 1:1, rozměry desky 73x51 mm

B.5 Zpožďovací linka



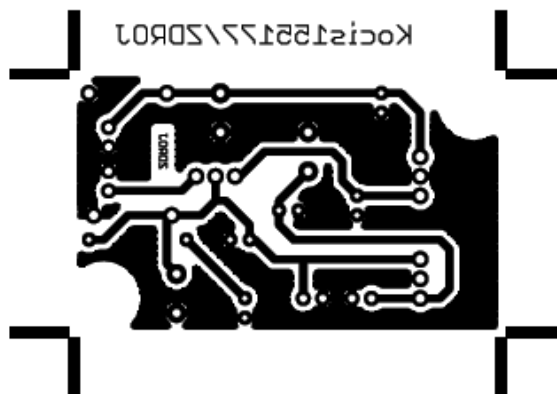
Měřítko 1:1, rozměry desky 66x59 mm

B.6 Výstupní obvod



Měřítko 1:1, rozměry desky 32x30 mm

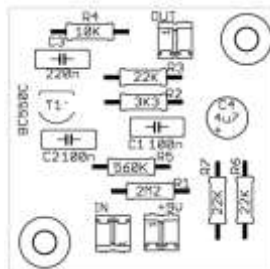
B.7 Napájecí zdroj



Měřítko 1:1, rozměry desky 57x34 mm

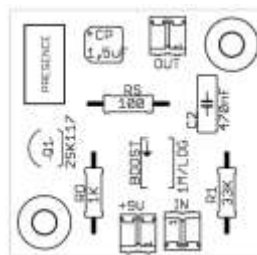
C OSAZOVACÍ VÝKRESY

C.1 Vstupní obvod



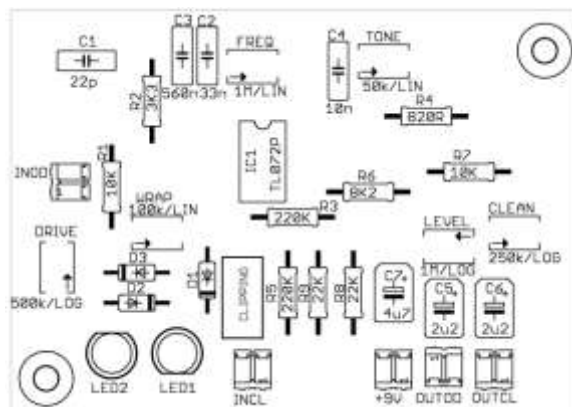
Měřítko 1:1, rozměry desky 37x36 mm

C.2 Budič



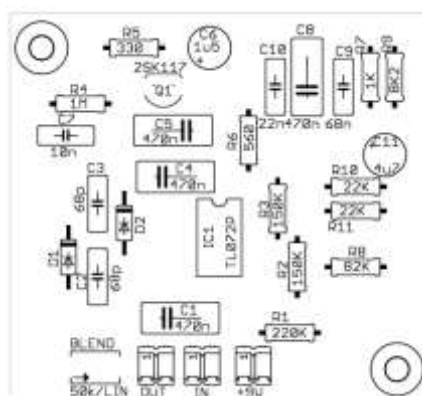
Měřítko 1:1, rozměry desky 33x31 mm

C.3 Zkreslující a nezkreslující zesilovač



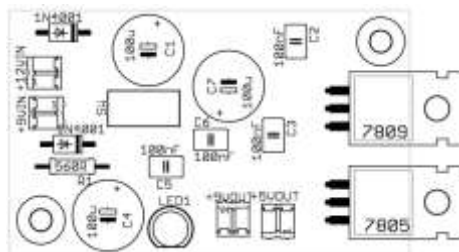
Měřítko 1:1, rozměry desky 73x51 mm

C.4 Posuv frekvence o oktávu výše



Měřítko 1:1, rozměry desky 54x50 mm

C.7 Napájecí zdroj



Měřítko 1:1, rozměry desky 57x34 mm

D SEZNAM SOUČÁSTEK

D.1 Vstupní obvod

Název	Jmenovitá hodnota	Pouzdro	Popis
C1	100 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C2	100 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C3	220 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C4	4,7 μ F	E2,5-6	Elyt./tantal. kondenzátor
R1	2,2 M Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R2	3,3 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R3	22 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R4	10 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R5	560 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R6	22 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R7	22 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
T1	BC550C	TO-92 EBC	NPN tranzistor
+9V	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
IN	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
OUT	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík

D.2 Budič

Název	Jmenovitá hodnota	Pouzdro	Popis
R1	33 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
RD	1 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
RS	100 Ω	0207	Metalizovaný rezistor
BOOST	1 M Ω /LOG	16 mm	Logaritmický potenciometr
Q1	2SK117	TO-92 DSG	JFET N-kanál
CP	2,2 μ F	E2,5-6	Tantalový kondenzátor
C2	470 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
PRESENCE	ON-OFF	-	Jednopolový přepínač
IN	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
OUT	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
+9V	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík

D.3 Zkreslující a nezkreslující zesilovač

Název	Jmenovitá hodnota	Pouzdro	Popis
C1	22 pF	025X075	Fóliový kondenzátor
C2	33 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C3	560 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C4	10 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C5	2,2 μ F	E2,5-6	Tantalový kondenzátor
C6	2,2 μ F	E2,5-6	Tantalový kondenzátor
C7	4,7 μ F	E2,5-6	Tantalový kondenzátor
D1	D9E	DO-7	Germaniová dioda
D2	D9E	DO-7	Germaniová dioda
D3	D9E	DO-7	Germaniová dioda
D4	1N4148	DO-41	Křemíková dioda
D5	1N4148	DO-41	Křemíková dioda
IC1	TL072	DIL8	2x operační zesilovač
R1	10 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R2	3,3 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R3	220 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R4	820 Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R5	220 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R6	8,2 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R7	10 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R8	22 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R9	22 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
CLEAN	250 K Ω /LOG	16 mm	Logaritmický potenciometr
DRIVE	500 K Ω /LOG	16 mm	Logaritmický potenciometr
FREQ	1 M Ω /LOG	16 mm	Logaritmický potenciometr
WRAP	100 K Ω /LIN	16 mm	Lineární potenciometr
TONE	50 K Ω /LIN	16 mm	Lineární potenciometr
LEVEL	1 M Ω /LOG	16 mm	Logaritmický potenciometr
CLIPPING	ON - ON	-	Přepínač

+9V	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
INOD	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
OUTOD	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
INCL	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
OUTCL	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík

..

D.4 Posuv frekvence o oktávu výše

Název	Jmenovitá hodnota	Pouzdro	Popis
C1	470 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C2	68 pF	025X075	Keramický kondenzátor
C3	68 pF	025X075	Keramický kondenzátor
C4	470 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C5	470 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C6	1,5 μ F	E2,5-6	Tantalový kondenzátor
C7	10 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C8	470 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C9	68 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C10	22 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C11	4,7 μ F	E2,5-6	Tantalový kondenzátor
D1	1N4148	DO-41	Křemíková dioda
D2	1N4148	DO-41	Křemíková dioda
R1	220 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R2	150 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R3	150 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R4	1 M Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R5	330 Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R6	560 Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R7	1 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R8	82 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R9	8,2 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R10	22 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R11	22 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
Q1	2SK117	TO-92 DSG	JFET N-kanál
IC1	TL072	DIL8	2x operační zesilovač
BLEND	50 K Ω /LIN	16 mm	Lineární potenciometr
IN	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
OUT	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
+9V	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík

D.5 Zpožd'ovací linka

Název	Jmenovitá hodnota	Pouzdro	Popis
C1	100 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C2	100 μ F	E2,5-7	Elyt. kondenzátor
C3	100 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C4	100 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C5	100 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C6	100 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C7	560 pF	025X075	Fóliový kondenzátor
C8	5,6 nF	042X103	Fóliový kondenzátor
C9	10 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C10	10 μ F	E2,5-6	Tantalový kondenzátor
C11	4,7 μ F	E2,5-6	Tantalový kondenzátor
C12	10 μ F	E2,5-6	Tantalový kondenzátor
C13	560 pF	025X075	Fóliový kondenzátor
C14	47 μ F	E2,5-6	Tantalový kondenzátor
C15	5,6 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
C16	4,7 μ F	E2,5-6	Tantalový kondenzátor
C17	100 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
R1	15 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R2	100 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R3	10 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R4	10 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R5	4,7 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R6	5,6 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R7	15 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R8	10 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R9	10 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R10	18 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
IC1	PT2399	DIL16	Audioprosesor
DELAY	25 K Ω /LIN	16 mm	Lineární potenciometr
EXTENDED_	25 K Ω /LIN	16 mm	Lineární potenciometr

DELAY			
REPEAT	50 K Ω /LIN	16 mm	Lineární potenciometr
NOISE	ON-OFF	-	Přepínač
EXTENDED	ON-ON	-	Nožní přepínač
IN	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
OUT	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
+5V	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík

D.6 Výstupní obvod

Název	Jmenovitá hodnota	Pouzdro	Popis
C1	2,2 μ F	E2,5-6	Tantalový kondenzátor
C2	4,7 μ F	E2,5-6	Tantalový kondenzátor
C3	10 nF	025X075	Fóliový kondenzátor
R1	560 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R2	820 Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R3	10 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R4	22 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
R5	22 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
Q1	BC550C	TO-92 EBC	NPN tranzistor
IN	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
OUT	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
+9 V	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík

D.7 Napájecí zdroj

Název	Jmenovitá hodnota	Pouzdro	Popis
C1	100 μ F	E5-10,5	Elyt. kondenzátor
C2	100 nF	030X050	Fóliový kondenzátor
C3	100 nF	030X050	Fóliový kondenzátor
C4	100 μ F	E5-10,5	Elyt. kondenzátor
C5	100 nF	030X050	Fóliový kondenzátor
C6	100 nF	030X050	Fóliový kondenzátor
C7	100 μ F	E5-10,5	Elyt. kondenzátor
D1	1N4148	DO-41	Křemíková dioda
D2	1N4148	DO-41	Křemíková dioda
IC1	7809	TO220H	Stabilizátor +9V
IC2	7805	TO220H	Stabilizátor +5V
LED1	-	5 mm	Světloemitující dioda
R1	1 K Ω	0207	Metalizovaný rezistor
+5VOUT	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
+9VOUT	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
+12VIN	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík
+9V_EXT	2 pin	2,54 mm	Oboustranný kolík

