



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

KYTAROVÝ MULTIEFEKT TYPU DELAY A TREMOLO

DELAY AND TREMOLO GUITAR MULTI-EFFECT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Blažek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Kubánek, Ph.D.

BRNO 2023



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Jiří Blažek
Ročník: 3

ID: 231328
Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Kytarový multieffekt typu delay a tremolo

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem, vlastnostmi, jednotlivými bloky a parametry kytarových efektů typu delay a tremolo. Taktéž prostudujte možnosti jejich vzájemného kombinování a zaměřte se na netypické řazení nejprve delay a poté tremolo. Navrhněte koncepci a obvodové schéma tohoto multieffektu v analogové podobě, zvolte vhodné součástky a jejich hodnoty. V případě dostupnosti modelů součástek prověřte správnou funkci efektu počítačovou simulací. Zkonstruujte tento efekt, změřte jeho vlastnosti a porovnejte je se simulací. Zhodnoťte zvukové možnosti efektu a porovnejte jej se standardním řazením (tremolo – delay).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] HUNTER, Dave. Guitar effects pedals: the practical handbook. Milwaukee: Backbeat Books, 2004. ISBN 9780-87930-806-3.
[2] SELF, Douglas. Small signal audio design. Burlington, MA: Focal Press, 2010. ISBN 0240521773.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 26.5.2023

Vedoucí práce: Ing. David Kubánek, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí multiefektu typu delay – tremolo. V teoretické části detailně studuje funkci obou typů efektů. Dále se zaměřuje na možnosti obvodových řešení a samotné schéma, které je detailně popsáno. Práce následně ověřuje funkci těchto schémat v simulačním programu Ltspice. Výsledky simulace jsou následně porovnávány s reálným měřením na nepájivém poli. V závěru se práce soustředí na návrh DPS a konstrukci multiefektu samotného.

Klíčová slova

Kytarový multi-efekt, Tremolo, Delay, Amplitudová modulace, Zpožďovací efekt

Abstract

This work deals with the design and construction of a delay – tremolo type multi-effect unit. In the theoretical part, it thoroughly studies the functioning of both types of effects in detail. It further focuses on circuit solutions and provides a detailed description of the schematic. The work subsequently verifies the functionality of these schematics in the Ltspice simulation program. Then the simulation results are compared with measurements on a breadboard. In conclusion, the work focuses to the PCB design and the construction of the multi-effect pedal.

Keywords

Guitar multi-effect, Tremolo, Delay, Amplitude modulation, Delay effect

Bibliografická citace

Citace elektronického zdroje:

BLAŽEK, Jiří. *Kytarový multieffekt typu delay a tremolo* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/145343>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce David Kubánek.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Jiří Blažek*

VUT ID studenta: *231328*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2022/23*

Téma závěrečné práce: *Kytarový multieffekt typu delay a tremolo*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Davidu Kubánkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne:

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	3
ÚVOD	4
1. KYTAROVÉ EFEKTY	5
1.1 KYTAROVÝ EFEKT OBECNĚ	5
1.1.1 Typologie efektů	5
1.2 EFEKTY SE ZPOŽĎOVACÍ LINKOU	6
1.2.1 Efekty s dynamickým zpožděním	6
1.2.2 Efekty se statickým zpožděním	7
1.3 MODULAČNÍ EFEKTY	7
2. DELAY	10
2.1 VZNIK A VÝVOJ EFEKTU DELAY	11
2.1.1 Páskové zpoždění (Tape delay)	11
2.1.2 Polovodičové zpoždění skrze BBD	11
2.1.3 Digitální zpoždění	11
2.2 DELAY ČIPY	12
2.2.1 Zařízení BBD (Bucket-Brigade Device)	12
2.2.2 Integrovaný čip PT2399	13
2.3 SCHÉMA EFEKTU DELAY	14
2.3.1 Vstupní buffer efektu delay	14
2.3.2 Napájení efektu delay	15
2.3.3 Zpožďovací a zpětnovazební část efektu delay	16
2.3.4 Výstupní Buffer	18
3. TREMOLO	19
3.1 VZNIK A VÝVOJ EFEKTU TREMOLO	21
3.1.1 Elektromechanické tremolo	21
3.1.2 Kytarové zesilovače obsahující tremolo	21
3.1.3 Elektronické tremolo pedály	21
3.2 RŮZNÁ OBVODOVÁ ŘEŠENÍ EFEKTU TREMOLO	22
3.2.1 Nízkofrekvenční oscilátory (LFO)	22
3.2.2 Napětím řízené zesilovače (VCA)	26
3.3 SCHÉMA EFEKTU TREMOLO	27
3.3.1 Relaxační oscilátor (LFO)	27
3.3.2 Napětově řízený zesilovač s JFET	28
4. KOMBINACE EFEKTŮ DELAY A TREMOLO	30
4.1.1 Řazení tremolo poté delay	30
4.1.2 Řazení delay poté tremolo	30
4.1.3 Vřazení tremolo efektu do zpětné vazby efektu delay	30
5. SIMULACE	31
5.1 SIMULACE EFEKTU DELAY	31
5.2 SIMULACE EFEKTU TREMOLO	33
6. MĚŘENÍ	38
6.1.1 Použité přístroje pro měření	38
6.1 MĚŘENÍ EFEKTU DELAY	38
6.1.1 Porovnání rozdílů v simulacích a měření efektu delay	38
6.2 MĚŘENÍ EFEKTU TREMOLO	41
6.2.1 Porovnání rozdílů v simulacích a měření efektu tremolo	41
7. ZVUKOVÉ TESTOVÁNÍ	46
7.1.1 Použité přístroje pro zvukové testování	46

7.2	VÝSLEDKY ZVUKOVÉHO TESTOVÁNÍ.....	46
7.2.1	<i>Testování zvuku efektu delay</i>	46
7.2.2	<i>Testování zvuku efektu tremolo</i>	46
7.2.3	<i>Zvukové možnosti multiefektu</i>	47
8.	SCHÉMA, NÁVRH DPS A KONSTRUKCE PEDÁLU.....	48
8.1	SCHÉMA.....	48
8.2	DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ (DPS).....	48
8.3	KONSTRUKCE.....	49
9.	ZÁVĚR.....	51
	LITERATURA.....	53
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	56
10.	SEZNAM PŘÍLOH.....	58

SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 1.1 Typologické rozdělení kytarových efektů	5
obr. 1.2 Jednokanálový chorus.....	6
obr. 1.3 Jednokanálový Flanger	7
obr. 1.4 Jednoduchý all-pass Phaser se zpětnou vazbou	8
obr. 1.5 Jednoduché Vibrato se zpožďovací členem.....	9
obr. 2.1 Delay se základní zpožďovací jednotkou	10
obr. 2.2 Delay se základní zpožďovací jednotkou a zpětnou vazbou	10
obr. 2.3 Základní schéma unipolárního MOS BBD obvodu [12]; upraveno	13
obr. 2.4 Blokový diagram čipu PT2399 [10]; převzato.....	13
obr. 2.5 Vstupní buffer efektu delay	15
obr. 2.6 Napájecí část efektu delay	16
obr. 2.7 Zpožďovací část efektu delay	18
obr. 2.8 Výstupní buffer efektu delay	18
obr. 3.1 průběh amplitudové modulace při maximální modulační hloubce (100 %)	19
obr. 3.2 průběh amplitudové modulace při poloviční modulační hloubce (50 %)	20
obr. 3.3 Základní blokové schéma efektu tremolo	21
obr. 3.4 Blokové schéma jednoduchého oscilátoru	22
obr. 3.5 Zpětnovazební RC oscilátor s Wienovým můstkem.....	23
obr. 3.6 Jednoduché schéma relaxačního oscilátoru z OZ	24
obr. 3.7 Simulace jednoduchého relaxačního oscilátoru za použití komparátoru	24
obr. 3.8 Simulace jednoduchého relaxačního oscilátoru (2 výstupy).....	25
obr. 3.9 Relaxační oscilátor s tranzistorem	26
obr. 3.10 Základní obvod VCA s optočlenem.....	27
obr. 3.11 Základní obvod VCR s použitím JFET	27
obr. 3.12 Relaxační oscilátor s průběhy obdélník, trojúhelník.....	28
obr. 3.13 Napětově řízený zesilovač VCR s použitím napěťových sledovačů	29
obr. 5.1 Schéma simulačního obvodu delay	31
obr. 5.2 Simulace obvodu delay (vstupní signál)	32
obr. 5.3 Simulace obvodu delay (poměry potenciometru level a feedback)	32
obr. 5.4 Simulace obvodu delay (poměr potenciometru time)	33
obr. 5.5 Schéma simulačního tremolo obvodu (trojúhelník, obdélník)	34
obr. 5.6 Simulace tremolo: výstupní signály z LFO pro 14 Hz	34
obr. 5.7 Simulace tremolo: výstupní signály z LFO pro 0,8 Hz.....	35
obr. 5.8 Simulace tremolo (maximální hloubka modulace)	35
obr. 5.9 Simulace tremolo (střední hloubka modulace)	36
obr. 5.10 Simulace tremolo (minimální hloubka modulace)	36
obr. 5.11 Simulace tremolo (minimální rychlost LFO).....	37
obr. 6.1 Schéma měřeného obvodu delay	39
obr. 6.2 Měření obvodu delay (vstupní pulsní signál).....	39
obr. 6.3 Měření obvodu delay (výstupní signál dry)	40
obr. 6.4 Měření obvodu delay (výstupní signál dry + wet).....	40
obr. 6.5 Měření obvodu delay (výstupní signál dry + wet + feedback)	40
obr. 6.6 Měření obvodu delay (poměr potenciometru time)	41
obr. 6.7 Schéma měřeného obvodu tremolo	42
obr. 6.8 Měření obvodu tremolo: výstupní signály LFO pro 14 Hz	42
obr. 6.9 Měření obvodu tremolo: výstupní signály LFO pro 0,9 Hz	43
obr. 6.10 Měření obvodu tremolo (maximální hloubka modulace)	43
obr. 6.11 Měření obvodu tremolo (střední hloubka modulace).....	44
obr. 6.12 Měření obvodu tremolo (minimální hloubka modulace)	44
obr. 6.13 Měření obvodu tremolo (minimální rychlost LFO)	45
obr. 8.1 DPS vrchní strana (top) a spodní strana (bottom).....	48
obr. 8.2 Efektový pedál - konstrukce	49
obr. 8.3 Efektový pedál - osazení.....	50

ÚVOD

Úkolem této bakalářské práce je seznámení se s principem, vlastnostmi, jednotlivými bloky a parametry kytarových efektů typu delay a tremolo. Dále se práce zabývá prostudováním možností jejich vzájemné kombinace a zaměření se na netypické řazení nejprve delay a poté tremolo. Je zde řešen návrh koncepce a také obvodové schéma tohoto multieffektu v analogové podobě. Správná funkce obvodu a velikosti obvodových prvků je prověřena počítačovou simulací v programu LTspice. Následně je zde řešena konstrukce efektu, změřeny jeho vlastnosti, které jsou porovnány se simulací. Dále jsou zde hodnoceny zvukové možnosti efektu, jež jsou porovnány se standardním řazením (tremolo – delay).

1. Kytarové efekty

1.1 Kytarový efekt obecně

Jedná se o zařízení, která podle určitých parametrů ovlivňují výsledný zvuk produkovaný hudebním nástrojem. Tento efekt je v signálové cestě obvykle vřazen mezi hudební nástroj a výsledný reprodukováný zvuk. Existuje mnoho druhů efektů, které pracují na různých principech ovlivnění signálu. Efektové pedály jsou nejčastěji realizovány ve formě kovových šasi, ve kterých se nachází deska plošných spojů s analogovým nebo číslicovým obvodem. Efekty je možné používat i skrze různé pluginy, kdy se jedná o čistě naprogramovanou simulaci efektů.

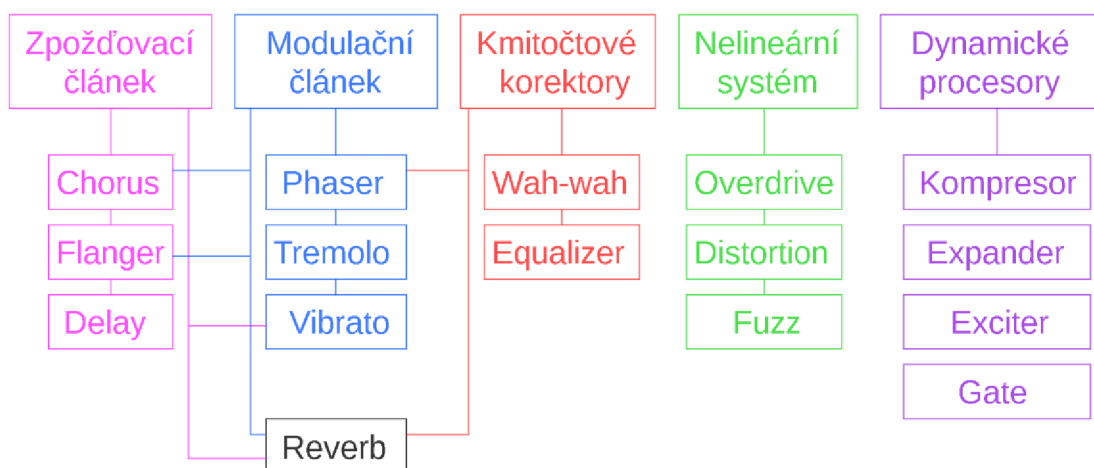
Analogové zpracování efektů má historicky delší vývoj a je často náročnější a dražší na výrobu oproti číslicovému zpracování. Má však obvykle výhodu skrze věrnější a příjemnější zpracování zvukového signálu.

Číslicové zpracování nabízí více možností ve zpracování signálu, je méně náročné na výrobu a v některých obvodech má nezastupitelnou roli např. v efektech s vysokým zpožděním nebo efekty pracujícími s algoritmy. Číslicové efekty jsou však pro náročnější hudebníky nedostačující, jelikož nedokážou plně zastoupit roli analogových obvodů v určitých typech efektů.

1.1.1 Typologie efektů

Typologie a rozdělení efektů do skupin bohužel není nijak standartizované, avšak členění je velice podstatné pro vhléd a pochopení celé problematiky kytarových efektů. V odborné literatuře se efekty popisují z různých úhlů pohledů. V této práci se budou efekty členit podle obvodových prvků v efektech. K jejich pochopení budou sloužit bloková schémata. Práce se zabývá především zpořďovacími a modulačními skupinami efektů, proto budou detailněji rozebírány pouze tyto dvě skupiny.

Typologie na obr. 1.1 pomůže se rychleji zorientovat v problematice efektů a jejich rozdělení. Jedná se o základní rozdělení, které třídí nejčastější efekty a jejich kombinace. V praxi vzniká mnoho dalších kombinací skrze obvodové prvky a vznikají tak nestandardní efekty a multiefekty, kterými se však tato práce nezabývá [1].



obr. 1.1 Typologické rozdělení kytarových efektů

1.2 Efekty se zpožd'ovací linkou

1.2.1 Efekty s dynamickým zpožděním

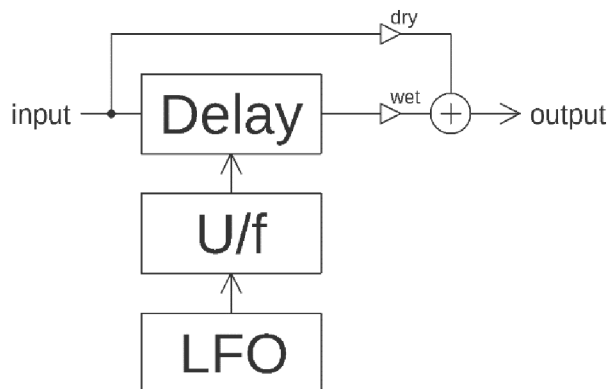
Tyto efekty obvykle používají nějaký druh modulace, která ovlivňuje zpožd'ovací větev a tím vznikne časově proměnné zpoždění.

Chorus

U tohoto efektu se vstupní signál skrze LFO (nízkofrekvenční oscilátor) a zpožd'ovací článek lehce zpožd'uje a rozlad'uje. Tento signál je následně sečten se signálem přímé větve. Tím se vytvoří iluze více hrajících nástrojů, které jsou lehce rozladěny. Blokové schéma jednoduchého jednokanálového chorusu je vidět na obr. 1.2 níže.

Efekt obsahuje LFO, který mění dobu zpoždění mezi 1 až 30 ms [2]. LFO, jak z názvu vyplývá může nabývat různých průběhů pro nižší kmitočty maximálně několika desítek Hz. U/f je převodník sloužící jako napětím řízený generátor obdélníkových kmitů. Tyto kmitů pak taktují přenos v posuvném registru, který obsahuje zpožd'ovací člen (delay).

Tento efekt bývá také různě modifikován, vznikají pak efekty typu vícefázový chorus nebo stereofonní chorus. Zde je uveden pouze základní typ.

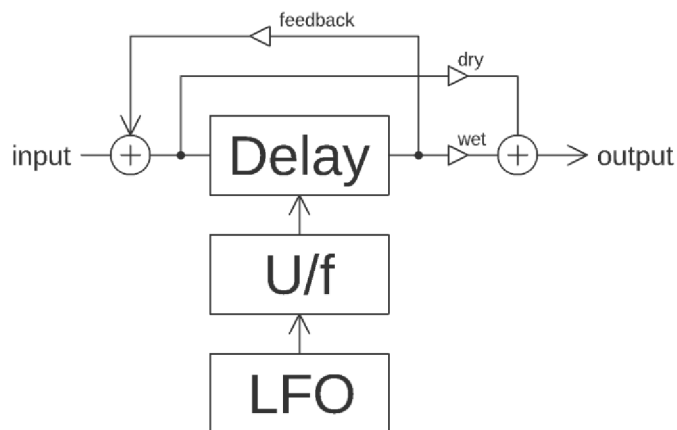


obr. 1.2 Jednokanálový chorus

Flanger

Blokově se jedná o efekt chorus, který je rozšířený o zpětnovazební větev. Charakter zvuku je dán sečtením rozladěného a zpožděného signálu k původnímu. Velikost zpoždění se mění v rozsahu 1 - 15 ms.

Efekt Flanger má tedy nový ovládací prvek, kterým je možné měnit velikost signálu zpětnovazební větve (feedback) [3].



obr. 1.3 Jednakanálový Flanger

1.2.2 Efekty se statickým zpožděním

Obecně všechny efekty založené na statickém zpoždění řadíme do skupiny delay efektů (zpožďovacích efektů). Prodávané efekty pod názvem delay obvykle umí simulovat jakýkoliv z uvedených efektů, tedy echo a slapback. Echo a slapback jsou pak názvy pro konkrétní parametrická nastavení efektu delay. Looper do této skupiny nespadá, protože spíše využívá uložení zvuku do paměti, než klasické zpožďovací čipy [5], [7].

Echo (Ozvěna)

Zpoždění linky u efektu echo bývá od 50 ms do přibližně 500 ms, přičemž maximální doba zpoždění není přesně stanovena. Pro správný charakter efektu je nutné využití zpětné vazby. Echo se dá různě modifikovat a vzniká tak mnoho různých efektů na podobném principu (stereo echo, infinite echo...). Echo je díky rozsahu nastavení a zvuku nejpoužívanějším typem nastavení v delay pedálech obecně [2]. Blokové schéma je vidět na obr. 2.2.

Slapback

Efekt má stejné blokové schéma jako jednakanálové echo viz obr. 2.1. Zpožďovací článek se však nastavuje na delší dobu zpoždění mezi přibližně 25 až 150 ms. Je nutné doplnit, že doba zpoždění pro slapback není pevně stanovena a některé zdroje uvádí dobu zpoždění až 200 ms [7]. Slapback by ve své podstatě měl obsahovat jediné opakování zpožďovací větve. Zpětná vazba se v tomto efektu tedy nevyužívá.

1.3 Modulační efekty

Modulaci v těchto efektech je myšleno ovládní určitých parametrů skrze nízkofrekvenční oscilátor neboli LFO. Rozlišuje se několik základních typů modulace: frekvenční (FM), amplitudová (AM) a fázová (PM).

Skrze PM se mění fáze původního nosného signálu. Změna fáze je závislá na amplitudě modulačního signálu. Při změně fáze se na výstupu mění kmitočet nosného signálu, avšak amplituda zůstává stejná. Fázovou modulaci využívá hlavně efekt Phaser.

AM mění zesílení původního signálu. Podle nastavení LFO se konstantně mění průběh a rychlost zesilování a zeslabování původního signálu. Fáze a frekvence původního signálu se nemění.

FM mění kmitočet původního signálu závisle na nastavení LFO. Kladné půlvlny LFO obvykle zvyšují frekvenci původního signálu v závislosti na okamžité hodnotě. Záporné půlvlny naopak frekvenci původního signálu snižují. Frekvence se tedy mění v závislosti na okamžité hodnotě modulačního signálu.

Některé literatury řadí efekty Chorus a Flanger spíše mezi modulační efekty. Tyto efekty využívají jak zpožďovacího článku, tak modulace. Pro účely této práce jsou tyto efekty rozděleny podle typologie na obr. 1.1. Není však chybou, pokud jiná literatura řadí Chorus či Flanger mezi efekty modulační [9].

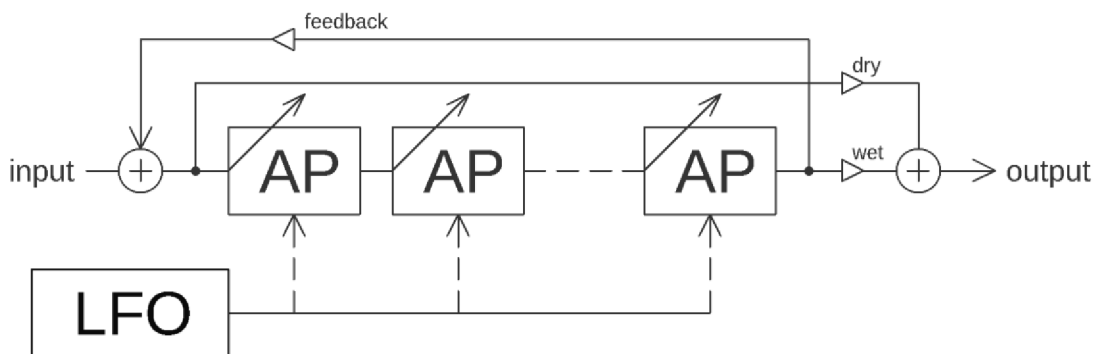
Phaser

Patří ke konstrukčně složitějším efektům. Zvuk lze charakterizovat jako „vlnitý a dýchající“, často se využívá ke kytáře, baskytáře či saxofonu.

Jelikož je efekt složitějšího charakteru, k pochopení funkce bude dobře sloužit blokové schéma na obr. 1.4.

Základní efekt obsahuje přímou větev a efekťovou větev skrze all-pass (AP) filtry. Pro realizaci efektu se využívá mezi 4 až 12 AP filtry, jejichž počet ovlivňuje následný tvar hřebenového filtru po sečtení s přímou větví. AP filtry propouští signál nezměněný, ale mění fázi signálu v závislosti na frekvenci vstupního signálu. V praxi tak vzniká zpoždění signálu, které je přímo úměrné frekvenci vstupního signálu. Zároveň se hřebenový filtr periodicky mění v čase závisle na nastavení LFO. Pro správnou funkci efektu je každý filtr různě naladěný, aby tak mohl vzniknout typický hřebenový filtr pro tento efekt [3].

Do efektu je často zapojena i zpětná vazba, aby se posílil zvukový charakter efektu.



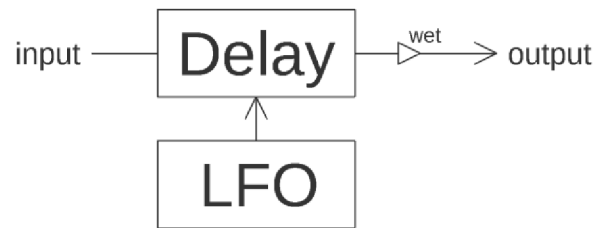
obr. 1.4 Jednoduchý all-pass Phaser se zpětnou vazbou

Vibrato

Tento efekt funguje na jednoduchém principu, který periodicky mění frekvenci vstupního signálu a tím jej lehce rozladí. Efekt v hudbě vzniká poměrně přirozeným způsobem. Jedná se například o techniku jemného pohybu prstu levé ruky na hmatníku nebo techniku při zpěvu.

Efekt je konstruován skrze 2 řídicí obvody. LFO generuje nízkofrekvenční signál obvykle mezi 3 až 12 Hz, který následně rozladí signál efekťové větve. Efekťová větev obsahuje buffer a 1 nebo 2 AP filtry, které lehce zpožďují signál [2]. Efekťovou větev lze také konstruovat jednodušeji skrze zpožďovací obvod BBD, který bude detailněji popsán v kapitole 2.2.1.

Blokové schéma efektu Vibrato na obr. 1.5 odpovídá jednoduššímu obvodu, tedy tomu se zpožďovacím článkem.



obr. 1.5 Jednoduché Vibrato se zpožd'ovacím členem

2. Delay

Delay nebo česky zpoždění je technické zpracování zvukového signálu, které zaznamená vstupní signál do paměti a následně tento signál vyvolá a přehraje. Efekt lze rozdělit na několik částí podle blokového schématu.

Delay se základní zpožďovací jednotkou

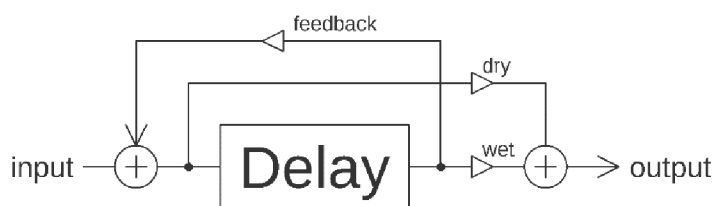
Pro vznik jednoduchého delay efektu je nutné vést odděleně přímou větev a zpožděnou větev. Tyto signály jsou na konci efektového řetězce sečteny a dojde tak k efektu jediného opakování, který je využito u slapback efektu. U tohoto efektu se dá nastavit pouze doba zpoždění (time, delay) a poměr smíchaných signálů dry/wet (mix, level).



obr. 2.1 Delay se základní zpožďovací jednotkou

Delay se základní zpožďovací jednotkou a zpětnou vazbou

Většina efektů má možnost nastavení zpětné vazby. Zpožděný signál z výstupu bloku delay je přiveden zpátky na vstup, kde je přičten ke vstupnímu signálu. Zesílením zpětné vazby lze ovlivnit počet opakování signálu. Pokud je přenos $A_U < 1$, tak se postupně každým opakováním snižuje úroveň hlasitosti, až klesne pod úroveň prahu slyšitelnosti. Pokud je však zesílení zpětné vazby vyšší ($A_U > 1$), dojde k nestabilitě systému a nekontrolovanému zesilování. ($A_U = 1$) způsobí teoreticky nekonečné opakování bez poklesu úrovně hlasitosti. Nastavovaný parametr zesílení se nazývá Feedback nebo Repeats.



obr. 2.2 Delay se základní zpožďovací jednotkou a zpětnou vazbou

Dalšími modifikacemi delay efektů jsou stereofonní nebo tap-tempo schémata. Těmito modifikacemi efektu delay se však tato práce nezabývá a nepracuje s nimi, proto není třeba je blíže či detailně popisovat. Většina monofonních delay efektů vychází z blokového schématu na obr. 2.2 výše. Někdy je do řetězce efektu ještě zařazen ekvalizér nebo vstup pro expression pedál, kterým se může ovládat některý z parametrů.

2.1 Vznik a vývoj efektu delay

2.1.1 Páskové zpoždění (Tape delay)

První zpožďovací efekty vznikly skrze magnetický páskový záznam na konci 20. let 20. století. Princip zápisu zvuku na pásku je poměrně jednoduchý. Psací hlava zmagnetizuje pásku srze přichozí signál a tím se do pásky zapíše. Další hlavy záznam následně se zpožděním čtou a přičítají ho k původnímu signálu. Poslední je v řetězci zařazena mazací hlava, která pásku vymaže. Následně se na vymazanou pásku může znovu zaznamenat signál. Délka zpoždění zde závisí na délce pásky. Opakování závisí na počtu čtecích hlav. Tape delay efekty se více rozšířily kolem roku 1950. Vytvořil se tak typ zpoždění nazývaný slapback (detailněji popsáno v kapitole 1.2.2), ten je slyšet v některých raných rock & rollových nahrávkách např. "That's All Right" od Elvise Presleyho.