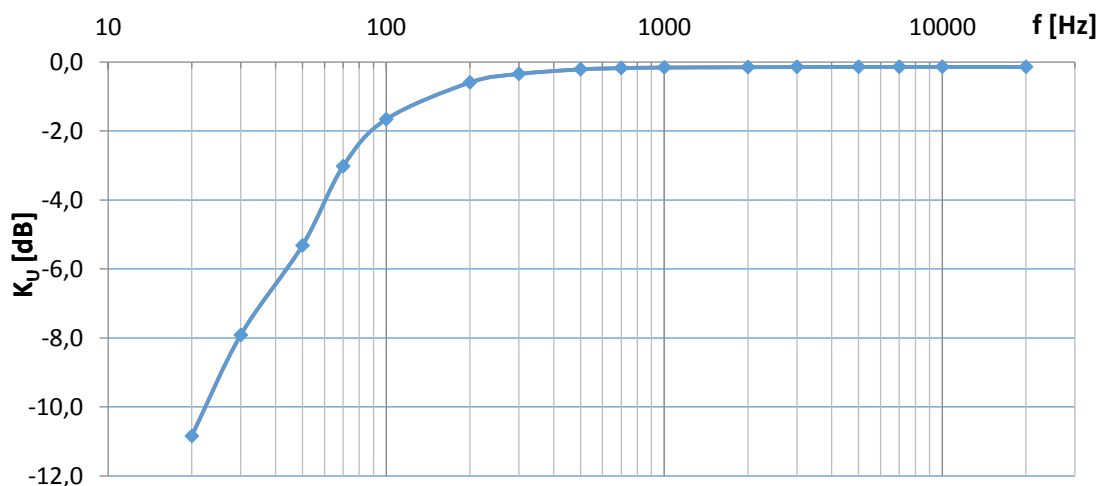
E FOTOGRAFIE HOTOVÉHO EFEKTOVÉHO ZESILOVAČE



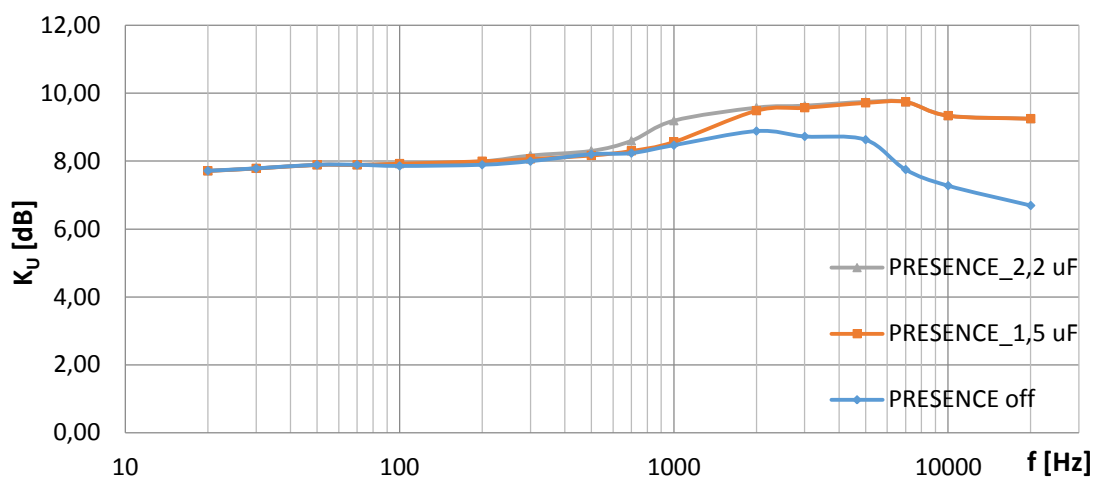
F SHRNU TÍ PARAMETRŮ EFEKTOVÉHO ZESILOVAČE

Vstupní odpor R_{VST} [k Ω]	31,7
Napájecí napětí [V]	12
Maximální proudový odběr [mA]	200

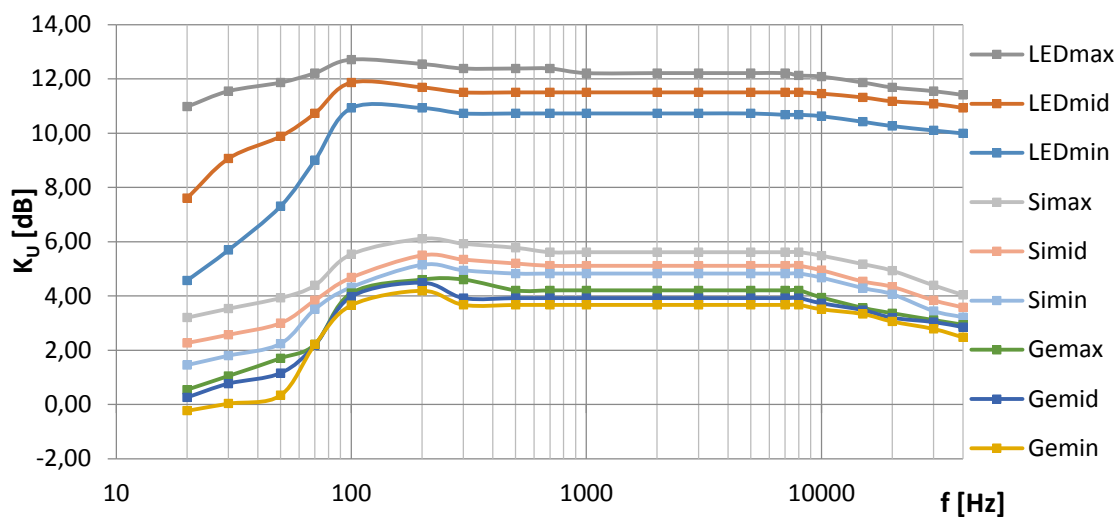
Modulová frekvenční charakteristika vstupního obvodu