Největší inovátoři tape delay efektů té doby byli Charlie Watkins (Copicat) a Ray Butts (Maestro Echoplex).

2.1.2 Polovodičové zpoždění skrze BBD

V roce 1969 F. Sangster a K. Teer z Philips Research Labs vynalezli zařízení Bucket Brigade Device (BBD). Zařízení funguje na principu zpoždění délkou přenosu skrze nabíjecí pakety obsahující tranzistor a kondenzátor. Skrze kondenzátory dojde k fázovému posunu a tím i ke zpoždění signálu. U těchto zařízení je doba zpoždění obvykle omezena do 300 ms, protože při vyšším zpoždění začne docházet k nežádoucímu zkreslení. BBD bývá často označována jako analogová technologie, jedná se však o hybridní technologii (digitální/analogová). Detailnější popsání BBD zařízení je rozebráno v kapitole 2.2.1.

Mezi nejznámější efekty využívající BBD technologie patří EHX Memory Man, BOSS DM-2 nebo Diamond Memory Lane 2, které rozšířilo nastavení rychlosti skrze tap-tempo.

2.1.3 Digitální zpoždění

Digitální zpoždění funguje na principu vzorkování signálu skrze AD převodník a následný zápis digitálního signálu do paměti. Z této paměti je následně vyvolán v závislosti na délce zpoždění. Modifikace signálu se obvykle provádí v digitálním prostředí. Sečtení zpožděného a přímého signálu se může provést před nebo až za DA převodníkem.

Digitální zpožďovací linky odstranily většinu nevýhod BBD čipů, nicméně v době svého vývoje byly velice drahé a většina hudebníků stále preferovala BBD technologii pro zpoždění. Digitální zpožďovací efekty můžou nabývat až několikasekundových zpoždění, nekonečných opakování bez jakéhokoliv zkreslení původního signálu. Nicméně mnoho hudebníků digitální zpoždění považuje za poněkud „sterilní“ a stále preferují starší typy zpožďovacích efektů, které díky nedokonalostem obvodů způsobují osobitý charakter zvuku.

Mezi nejznámější efekty využívající digitální zpoždění patří BOSS DD-2 1984 (první kompaktní digitální delay) nebo Line 6 DL4 (stomp boxový delay, který dokáže simulovat velkou škálu nejznámějších delay pedalů) [8].

2.2 Delay čipy

2.2.1 Zařízení BBD (Bucket-Brigade Device)

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1.2, BBD je zařízení schopné tvořit časové zpoždění signálů. Tato zařízení je vyráběno v podobě integrovaných obvodů a obvykle obsahuje i LFO a dvoufázové hodiny. BBD obvody fungují na principu nábojově vázaných struktur CCD (Charge Coupled Devices). Obvod se skládá z paketů, které obsahují kondenzátory a tranzistory (bipolární nebo unipolární MOSFET). Tyto pakety si postupně předávají vstupní signál ve formě náboje. Celý obvod potom funguje jako analogový posuvný registr. Velikost zpoždění záleží na počtu těchto paketů a rychlosti posuvného registru. Na obr. 2.3 je uvedeno základní schéma, které již bylo technologicky vylepšeno a v dnešní době se nevyužívá. Je však vhodné pro pochopení funkce obvodu BBD.

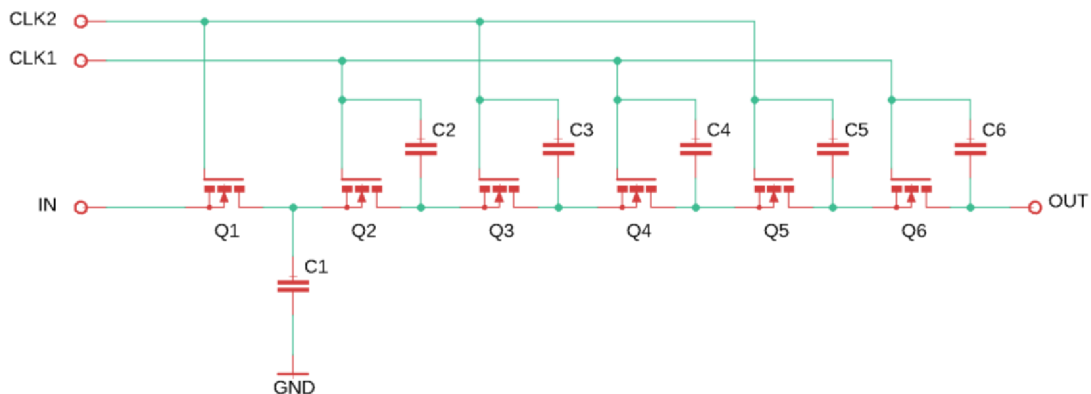
Generátor hodinového signálu Clock

Jedním ze základních prvků zpožďovacích čipů jsou oscilační generátory, které vytváří 2 komplementární hodinové signály. Nejčastěji se jedná o obdélníkový tvar s frekvencí, jejíž hodnota dodržuje Nyquistův-Shannonův vzorkovací teorém: $f_{clock} > 2f_{vstup}$, kde f_{clock} označuje vzorkovací frekvenci a f_{vstup} maximální frekvenci ve vstupním signálu [13]. Těmito hodinovými signály je udána frekvence vzorkování vstupního signálu, který se následně ukládá do paměti. Při špatně zvolených vzájemných hodnotách f_{clock} a f_{vstup} může dojít buď k podvzorkování, tedy nedodržení vzorkovacího teorému nebo převzorkování, kdy zpožďovací čip nedokáže zaznamenávat tak vysoké f_{clock} frekvence. Aby vzorkovací kmitočet nebyl příliš velký, prochází vstupní signál tzv. anti-aliasingovým filtrem typu dolní propust. Pokud se zařízení využívá pro audio aplikace, může být toto kmitočtové omezení poměrně velké bez negativních následků na kvalitu zvuku.

Funkce základního obvodu BBD (obr. 2.3)

IN je vstupní signál a OUT zde vyjadřuje výstupní zpožděný signál, který je diskrétní v čase kvůli vzorkování. CLK1 a CLK2 (Clock 1 a Clock 2) slouží k zaznamenání vzorku napětí o určité délce [12].

Pokud je na CLK2 vyšší úroveň řídicího signálu, vstupní signál IN se přes otevřený Q1 dostane na kondenzátor C1 a nabije ho na určitou úroveň. Následně úroveň na CLK2 klesne a na CLK1 vzroste. Tím se otevře Q2 a úroveň signálu z C1 se přenesou na kondenzátor C2. Dále se zase změní úroveň řídicího signálu na CLK1 a CLK2, tím se vstupní signál dostane na další kondenzátor v řetězci. Proces se dále opakuje obvodem, dokud se na výstupu OUT neobjeví stejné napětí.

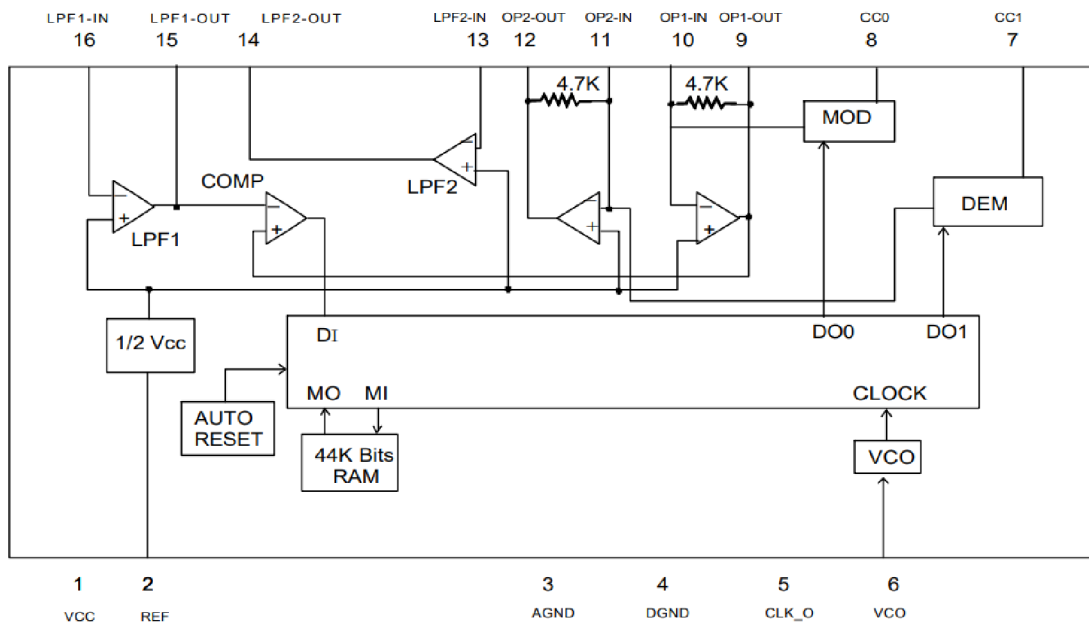


obr. 2.3 Základní schéma unipolárního MOS BBD obvodu [12]; upraveno

2.2.2 Integrovaný čip PT2399

V této práci bude pro delay efekt použit digitální CMOS delay procesor PT2399 vyvinutý společností Princeton Technology Corp. [10]. Tento čip se stal velmi populárním pro možnost emulace zpožďovacích obvodů, které jsou založeny na technologii BBD. Čip je jednoduchým a relativně levným prvkem pro kytarové efekty. Zároveň lze různě modifikovat a ke své jednoduchosti má poměrně dobré zvukové vlastnosti. Tento čip je proto používán v mnoha zpožďovacích nebo modulačních efektech, např. Death By Audio Echo Dream 2 nebo EarthQuaker Devices Space Spiral.

Výrobce deklaruje možnost vysoké vzorkovací frekvence 44 kB paměti RAM, nízké zkreslení (THD < 0,5 %) a také dostatečný odstup od šumu (No < -90 dBV) [10], [15]. Výrobce také uvádí blokové schéma popisující integrovaný obvod PT2399 viz obr. 2.4.



obr. 2.4 Blokový diagram čipu PT2399 [10]; převzato

Vstupy a výstupy PT2399 čipu

Pin 1 (Vcc): PT2399 je napájen 5 V. Napájení by mělo být realizováno skrze pevný zdroj nebo lineární stabilizátor napětí. Maximální odebíraný proud je přibližně 30 mA.

Pin 2 (Ref): značí analogové referenční napětí ($1/2 V_{cc}$), tedy 2,5 V. Toto napětí v obvodu slouží jako virtuální nula kvůli napájení OZ prvků.

Pin 3, 4 (GND): je vývod analogového a digitálního uzemnění.

Pin 5 (Clock): je výstup taktovací frekvence Clock, která je generovaná VCO. Výstup slouží pro čistě informační účely o taktovací frekvenci, ale může být použit pro různé externí aplikace.

Pin 6 (VCO): skrze tento vstup se nastavuje frekvence napěťově řízeného oscilátoru VCO. Tato frekvence následně taktuje dvoufázový hodinový signál Clock viz 0. Napětí na vstupu je konstantní velikosti 2,5 V. Taktovací frekvence se tedy nastavuje externím odporem (potenciometrem), jehož velikostí se mění proud. Taktovací frekvence je pak závislá na velikosti vstupního proudu.

Pin 7, 8 (CC0, CC1): vstupy omezují maximální možný proud do IO a jedná se tedy o ochranný prvek

Pin 9 – 12 (OP1, OP2): jedná se o vstupy a výstupy koncových operačních zesilovačů pro modulátor a demodulátor.

Pin 13, 14 (LPF-2): jedná se o výstupní jednotku z demodulátoru již zpožděného signálu. Výstup LPF2-out lze využít pro zavedení zpětné vazby na vstup LPF1-in. Výstupní jednotka po demodulátoru obsahuje 2 OZ. První (výstupy OP2) slouží jako rekonstrukční filtr pro signál z demodulátoru. Druhý OZ je použit jako MFB filtr, který ještě více čistí a vyhlazuje výstupní signál.

Pin 15, 16 (LPF-1): slouží jako vstup pro nosný signál. Vstupní OZ (LPF1) využívá opět topologie MFB filtru dolní propusti, který odstraňuje přebytečné vysoké frekvence. Následuje OZ ve funkci komparátoru, jehož neinvertující vstup je připojen na výstup modulátoru a jeho výstup se zapisuje do paměti. V modulátoru Delta-Sigma je zvukový signál převeden na jednobitový proud logických úrovní.

2.3 Schéma efektu delay

Navrhnuté schéma je rozšířením doporučeného schématu výrobcem [10] o napájecí část, vstupní a výstupní buffer, který se stará o impedanční přizpůsobení přímé a zpožděné větve. Schéma odpovídá blokovému schématu efektu delay na obr. 2.2.

2.3.1 Vstupní buffer efektu delay

Buffer je nutnou součástí velké většiny audio obvodů nebo efektových pedálů. Za použití true bypass spínače jsou buffery využívány jako prvky pro impedanční oddělení přímé a efektové větve. OZ v buffer částech efektových pedálů musí vykazovat hlavně co nejmenší šum, minimální zkreslení a velký odstup signálu od šumu (SNR) při vysokých úrovních zisku.

Dále popisované schéma lze vidět na obr. 2.5. Na začátku řetězce je zapojen CR článek tvořený rezistorem R3 a kondenzátorem C5. Článek tvoří HP filtr s mezním kmitočtem kolem 7 Hz (2.1). Filtr má zamezit vstupu ss složky signálu do obvodu a R3 zároveň nastavuje vstupní impedanci do OZ. Výstupní impedance snímačů z kytary bývá 3 - 20 k Ω . Dalším prvkem je operační zesilovač TL072 v neinvertujícím zapojení [19], [23]. Maximální výstupní napětí snímačů elektrické kytary se v průměru pohybuje kolem 128 mVrms [17]. Bohužel výstupní napětí je závislé na druhu snímače, umístění snímače, útlumu na kabelu, dynamice hry a podobně, proto je velmi orientační. Dobré vstupní úrovně napětí do PT2399 se pohybují mezi 0,5 až 1 Vrms (1,4 až 2,8 Vpp), [11].