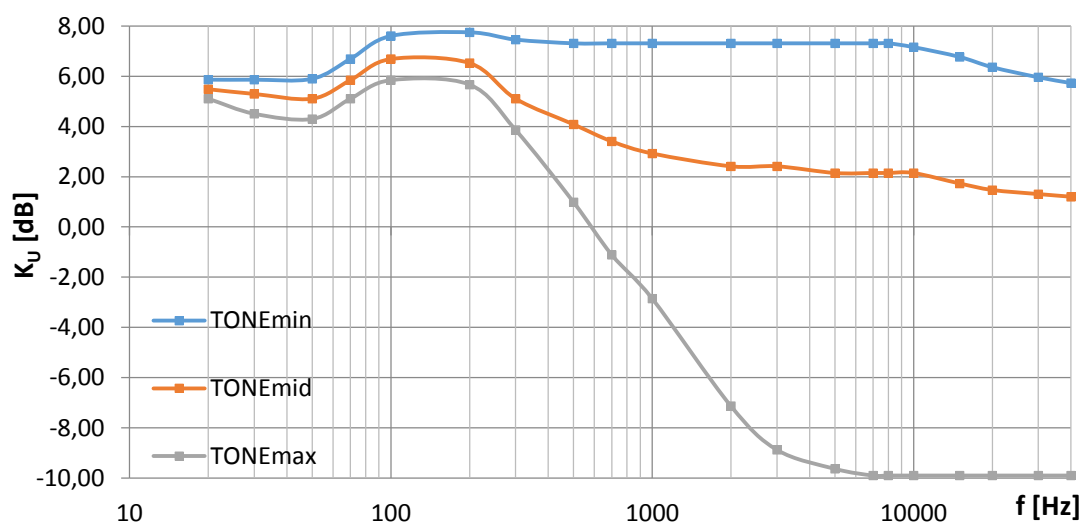
Modulová frekvenční charakteristika budiče



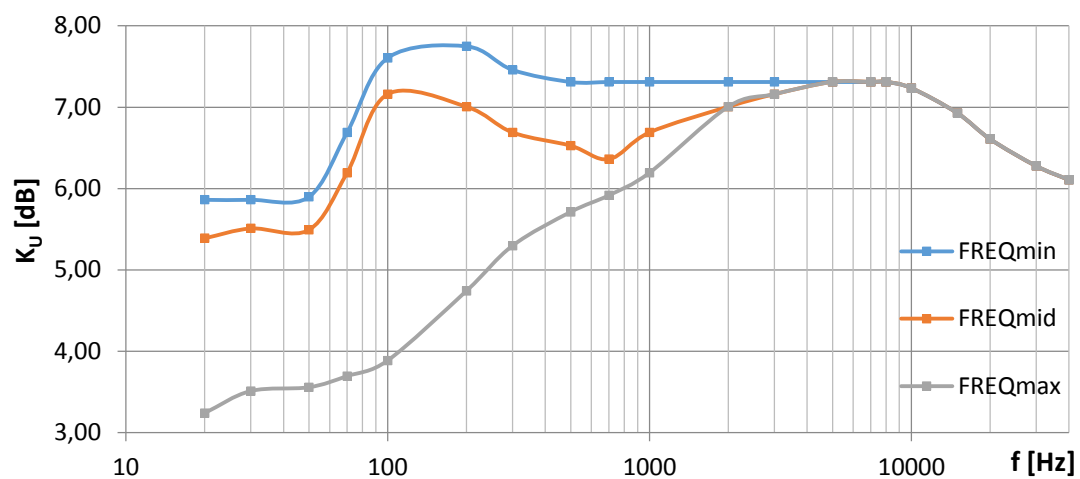
Modulová frekvenční charakteristika zkreslujícího zesilovače - rozmítání potenciometru DRIVE při použití třech typů diod (D9E, $U_p = 0,45$ V; 1N4148, $U_p = 0,7$ V; LED, $U_p = 2,0$ V)