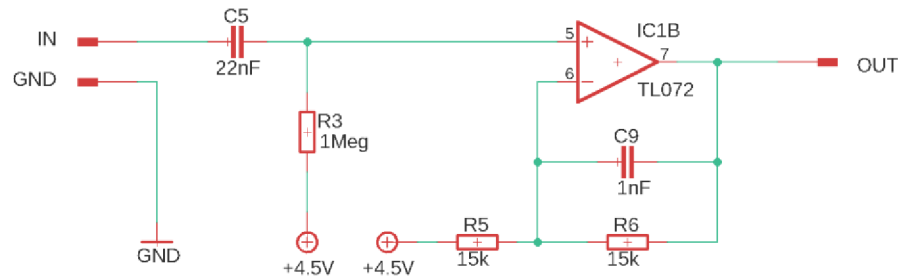
Skrze rezistory R5 a R6 se volí velikost zesílení $A_U = 2$ viz rovnice (2.2), při vyšším zesílení by mohlo docházet k limitaci signálu v čipu PT2399. Kondenzátorem C9 a rezistorem R6 se tvoří DP filtr s mezním kmitočtem 10,6 kHz (2.3). Tímto filtrem se

potlačí vyšší ostré frekvence, které lehce kazí celkový kytarový zvuk. Operační zesilovač lze nahradit i jinými modely od jiných výrobců. Nejčastěji používanými OZ v audiotechnice jsou TL07x, OPA16xx, OPAx134, NE5532, LM386 a další [16].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi * R_3 * C_5} = \frac{1}{2\pi * 1000000 * 22 * 10^{-9}} = 7,23 \text{ Hz} \quad (2.1)$$

$$A_U = 1 + \frac{R_6}{R_5} = 1 + \frac{15000}{15000} = 2 \text{ dB} \quad (2.2)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi * R_6 * C_9} = \frac{1}{2\pi * 15000 * 1 * 10^{-9}} = 10,61 \text{ kHz} \quad (2.3)$$



obr. 2.5 Vstupní buffer efektu delay

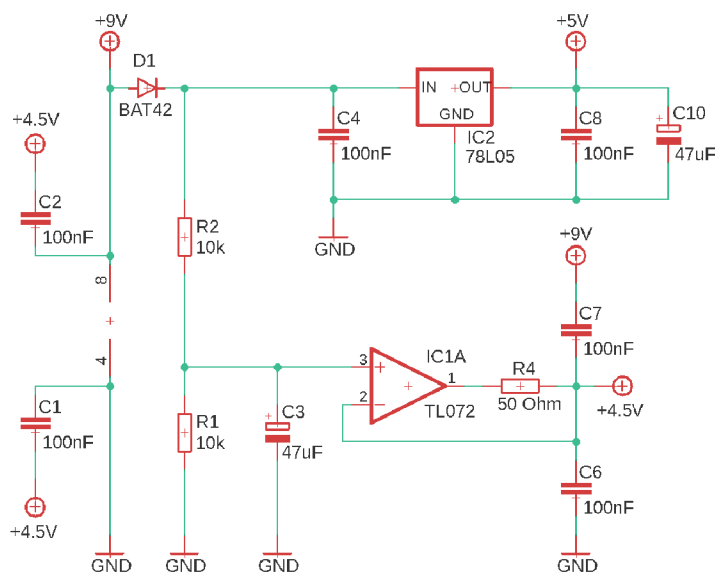
2.3.2 Napájení efektu delay

Menší efektové pedály jsou nejčastěji napájeny ss napětím o velikosti 9 V. K napájení slouží buď baterie, nebo adaptér. Napájení je nutné především pro napájení IO a OZ, které potřebují symetrické napájení. Z toho důvodu je v obvodech vytvořena virtuální (referenční) nula o hodnotě 4,5 V. Následný popis obvodu se vztahuje k obr. 2.6.

Přímo ze zdroje jsou napájeny OZ, kterým jsou také blokovány napájecí přívody skrze kondenzátory C1 a C2. Schottkyho dioda D1 BAT42 slouží k ochraně proti přepólování. Úbytek napětí na diodě je malý a nijak negativně neovlivní zbytek obvodu [20], [22]. Následuje napěťový dělič tvořený rezistory R1 a R2. Dělič vytváří předpětí 4,5 V (2.4) pro operační zesilovače. Následný IC1A zapojený jako sledovač zde slouží jako pevný zdroj referenčního napětí. Rezistor R4 lehce zvyšuje výstupní impedanci a kondenzátory C6 a C7 znovu slouží k blokování napájecích přívodů.

78L05 je lineární stabilizátor, který je levný a vyznačuje se dobrou kvalitou [18]. Stabilizátor zde vytváří pevné vstupní napětí 5 V pro IO PT2399. Všechny kondenzátory kolem 78L05 slouží k vyhlazení výstupního ss napětí a správné funkci stabilizátoru.

$$U_{předp.} = U * \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 9 * \frac{10000}{10000 + 10000} = 4,5 \text{ V} \quad (2.4)$$



obr. 2.6 Napájecí část efektu delay

2.3.3 Zpožd'ovací a zpětnovazební část efektu delay

V uvedeném obvodu dochází k vytvoření tzv. wet signálu. Jádrem celého obvodu tvoří IO PT2399, který je detailněji popsán výše v kapitole 2.2.2.

Levá část

Níže popisované schéma se vztahuje k obr. 2.7. Z napájecí části (popsané v kapitole 2.3.2) je na vstup V_{cc} integrovaného obvodu přivedeno 5 V. Vstup ref tvoří ve vnitřním obvodu IO referenční napětí o velikosti 2,5 V a velkokapacitní kondenzátor C13 odděluje toto napětí od země. Oscilační frekvence VCO se nastavuje skrze velikosti odporu $R8 = 2 \text{ k}\Omega$ a potenciometru $TIME = 22 \text{ k}\Omega$. Hodnoty těchto odporových prvků ovlivní maximální i minimální délku zpoždění, ale také zkreslení signálu. Pro tento efekt není nutné nastavovat velkou dobu zpoždění. Výrobce uvádí jednoduchý vzorec pro výpočet zpoždění viz (2.5). Pro tyto hodnoty odporů bude maximální zpoždění 304 ms (2.7) a minimální zpoždění 53 ms (2.6), [10]. Tím dojde k minimálnímu zkreslení zpožděvaného signálu a zároveň dodržení vzorkovacího teoremu. C11 a C12 fungují jako ochranný prvek omezující maximální možný proud protékající IO.

$$\tau_{delay} = 0,0114 * (TIME + R8) + 29,962 \text{ [s]} \quad (2.5)$$

$$\tau_{delay \min} = 0,0114 * (0 + 2000) + 29,962 = 52,76 \text{ ms} \quad (2.6)$$

$$\tau_{delay \max} = 0,0114 * (22000 + 2000) + 29,962 = 303,56 \text{ ms} \quad (2.7)$$

Pravá část

Signálová vstupní část integrovaného obvodu obsahuje 3 OZ. Nejběžnější možností je použít LPF1 jako filtr dolní propusti pro vstupní (dry) signál a zpětnovazební signál [11]. Zároveň čip obsahuje modulátor sloužící k převedení zvukového signálu na jednobitový proud logických úrovní. Kvůli jednobitovému vzorkování musí být frekvence VCO

mnohem vyšší než frekvence zpožděvaného signálu. Pro filtraci a nastavení zesílení je využito rezistorů R17, R18, R19 a kond. C19 a C22. Za předpokladu, že $R_{17}=R_{18}=R_{19}$ lze použít pro výpočet mezního kmitočtu DP filtru s vícenásobnou zpětnou vazbou zjednodušený vzorec (2.8), [11].

Signálová výstupní část obsahuje 2 operační zesilovače viz obr. 2.4. První OZ OP2_out/in nelze příliš externě nastavovat a funguje zde jako rekonstrukční vyhlazovací filtr pro signál z demodulátoru, který slouží k zpětnému převodu modulovaného signálu na analogový zvukový signál. Druhý OZ LPF2 je znovu nastaven jako DP filtr s vícenásobnou zpětnou vazbou ve výstupní části. Tento filtr má zvolený mezní kmitočet na 2770 Hz (2.9) a je tvořen součástkami R15, R16, C18, C21. Následuje jednoduchý RC člen skrze součástky R20 a C23 (2.10), který výrobce uvádí v doporučeném schématu. C25 slouží jako oddělovací kondenzátor.

Kondenzátory C18 a C19 tvoří s vnitřními rezistory o velikosti 4,7 kΩ DP filtry. Pro zpětnovazební schéma jsou doporučené hodnoty kondenzátorů 100 nF. Tyto filtry snižují nežádoucí vysoké frekvence a digitální šum ve výstupním signálu. Skrze hodnoty těchto kondenzátorů lze také ovlivňovat charakter výsledného zvuku a harmonických složek v něm. Je dobré zvolit hodnoty, které propustí co nejvíce harmonických složek a zároveň utlumí co nejvíce vysokofrekvenčního šumu [11].

$$f_{0 \text{ vst.}} = \frac{1}{2\pi * \sqrt{R_{17} * R_{18} * C_{19} * C_{22}}} = \frac{1}{2\pi * \sqrt{12000^2 * 680 * 10^{-12} * 4,7 * 10^{-9}}} =$$

$$= 7419 \text{ Hz} \quad (2.8)$$

$$f_{0 \text{ výst.}} = \frac{1}{2\pi * \sqrt{R_{15} * R_{16} * C_{18} * C_{21}}} = \frac{1}{2\pi * \sqrt{15000 * 10000 * 2,2 * 10^{-9} * 10 * 10^{-9}}} =$$

$$= 2771 \text{ Hz} \quad (2.9)$$

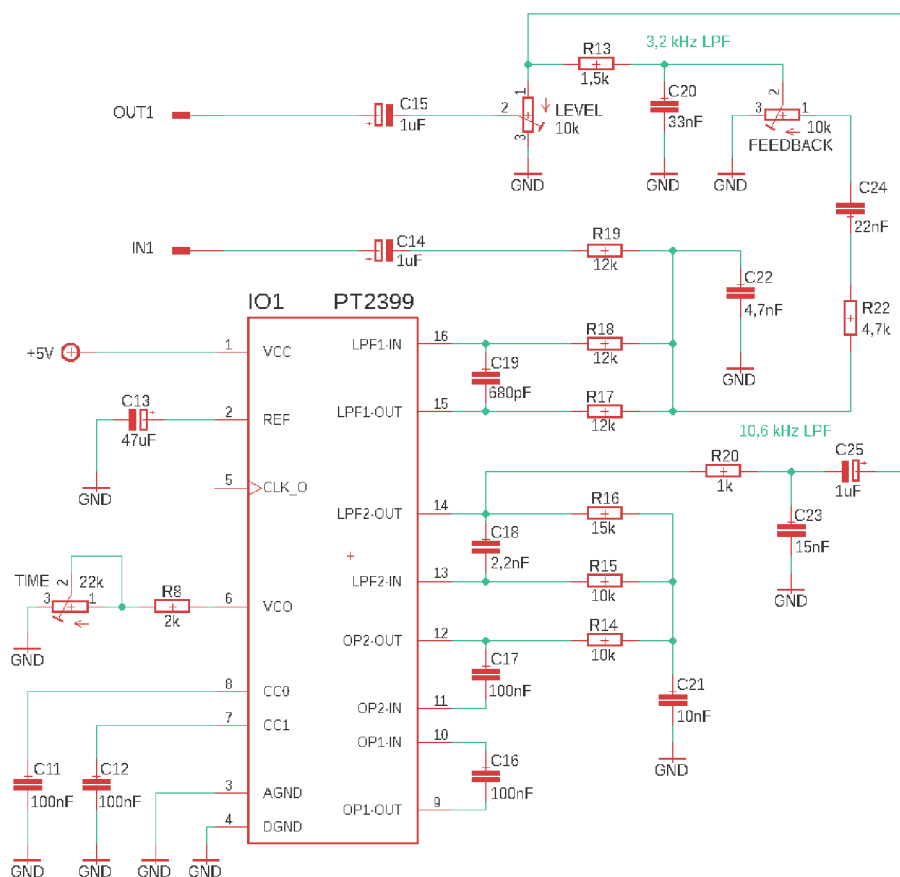
$$f_{0 \text{ výst.DP}} = \frac{1}{2\pi * R_{20} * C_{23}} = \frac{1}{2\pi * 1000 * 15 * 10^{-9}} = 10610 \text{ Hz} \quad (2.10)$$

Zpětnovazební část

Zpožděný signál je následně přiveden na pot. Level nebo na DP filtr skládající se z R13 a C20 (2.11). Za filtrem lze na potenciometru Feedback volit velikost ozvěn ve výstupním signálu. Level potenciometr nastavuje velikost wet signálu, který se následně na výstupním bufferu bude sčítat s dry signálem. Nastavením Feedback potenciometru se mění velikost zpětnovazebního signálu do vstupu čipu PT2399. DP filtr velice ovlivňuje celkový charakter zvuku zpětné vazby. Mnoho výrobců efektů v této části zapojuje nastavitelný potenciometr pro ekvalizaci. Tato práce však volí řešení fixně nastavené dolní propusti s mezním kmitočtem 3,2 kHz. Před vstupem do PT2399 je umístěn HP filtr (2.12), který tvoří součástky R17, R22 a C24. Filtr potlačuje nízké frekvence a simuluje tak zvuk páskového delay efektu, viz kap. 2.1.1.

$$f_{0 \text{ DP}} = \frac{1}{2\pi * R_{13} * C_{20}} = \frac{1}{2\pi * 1500 * 33 * 10^{-9}} = 3215 \text{ Hz} \quad (2.11)$$

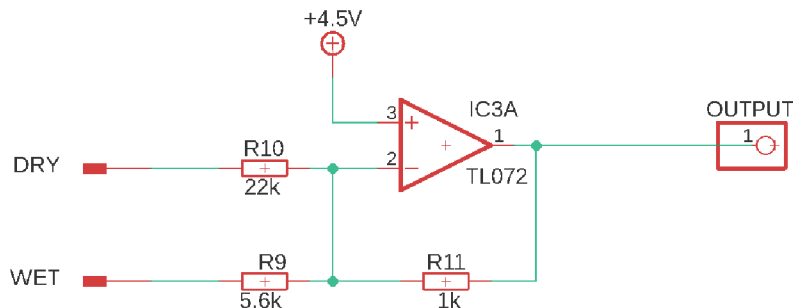
$$f_{0 \text{ HP}} = \frac{1}{2\pi * (R_{17} + R_{22}) * C_{24}} = \frac{1}{2\pi * 16700 * 22 * 10^{-9}} = 433 \text{ Hz} \quad (2.12)$$



obr. 2.7 Zpoždovací část efektu delay

2.3.4 Výstupní Buffer

Výstupní buffer invertuje fázi a je zapojen jako součtový zesilovač, který zároveň zeslabuje výstupní signál. Úrovně obou signálů se poměrově liší v závislosti na potenciometru Level. Fixní poměr zajišťují rezistory R9 a R10 (obr. 2.8). Signál je důležité zeslabit, protože JFET tranzistor v následujícím obvodu tremolo pracuje s nižšími napětími. Výstupní filtraci a impedanci zde není nutné řešit, protože výstupní signál pokračuje rovnou do obvodu efektu tremolo.

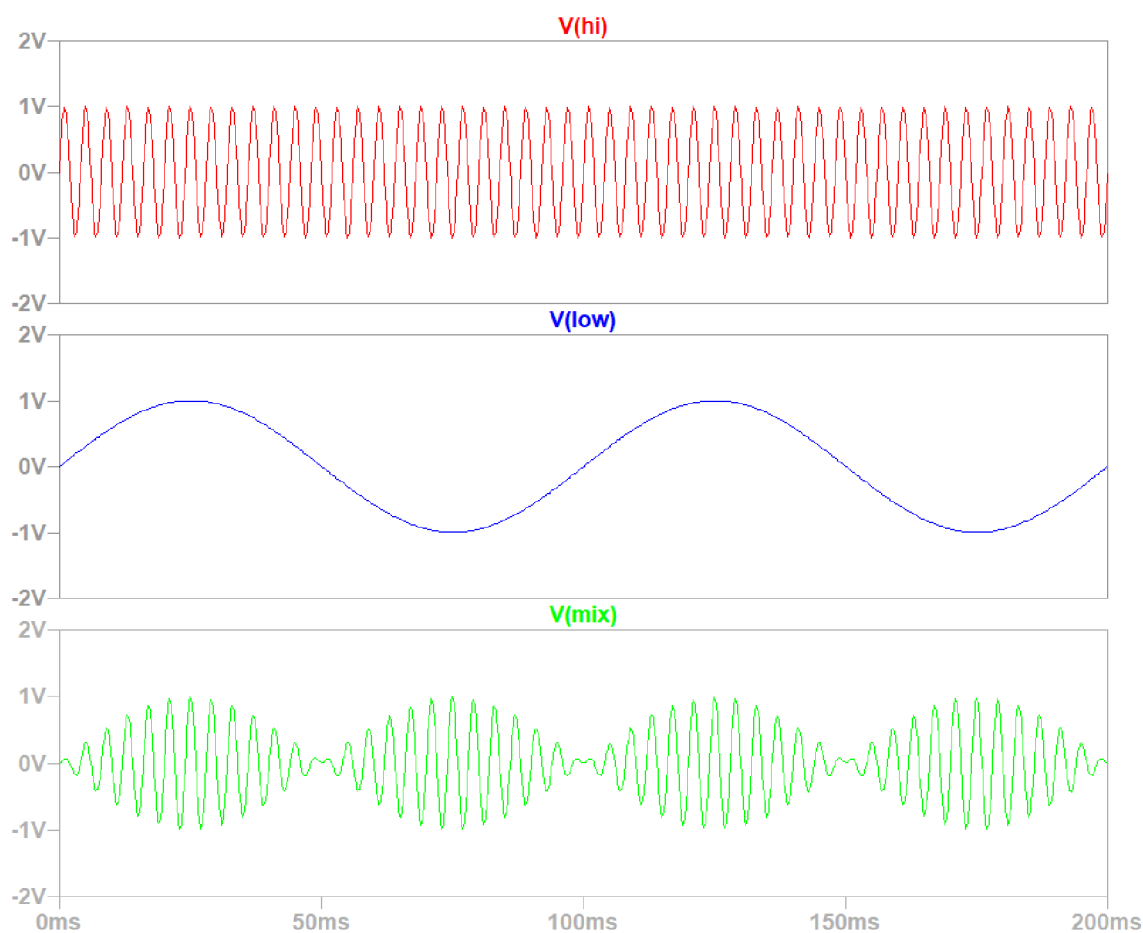


obr. 2.8 Výstupní buffer efektu delay

3. Tremolo

Tremolo je modulační efekt, který periodicky mění hlasitost signálu. Přesněji se jedná o amplitudovou modulaci (AM). Periodická změna amplitudy nosné vlny je řízena nízkofrekvenčním oscilátorem (LFO). Řídící frekvence LFO se nejčastěji pohybuje od desetin Hz do nižších desítek Hz. Oscilátor využívá obvykle základní periodické průběhy, např. sinus, trojúhelník, obdélník nebo pila. V moderních efektech bývají ale také používány nezvyklé periodické nebo náhodně generované průběhy.

Pro rychlejší pochopení funkce efektu tremolo je zde znázorněn průběh amplitudové modulace na obr. 3.1. $V(\text{hi})$ je tzv. nosný signál, který znázorňuje např. signál z kytary nebo jiného hudebního nástroje. Zde se jedná o sinusový průběh o frekvenci 250 Hz. $V(\text{low})$ je modulující nízkofrekvenční signál 10 Hz, kterým bude následně ovlivněn nosný signál. $V(\text{mix})$ je již modulovaná vlna. Její amplituda se mění přesně podle okamžité hodnoty modulujícího signálu. Rychlost LFO v efektu je nastavována parametrem nejčastěji nazývaným Rate nebo Speed.



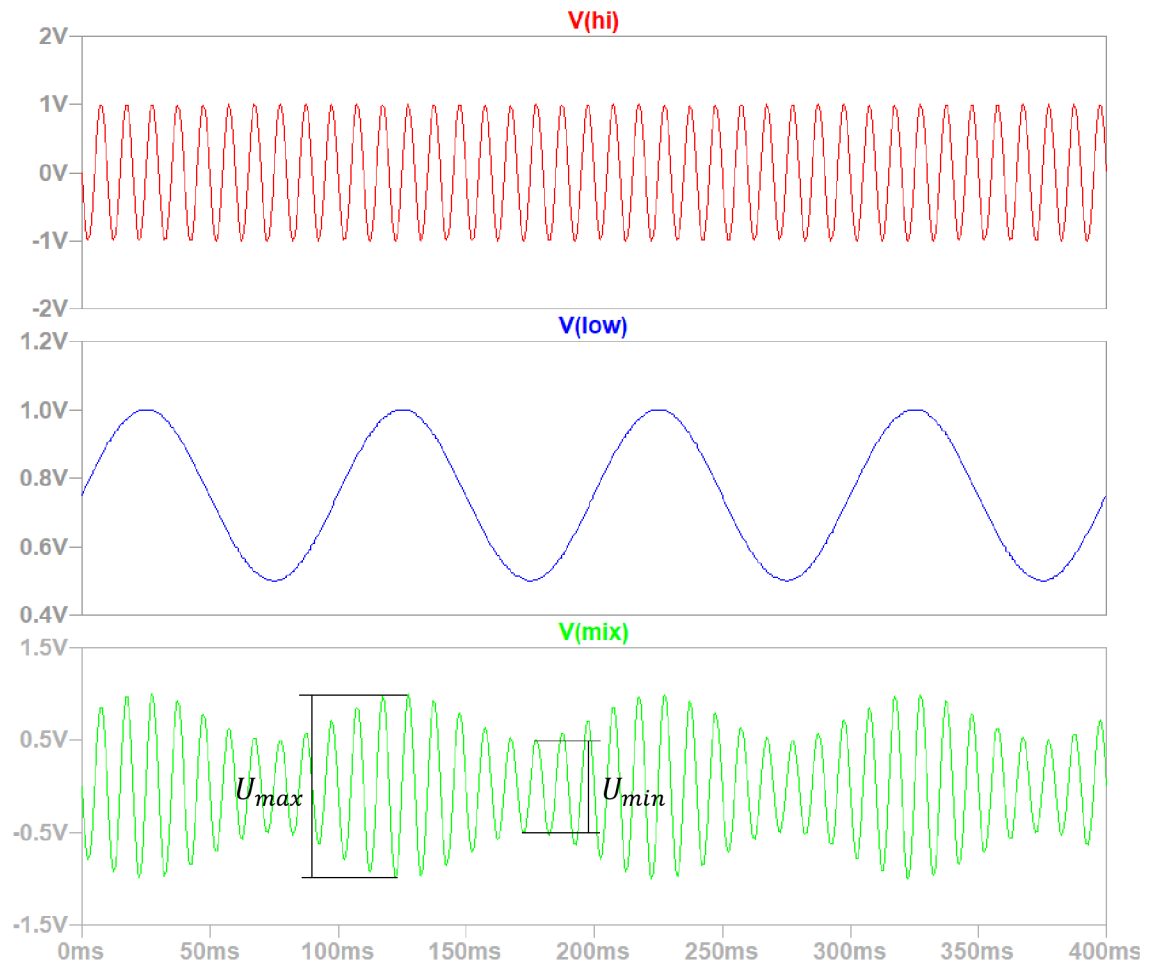
obr. 3.1 průběh amplitudové modulace při maximální modulační hloubce (100 %)

Dalším nastavovaným parametrem je hloubka modulace. Jedná se o velikost změny úrovně amplitudy. Hloubka modulace se nastavuje skrze poměr stejnosměrné složky napětí (offset) a amplitudy v modulujícím signálu. Na obr. 3.1 je nulový offset a dochází tak k maximální hloubce modulace, tedy změně amplitudy o velikosti napětí 1 V. Na obr. 3.2 je jiné nastavení $V(\text{low})$. Offset je nastaven na 0,75 V a amplituda je 0,25 V. Skrze tyto parametry je hloubka modulace poloviční. Na efektových pedálech se parametr

hloubky modulace nejčastěji nazývá Depth nebo Width. Hloubku modulace lze vypočítat podle vzorce (3.1):

$$m = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}} [-] \quad (3.1)$$

Kde m značí hloubku modulace, U_{max} je maximální velikost rozkmitu modulovaného signálu a U_{min} je velikost minimálního rozkmitu signálu. Tento výpočet lze však využít jen u periodicky se měnících průběhů. Hloubka modulace m může nabývat pouze hodnot $< 0; 1 >$.



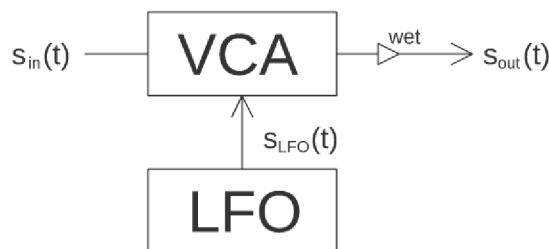
obr. 3.2 průběh amplitudové modulace při poloviční modulační hloubce (50 %)

Výstupní amplitudová modulace lze popsat rovnicí (3.2):

$$s_{out}(t) = S_{in}[1 + m * s_{LFO}(t)] * \cos(2\pi ft) \quad (3.2)$$

$s_{out}(t)$ je výstupní modulovaný signál, S_{in} značí amplitudu nosného signálu, m udává hodnotu hloubky modulace, $s_{LFO}(t)$ je modulační signál řízený LFO, f a t je frekvence a čas nosného signálu.

Základní blokové schéma efektu tremolo zde pomůže k pochopení rovnice i funkce obvodu tohoto efektu viz obr. 3.3. Jediným dosud nepopsaným prvkem blokového schématu je VCA (Voltage-Controlled Amplifier), tedy napětově řízený zesilovač. Tento prvek je popsán v kapitole 3.2.2.



obr. 3.3 Základní blokové schéma efektu tremolo

3.1 Vznik a vývoj efektu tremolo

Vznik tohoto efektu se nedá přesně určit. Zároveň lze tento efekt vytvořit technikou hry na hudební nástroje nebo při zpěvu. První mechanické zpracování efektu se datuje až do 16. století, kdy byl tento efekt vytvořen pro kostelní varhany. Pro tuto práci je však nejdůležitější elektromechanické nebo čistě elektrické zpracování, proto budou blíže popsány jen takto zpracované efekty [25].

3.1.1 Elektromechanické tremolo

Prvním elektromechanickým tremolo efektem a zároveň i prvním kytarovým pedálem na světě je DeArmond 601 Tremolo, které bylo navrženo v roce 1946 jako první samostatné efektové zařízení. Tremolo bylo standardně zapojeno mezi kytaru a zesilovač. Efekt využíval motor k protřepání malé nádoby s elektrolytickou tekutinou. Tato tekutina se v nádobě přelévala a uzemňovala tak různě velké množství signálu. Tím se vždy částečně zkratoval kytarový signál, a tak docházelo k periodické změně hlasitosti. Efekt obsahoval 2 ovládací prvky. Speed na změnu rychlosti a Increase, který udával hloubku modulace. Mezi prvními známějšími hudebníky, kteří začali efekt používat byl kytarista Bo Diddley nebo Muddy Waters, který použil tremolo v písni Flood.

3.1.2 Kytarové zesilovače obsahující tremolo

Velkým pokrokem pro efekty obecně bylo jejich vřazení do kytarových zesilovačů. První kytarový zesilovač obsahující tremolo je Danelectro 1950s Special, které zkonstruoval Nathan Daniel. Na trhu však zvítězily firmy jako Multivox, Gibson nebo Fender. Multivox Premier "66" byl představen v roce 1947. Gibson GA-50T v roce 1948 a první tremolo zesilovač značky Fender byl Tremolux z roku 1955.

Zesilovače v této době nebyly konstruovány polovodičově, ale skrze elektronky. Pro vytváření tremolo efektů byla obvykle využívána jedna elektronka 12AX7. Tremolo efekt v zesilovači Fender Tremolux '55 využívá pro změnu napětí jednu elektronku 12AX7, rezistory a kondenzátory. Obvodem došlo k rozdělení signálu na vysoké a nízké frekvence, zároveň se signál moduloval skrze LFO, které pracuje v opačné polaritě. Výsledný efekt lze zařadit mezi tremolo, vibrato a fázování. Pozdější konstrukce těchto efektů byla realizována skrze optočleny (Fender) nebo polovodičové struktury.