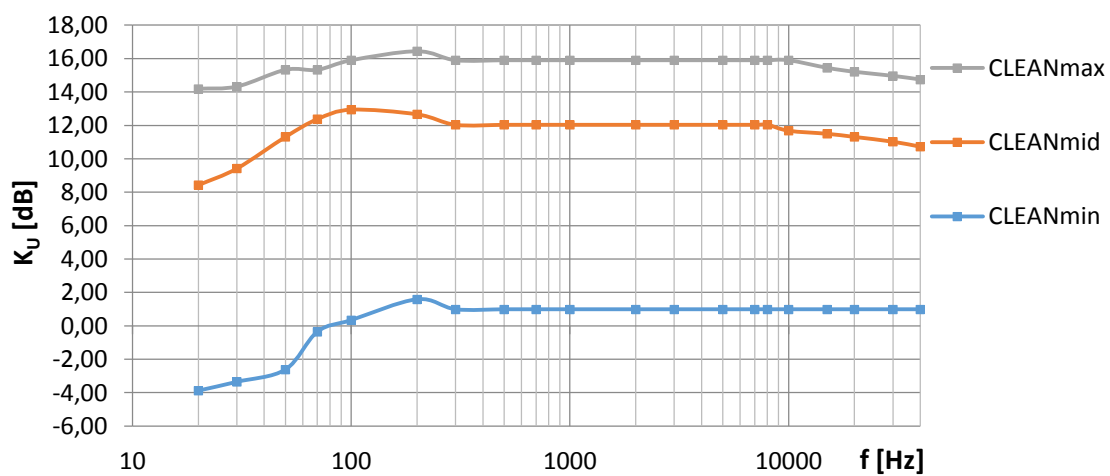
Modulová frekvenční charakteristika zkreslujícího zesilovače - rozmítání potenciometru TONE



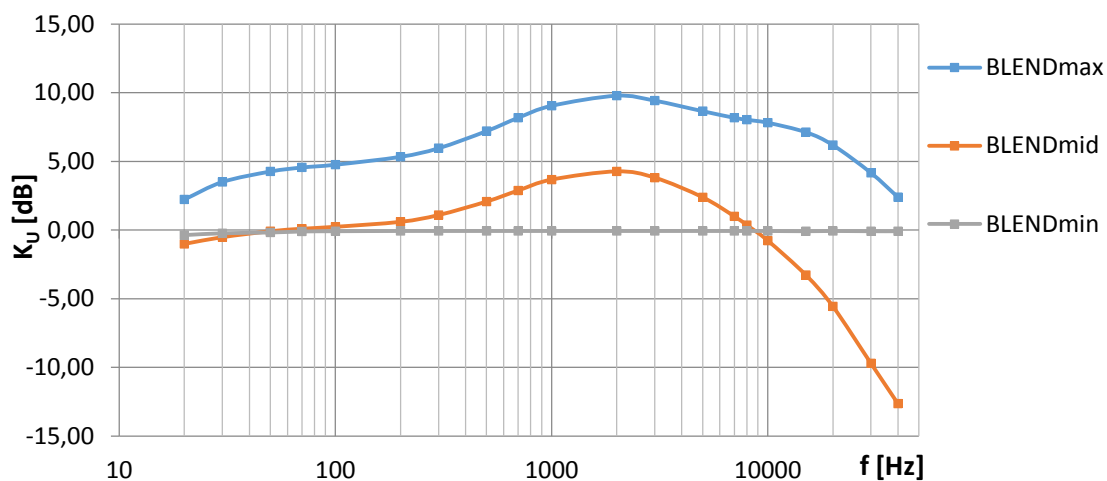
Modulová frekvenční charakteristika zkreslujícího zesilovače - rozmítání potenciometru FREQ