3.1.3 Elektronické tremolo pedály

První efektové pedály se začaly objevovat v 60. letech 20. století, kdy se tranzistory staly široce dostupnými. Efektové pedály se tak staly lehčí, spolehlivější a cenově dostupnější širší řadě hudebníků. Na trh s efekty vstupují firmy Electro-Harmonix, Vox nebo Dunlop. Mnohé z těchto firem byly průkopníky a zásadními inovátory na poli kytarových efektů a většinu dnes běžně používaných obvodových řešení vyvinuly tyto společnosti.

V tremolo efektech dnes již nedochází k zásadním inovacím schémat, spíše se modifikují slavné obvody efektů z minulého století [25].

Slavnější skladby z raných 60. let využívající tremolo ze zesilovačů jsou For What It's Worth (1966) od Buffalo Springfielda nebo pozdější Gimme Shelter (1969) od The Rolling Stones. Později např. Pink Floyd – Money, Greenday – Boulevard of Broken Dreams nebo Blue Effect – Slunečný hrob. Tremolo lze však najít v mnoha skladbách a jedná se o velmi výrazný a často používaný efekt.

3.2 Různá obvodová řešení efektu tremolo

Jak již bylo zmíněno výše v kapitole 3, klasické analogové tremolo se skládá ze dvou částí, LFO a VCA obvodů. Těmito obvody se tvoří celý efekt tremola.

LFO generuje nízkofrekvenční modulující signál a VCA (voltage-controlled amplifier) je napětově řízený zesilovač, jehož vstupem je nosný signál.

3.2.1 Nízkofrekvenční oscilátory (LFO)

Oscilátor je zařízení, které generuje elektrický signál určitého tvaru a kmitočtu, aniž by musel být externě buzen. Nutným prvkem oscilátorů je kompenzační zesilovač s ideálně nastavenou zpětnou vazbou, aby nedocházelo k zesílení či útlumu generovaného signálu. Další část oscilátoru je řídicí obvod, ve kterém se generují kmity. Generátory kmitů mohou vytvářet různé tvary časových průběhů. Tyto průběhy se obvykle rozdělují na harmonické (sinus) a neharmonické (obdélník, pila...). Požadovaná frekvence se nastavuje hodnotami pasivních součástek řídicího obvodu a lze vypočítat skrze Thompsonův vzorec⁵⁴ [26], [27].

Stabilní trvalé oscilace lze dosáhnout pouze za splnění amplitudové a fázové podmínky. Podmínka vzniku kmitů se stanovuje ze vztahu pro výpočet zesilovače s kladnou zpětnou vazbou viz (3.3), (3.4).

Amplitudová podmínka:

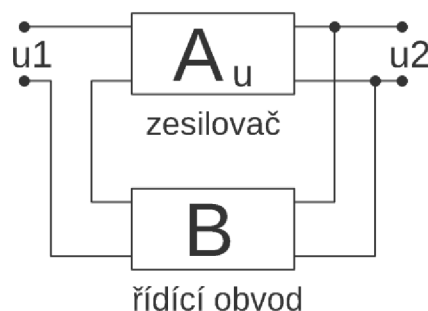
$$A_u * B = 1 \quad (3.3)$$

Kde A_u je zesílení a B označuje přenos zpětné vazby.

Fázová podmínka:

$$\varphi_{A_u} + \varphi_B = k * 2\pi \quad k = (0, 1, 2 \dots) \quad (3.4)$$

Kde φ_{A_u} je fázový posun způsobený tranzistorem a φ_B je fázový posun zpětnovazebního členu. Součet fázových posuvů se musí rovnat 2π nebo jeho násobkům, tím se vytvoří kladná zpětná vazba.

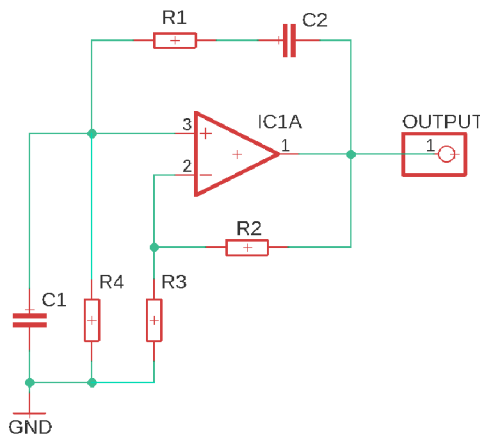


obr. 3.4 Blokové schéma jednoduchého oscilátoru

Existuje mnoho variant oscilačních obvodů, ale většina je zamýšlena pro vysokofrekvenční techniku. Pro nízkofrekvenční aplikace se využívá jednodušších obvodových řešení, které využívají základní pasivní součástky a jednoduché zesilovací struktury. Řídící obvody v kytarových efektech využívají nejčastěji RC členy, cívky se obvykle nevyžívají z důvodu vysoké ceny, váhy a rozměrů.

Harmonický RC oscilátor s Wienovým můstkem

V tomto obvodu je řídicí člen zapojen jako Wienův můstek, který přivádí mezi vstup a výstup OZ rozdílné zpětné vazby. Kladná zpětná vazba ve spojení s OZ vytváří vznik oscilací a frekvenčně nezávislá záporná zpětná vazba zajišťuje stabilitu amplitudy kmitů. Pro tuto funkci je ideální použít operační zesilovač v neinvertujícím zapojení, jehož zesílení se nastavuje skrze rezistory R1 a R2. Frekvence oscilátoru se volí velikostí stejných kombinací obou RC členů [29].



obr. 3.5 Zpětnovazební RC oscilátor s Wienovým můstkem

Generátor neharmonických kmitů

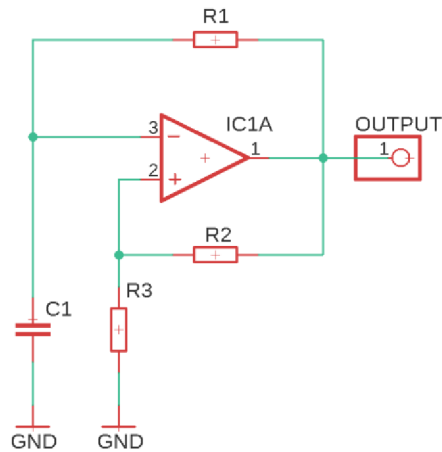
Oscilátory, jež vytváří neharmonické periodické průběhy (obdélník, trojúhelník...) spadají do skupiny relaxačních obvodů. Tyto druhy obvodů nemají stabilní stav, ale neustále periodicky oscilují mezi dvěma mezními stavy. V těchto obvodech je vždy umístěn akumulací prvek. Překlopení mezi mezními stavy je závislé na maximu a minimu naakumulované energie v tomto prvku. Akumulací prvkem bývá nejčastěji kondenzátor nebo induktor. Relaxační oscilátory lze realizovat různými druhy obvodů využívajícími diskrétní součástky nebo skrze čipy, které na výstupech mají již vygenerované neharmonické průběhy. Mezi nejčastější diskrétní řešení patří astabilní klopné obvody (AKO), které fungují díky nepatrným odlišnostem tranzistorů z výroby tak, že mezi dvěma tranzistory dochází k periodickému překlápění závisle se měnícím na úrovni napětí na jejich vstupech. Velmi rozšířené je využití integrovaného čipu NE555, který ke své funkci potřebuje pouze 3 diskrétní součástky. Existují také různé druhy generátorů realizované pomocí logických členů. V této práci bude provedena realizace efektu tremolo skrze relaxační obvod s použitím operačních zesilovačů [29].

Relaxační oscilátor s použitím OZ

Základní generátor čtvercového signálu lze realizovat jako lehce pozměněný Schmittův klopný obvod s použitím buď tranzistorů nebo operačních zesilovačů.

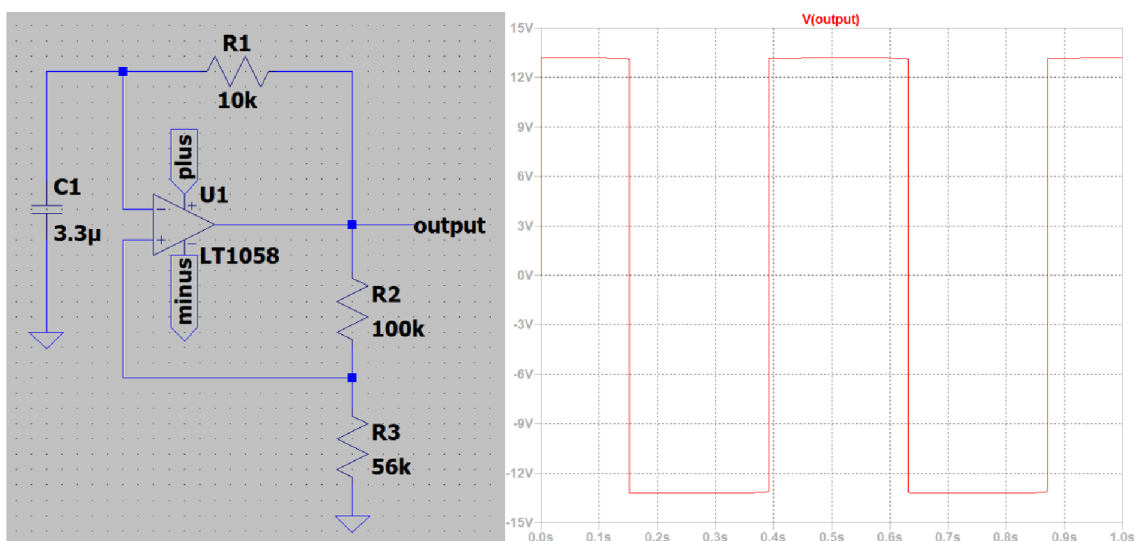
Operační zesilovač je zde zapojen jako komparátor, jehož kladná zpětná vazba obvod

stabilizuje a zároveň zavádí hysterzezi. Jako akumulární prvek zde slouží kondenzátor C1. R1 zavádí zpětnou vazbu z výstupu komparátoru na jeho invertující vstup. Hodnotou R1 lze nastavit rychlost se kterou se bude kondenzátor C1 nabíjet a při realizaci LFO slouží k nastavení oscilační frekvence. Skrze poměry rezistorů R2 a R3 lze nastavit výstupní hodnotu čtvercového signálu a jeho střidu.



obr. 3.6 Jednoduché schéma relaxačního oscilátoru z OZ

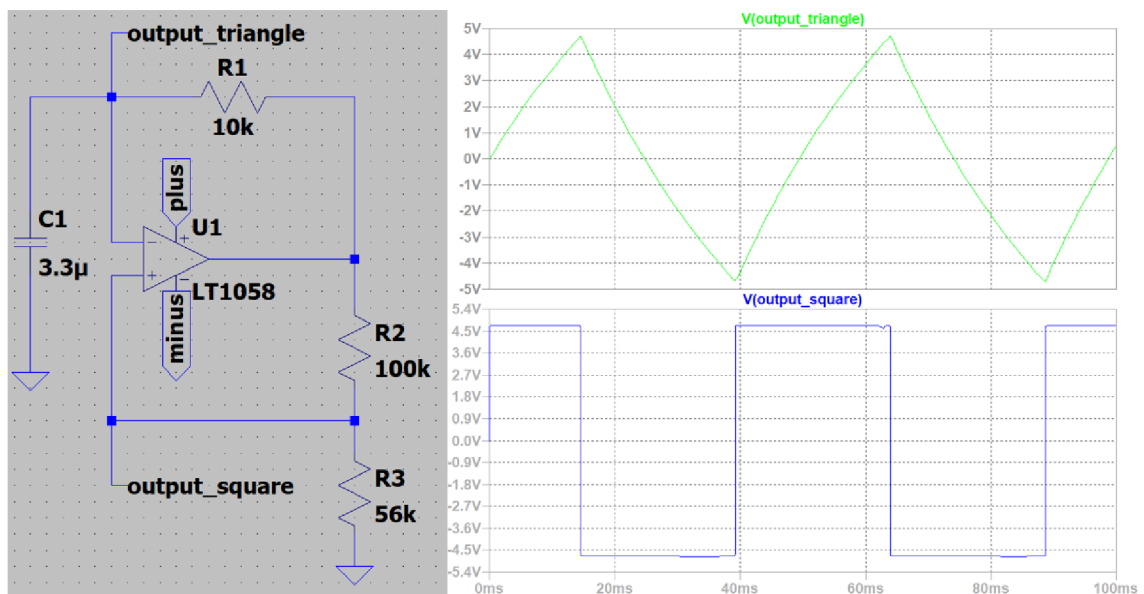
Předpokládáme, že C1 je na začátku děje plně vybitý. Za této podmínky komparátor na svém výstupu vykazuje maximální úroveň napětí, která je daná jeho napájecím napětím. Na grafu z obr. 3.7 je vidět maximální výstupní hodnota napětí, ta je závislá na zvoleném typu OZ. V této chvíli se zároveň přes rezistor R1 začne nabíjet kondenzátor C1. Doba trvání, než se C1 nabije je závislá na velikosti zpětovazebního rezistoru R1. Jakmile úroveň napětí na invertujícím vstupu přesáhne úroveň napětí na vstupu neinvertujícím, výstup komparátoru se překlopí na úroveň napětí opačné polaroty. Nyní se kondenzátor C1 začne vybíjet a tím se začne pomalu snižovat úroveň napětí na invertujícím vstupu komparátoru. Jakmile je úroveň napětí na neinvertujícím vstupu větší než na invertujícím, na výstupu se objeví maximální úroveň napětí a celý proces se opakuje.



obr. 3.7 Simulace jednoduchého relaxačního oscilátoru za použití komparátoru

Při tomto zapojení je možné využít dalších dvou výstupních průběhů. Pokud se za výstupní větev považuje neinvertující vstup komparátoru, průběhem je znovu čtvercový průběh, ale s nižším výstupním napětím. Výstupní větev z invertujícího vstupu se blíží trojúhelníkovému tvaru signálu se stejnou maximální hodnotou napětí jako čtvercový průběh z neinvertující větve. Tento průběh vzniká díky kondenzátoru C1, který se neustále nabíjí a vybíjí. Lépe jsou tyto výstupní signály vidět na obr. 3.8.

Z tohoto druhu zapojení a výstupu vychází mnoho konstrukcí LFO v kytarových efektech obecně. Pro tento druh LFO je nutné použít buffer, aby se výstupy komparátoru nezatížily. Tento buffer je nejčastěji konstruován jako sledovač napětí s použitím OZ. Sledovač napětí signály nezesiluje ($A_u = 1$), ale díky jeho vlastnostem má vstupní impedanci blízkou nekonečnu a minimální výstupní impedanci, která je závislá na druhu použitého operačního zesilovače [28].

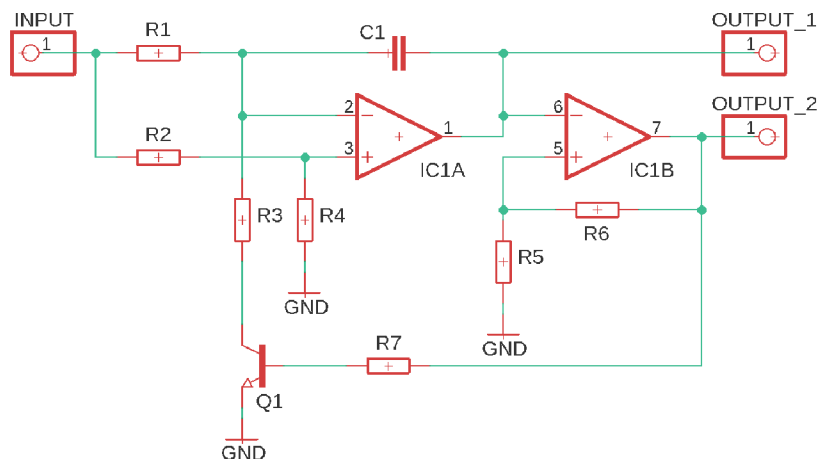


obr. 3.8 Simulace jednoduchého relaxačního oscilátoru (2 výstupy)

Relaxační oscilátor s tranzistorem

Principem funkce je velice podobný předchozímu relaxačnímu obvodu, ale na výstupu nabývá čtvercového a přesného trojúhelníkového průběhu. Na vstup je přivedena stabilní úroveň napětí, první OZ je zapojen jako integrátor a druhý jako komparátor.

C1 se začne nabíjet konstantním proudem a napětí na invertující vstupu OZ1 začne lineárně klesat. V důsledku toho se změní úroveň na výstupu komparátoru a tranzistorem Q1 začne procházet proud. V tomto bodě se C1 začne lineárně vybíjet přes R3 a Q1. Jakmile se C1 začne vybíjet, tak se začne lineárně zvyšovat napětí na výstupu integrátoru, což v určitém okamžiku změní úroveň napětí na výstupu komparátoru. Tato změna napětí poté uzavře tranzistor Q1 a následně se celý proces znovu opakuje. Frekvence na výstupu je pak závislá na poměrech hodnot obvodových prvků. Na výstupu 1 se tedy objevuje trojúhelníkový signál a na výstupu 2 čtvercový signál.



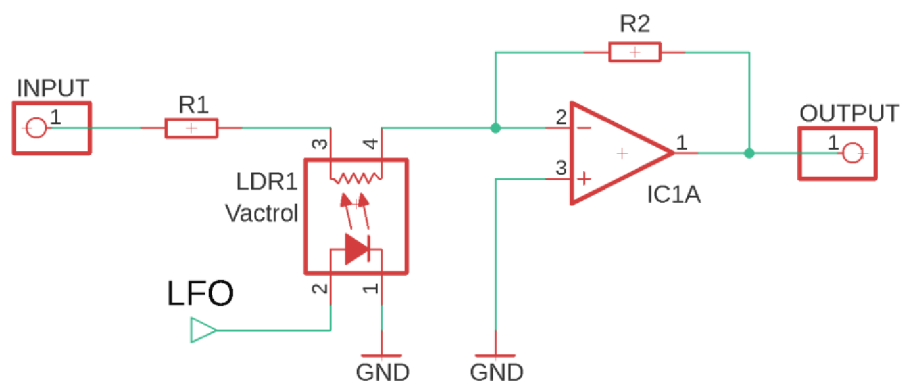
obr. 3.9 Relaxační oscilátor s tranzistorem

3.2.2 Napětím řízené zesilovače (VCA)

Jak již z nadpisu vyplývá, jedná se o druh zesilovačů, jejichž zisk (gain) se mění závisle na řídicím napětí. Tento druh zesilovačů má vstup pro nosný a řídicí modulační signál. Zesilovač následně násobí amplitudy těchto signálů v reálném čase a výsledný signál se objeví na výstupu zesilovače. Řídicí napětí v případě této práce generuje nízkofrekvenční oscilátor. VCA se nejčastěji využívají ve zvukových kompresorech, syntezátorech nebo v obvodech využívajících amplitudovou modulaci. Realizace VCA je omezena na několik málo obvodů, které se běžně využívají. Jedná se o konstrukce LDR (light dependent resistor) a VCR (voltage-controlled resistor). Realizovat VCA lze i skrze operační transkonduktanční zesilovač (OTA), u kterého vstupní napětí produkuje výstupní proud. Tento zesilovač tak pracuje jako proudový zdroj řízený napětím. V dnešní době se však realizace skrze OTA takřka nepoužívá z důvodů proudové výstupní informace [32].

Světelně závislý rezistor (LDR)

Jedná se o jedno z nejčastějších řešení VCA z důvodu snadné realizace a nízké ceny optočlenu LDR (někdy také nazývaného vactrol). Nejpoužívanější konstrukční řešení je skrze invertující OZ, na jehož vstupu je zapojen fotorezistor, na který dopadá světlo z LED diody, jež je řízena z nízkofrekvenčního oscilátoru LFO. Hodnota odporu fotorezistoru je závislá na intenzitě dopadajícího světla na jeho fotobuňku. Ve zpětnovazební větvi bývá často zapojen rezistor (R2), který slouží ke změně zisku na výstupu. Invertující výstup se používá zvláště kvůli možnosti nulového zisku, bohužel se zde obrací fáze o 180° . Obrácení fáze lze vyřešit zapojením invertujícího OZ na vstup pro nosný signál ve funkci vstupního bufferu. Na obr. 3.10 lze vidět základní schéma vyskytující se v mnoha obvodech, které využívají VCA. Tyto obvody jsou však často rozšířeny a modifikovány různými filtry, které mají zamezit vyšším frekvencím dostat se na výstup. Podobné obvodové řešení se často využívá např. v optických audio kompresorech [31], [32].

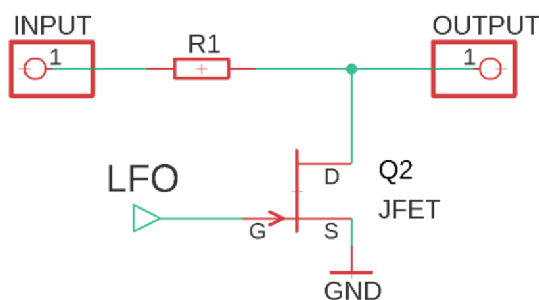


obr. 3.10 Základní obvod VCA s optočlenem

Přenosová charakteristika prvku LDR bohužel není lineární a při použití dojde ke zkreslení přenášeného signálu. Zmíněnou nelinearitu přenosu způsobuje převážně odezva fotorezistoru, teplota a historie použití (paměťový efekt).

Napětově řízený rezistor (VCR)

Jedná se o podobný obvod jako LDR, avšak místo optočlenu se zde používá JFET ve funkci napětově řízeného rezistoru. Toto spojení může být realizováno skrze diskrétní součástky, ale také se vyrábí v integrované podobě. Velikostí odporu R1 se nastavuje velikost zisku (gain). Použití JFET je velice levné a zároveň poskytuje dobrou izolaci mezi řídicím a nosným signálem, také vykazuje poměrně malé zkreslení. Nevýhodou je však nelineární nastavení zesílení a špatná izolace mezi signály za předpokladu, že je řídicí průběh skokového tvaru. Pro použití v audio aplikacích není dobré používat integrované VCR čipy, ale diskrétní součástky z důvodu nižšího šumu [14].



obr. 3.11 Základní obvod VCR s použitím JFET

3.3 Schéma efektu Tremolo

Schéma efektu tremolo navrhnuté v této práci se skládá ze dvou částí. První část je obvod vytvářející řídicí signál (LFO). Druhá část je napětově řízený rezistor s JFET, který násobí nosný a řídicí signál (VCR). Každá část bude popsána samostatně, avšak simulace obvodu budou provedeny na celém funkčním schématu.

3.3.1 Relaxační oscilátor (LFO)

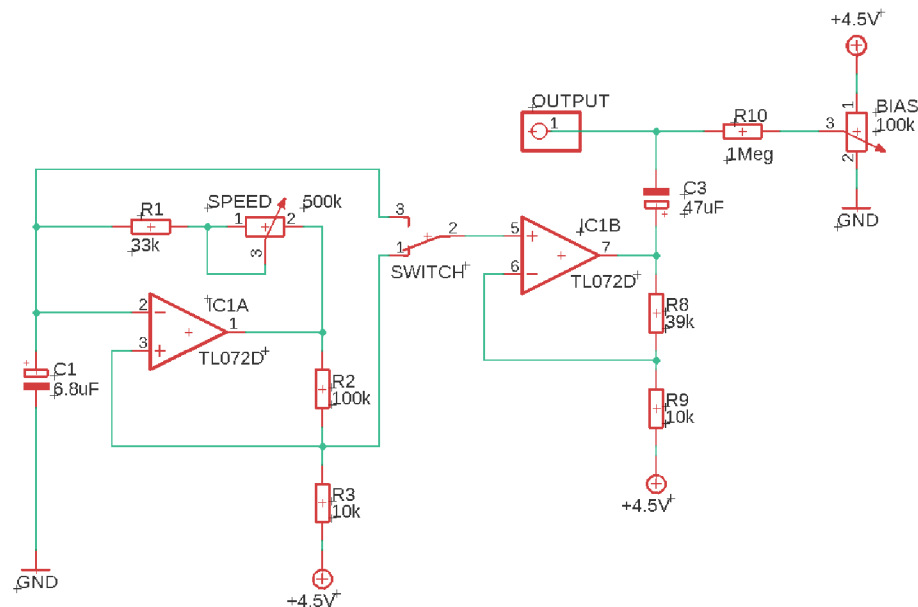
Jedná se o jednoduchý relaxační oscilátor viz obr. 3.6 rozšířený o přepínání mezi tvary průběhů (obdélník, trojúhelník). Jako operační zesilovač byl vybrán TL072, který je

popsán již v kapitole 2.3.1 [19]. Základní část relaxačního oscilátoru obsahuje kondenzátor C1, rezistory R1, R2, R3 a potenciometr Speed o hodnotě 500 kΩ. Skrze potenciometr P1 lze nastavit frekvenci oscilátoru mezi 0,8 Hz a 12 Hz. Následuje přepínač, kde lze zvolit tvar signálu (obdélík, trojúhelník), který bude přiveden na VCR člen. Výstupní neinvertující OZ zesiluje napětí z LFO, pro lepší funkci následujícího obvodu VCR. Kondenzátor C3 zde slouží k oddělení ss složky LFO signálu. Následuje napěťový dělič realizovaný rezistorem R10 a trimrem Bias. Tento dělič slouží k vhodnému nastavení stejnosměrné složky napětí do gate tranzistoru JFET J112 [5].

Zesílení napětí v komparátoru IC1A a neinvertujícím zesilovači IC1B je nastaveno skrze poměry rezistorů R2, R3 a R8, R9 viz výpočty (3.5), (3.6).

$$A_{u1} = 1 + \frac{R_2}{R_3} = 1 + \frac{100000}{10000} = 11 \quad (3.5)$$

$$A_{u2} = 1 + \frac{R_8}{R_9} = 1 + \frac{100000}{15000} = 7,7 \quad (3.6)$$



obr. 3.12 Relaxační oscilátor s průběhy obdélík, trojúhelník

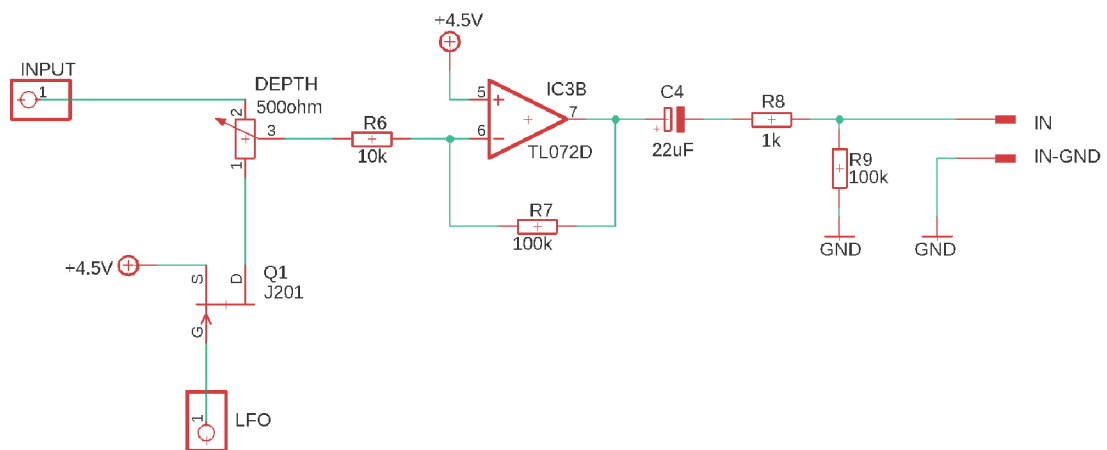
3.3.2 Napěťově řízený zesilovač s JFET

V tomto obvodu dochází k amplitudové modulaci, díky změně okamžité hodnoty odporu JFET, která je řízena skrze modulační signál. Tato závislá změna odporu následně mění okamžitou hodnotu napětí ve větvi nosného signálu. Následný popis se vztahuje k obr. 3.13. Vstupní signál (INPUT) je přiveden z efektu delay rovnou do potenciometru Depth, kde lze uživatelsky nastavit parametr hloubky modulace (Depth, Width). Tento potenciometr nastavuje poměr nosného a řídicího signálu, který bude přiveden na výstup efektu. Zde může nastat problém, že reálné součástky oscilátorů a VCR mohou způsobit vniknutí „klikajícího“ signálu do zesilovače. „Klik“ může vznikat na různých frekvencích a je tedy nejisté jakým způsobem se tento parazitní signál projeví. Použitím filtru lze tento nežádoucí jev částečně nebo zcela odstranit, avšak degraduje se tak nosný signál. Následuje rezistor R6, který určuje vstupní impedanci do OZ a zároveň zesílení výstupního signálu spolu s rezistorem R7. Invertující OZ znovu obrací fázi signálu, který byl ve sčítacím OZ na výstupu efektu delay invertován o 180°. Výstupní kondenzátor C4

tvoří spolu s rezistorem R9 HP filtr (3.7). Dojde tak k odfiltrování nízkých frekvencí spolu se ss signálem z výstupu. Výstupní impedance je dána odpory R8, R9 a výstupním odporem TL072, který je přibližně 100 Ω (3.8). Výstupní impedance obvodu by měla být mezi 1 kΩ až 10 kΩ [24], což je standardní výstupní impedance pro pedály firem Boss a Ibanez. Nižší impedance na výstupu zajistí vyšší úroveň proudu jdoucího z pedálu, což je důležité kvůli případnému útlumu signálu na kabelu.