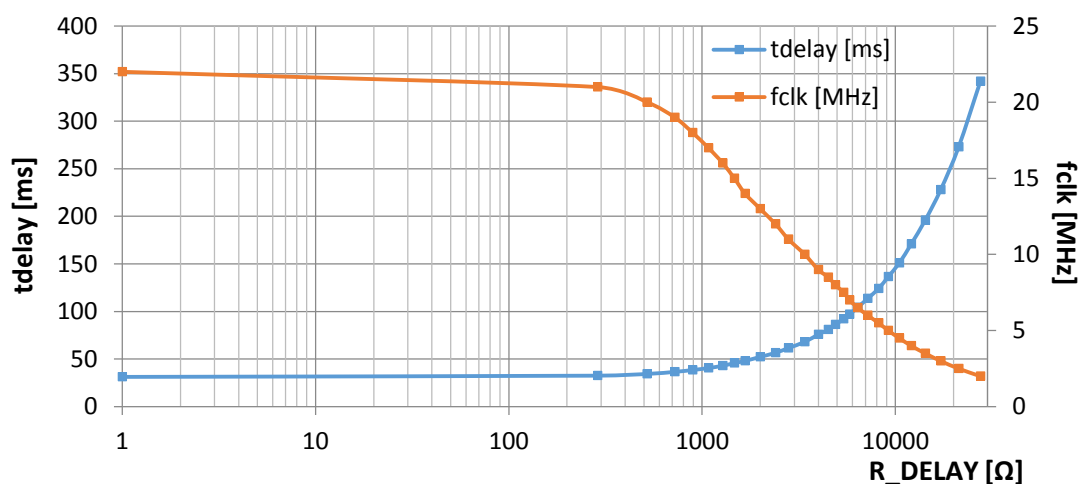
Modulová frekvenční charakteristika nezkreslujícího zesilovače - rozmítání potenciometru CLEAN



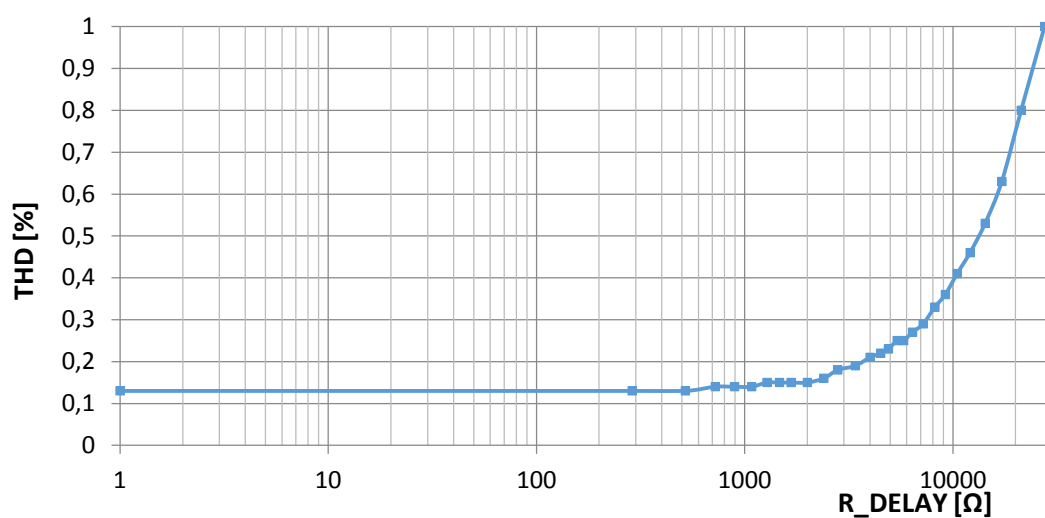
Modulová frekvenční charakteristika obvodu pro posuv frekvence o oktávu výše - rozmítání potenciometru BLEND



Závislost časového intervalu zpoždění a frekvence hodinového signálu zpožďovací linky na hodnotě odporu R_{DELAY} , převzato z katalogového listu PT2399 [25]



Závislost celkového harmonického zkreslení THD zpožďovací linky na hodnotě odporu R_{DELAY} , převzato z katalogového listu PT2399 [25]



Modulová frekvenční charakteristika výstupního obvodu