$$f_{0HP} = \frac{1}{2\pi * R_9 * C_4} = \frac{1}{2\pi * 100000 * 22 * 10^{-6}} = 72,34 \text{ mHz} \quad (3.7)$$

$$Z_{out} = \frac{R_9 * (R_8 + R_{TP072})}{R_9 + (R_8 + R_{TP072})} = \frac{100000 * 1300}{100000 + 1300} = 1283 \Omega \quad (3.8)$$



obr. 3.13 Napětově řízený zesilovač VCR s použitím napěťových sledovačů

4. Kombinace efektů delay a Tremolo

V hudební praxi se lze setkat s třemi nejčastějšími kombinacemi těchto dvou efektů. První a nejčastější kombinace je v řazení tremolo a následně delay. Většina odborné literatury zabývající se řazením efektů udává, že modulační efekty (tremolo) by se měli řadit před zpožďovače (delay). Důvodem je, že hudebník nechce modulovat nebo jiným způsobem upravovat signál za zpožďovacími efekty. Další dvě kombinační řešení využívají nejčastěji experimentální hudebníci, kteří hledají v různých řazeních efektů zajímavé a nezvyklé zvuky. Druhá kombinace řadí efekt tremolo za delay a charakter zvuku se tak stává více psychedelickým. Tohoto zvuku lze jednoduše dosáhnout zařazením efektu tremolo až za delay pedál v efektovém řetězci. Třetí kombinace se v praxi téměř nevyskytuje a je tvořena vřazením tremolo efektu do zpětnovazební větve delay efektu. Tato kombinace musí být konstrukčně řešena již při výrobě efektu. Může se tak jednat o efekt delay, který nabízí externí vstup do zpětnovazební větve nebo o multieffekt, který obsahuje tyto dva efekty takto nestandardně řazené.

4.1.1 Řazení tremolo poté delay

Tento způsob řazení se v hudební praxi vyskytuje nejčastěji. Myšlenka tohoto řazení vychází z předpokladu, že hudebník chce mít na výstupu čistě slyšitelné a nezskreslené ozvěny. Při tomto řazení však vzniká větší napěťový rozkmit signálu při vstupu do zpožďovacího článku. Zpožďovací články jsou často konstruovány pro nižší úroveň napěťového rozkmitu. Z tohoto důvodu se může u některých delay efektů projevit nežádoucí zkreslení na výstupním signálu. Pro zpožďovací čip PT2399 použitý v této práci je ideální rozmezí vstupního napětí mezi 0,5 až 1 V_{rms}. Pokud by však tremolo vřazené před delay efekt bylo nastaveno na maximální hloubku modulace, výstupní signál by vykazoval veliké rozdíly v úrovních napětí.

4.1.2 Řazení delay poté tremolo

Jak bylo již zmíněno, jedná se o nestandardní spíše experimentální druh řazení efektů. Princip tohoto řazení se zdá být přirozenější, protože čistý zpožděný signál je následně amplitudově modulován. To způsobí periodickou změnu hlasitosti již zpožděného signálu. Velké změny zvuku však způsobí rychlost LFO a také velikost hloubky modulace. Díky těmto dvěma parametrům lze úplně změnit celkový charakter zvuku. Velkou roli zde hraje doba zpoždění efektu delay a rychlost LFO efektu tremolo. Pokud dochází k závislé změně těchto parametrů v různých poměrech s tempem hry na nástroj, dojde k vytvoření zajímavého psychedelického zvuku. Důležitým nastavovaným parametrem je také feedback/repeats, kterým lze celý charakter zvuku „rozmazat“. Pokud se parametry level a feedback nastaví ve správném poměru, celý delay obvod může přejít do sebe-oscilace. Sebe-oscilačním efektem spolu s tremolem lze následně dosáhnout velice experimentálních psychedelických zvuků.

4.1.3 Vřazení tremolo efektu do zpětné vazby efektu delay

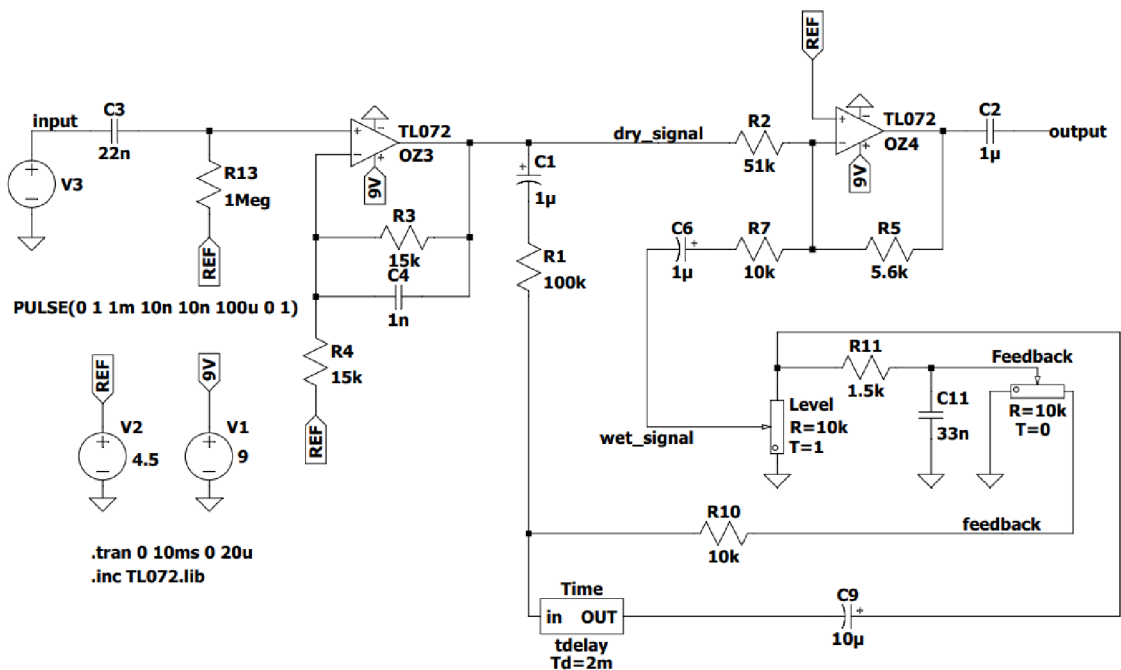
Tato nezvyklá kombinace efektů je spíše teoretický koncept. Jelikož se v praxi s touto kombinací nelze téměř setkat, je velice těžké popsat nebo si představit, jak takový multieffekt funguje. Z konstrukčního hlediska nemusí být těžké tento multieffekt sestavit, ale jistě nastane problém s větším napěťovým zatížením vstupu zpožďovacího článku. Stejně jako v předchozím řazení je lepší měnit závisle LFO s délkou zpoždění v celočíselných poměrech. Při konstrukci je nutné brát zvýšený ohled na minimální a maximální napěťové výchylky, aby nedošlo ke zbytečné degradaci signálu.

5. Simulace

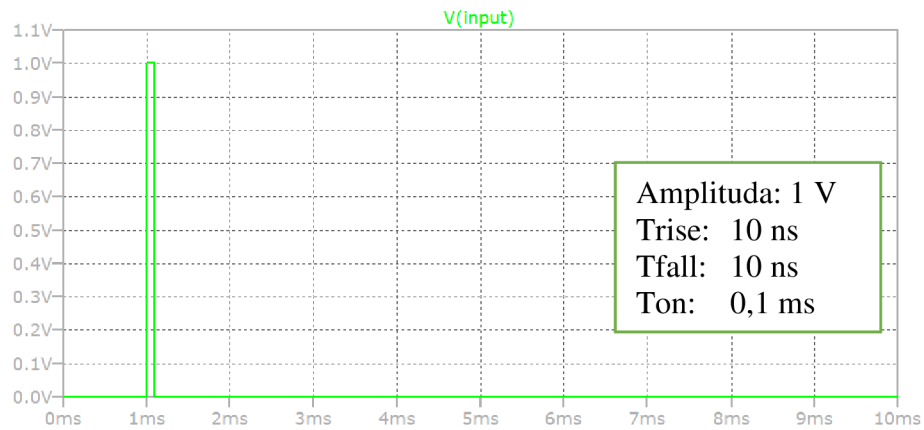
5.1 Simulace efektu delay

Pro simulaci bylo zvoleno jednodušší zapojení zpožďovacího obvodu, protože pro zpožďovací čip PT2399 neexistuje simulační model. Zpožďovací článek byl tedy nahrazen jednoduchým zpožďovacím blokem.

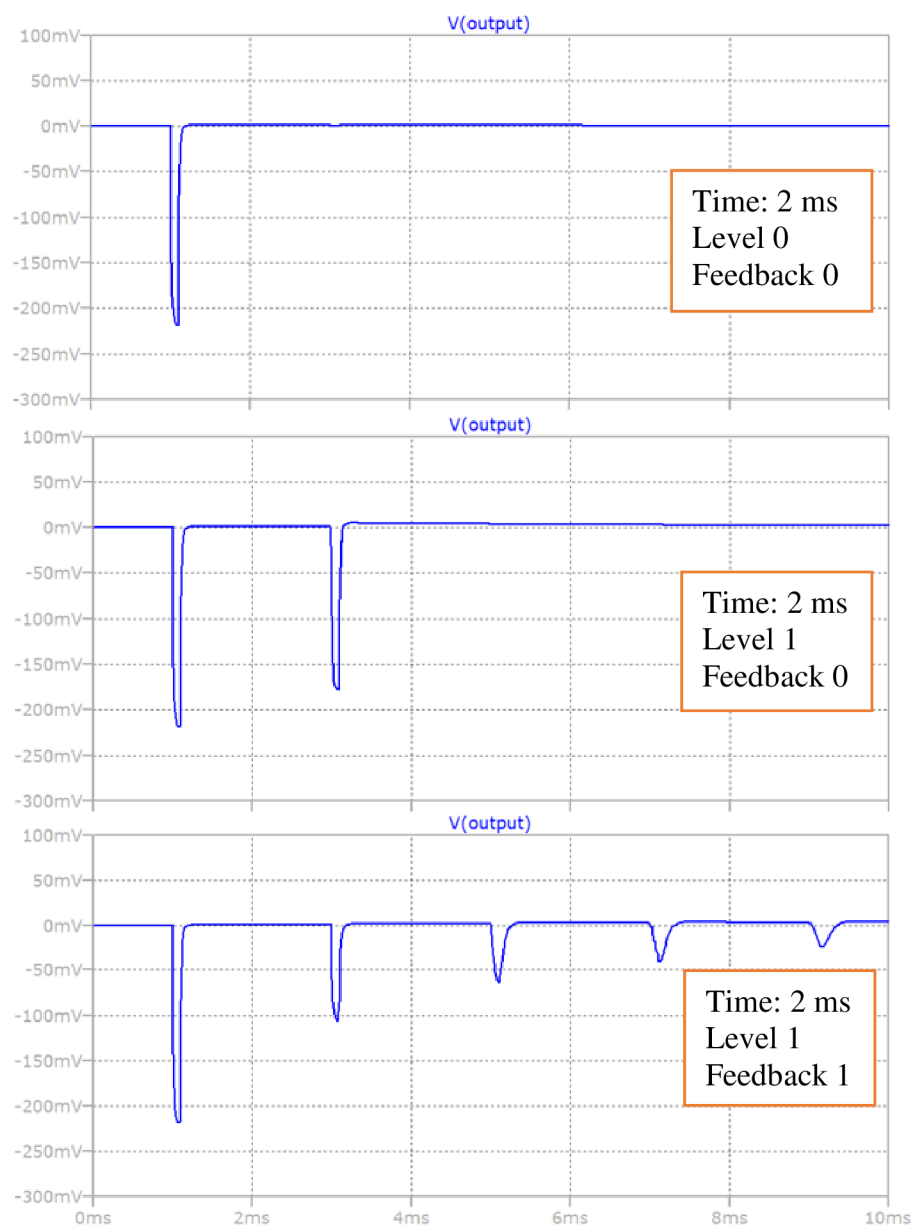
OZ jsou napájeny 9 V a referenční napětí (virtuální zem) je 4,5 V. Na vstup je přiveden pulsní signál s parametry: amplituda 1 V, Trise a Tfall je 10 ns, Ton je 0,1 ms. Úzké pulsy byly zvoleny z důvodu lepší čitelnosti při zpoždění a opakování signálu. Funkce vstupního a výstupního bufferu je již popsána v kapitole 2.3. Následný zpožďovací obvod obsahuje jen několik změn oproti navrhnutému schématu. Na výstupních průbězích obr. 5.3 a obr. 5.4 jsou vidět změny při různých poměrech (posunutí jezdce v hodnotách 0 - 1) potenciometrů Level a Feedback. Časové zpoždění článku je nastaveno na 2 ms, aby byl signál v dobrém rozlišení a snadno se porovnaly rozdíly mezi simulací a měřením. Hodnotami rezistorů R10, R11 a potenciometru Feedback lze měnit počet ozvěn, průběh útlumu dozívání a zisk ozvěn. Velikost výstupního napětí lze měnit poměrem rezistorů R2, R7 a R5 na výstupním sčítacím bufferu. U této simulace se předpokládá, že výstupní signál bude vstupním signálem efektu tremolo, proto je napětí na výstupu poměrně nízké. Důvodem je JFET tranzistor v tremolo efektu, který pracuje s nižšími úrovněmi napětí [21].



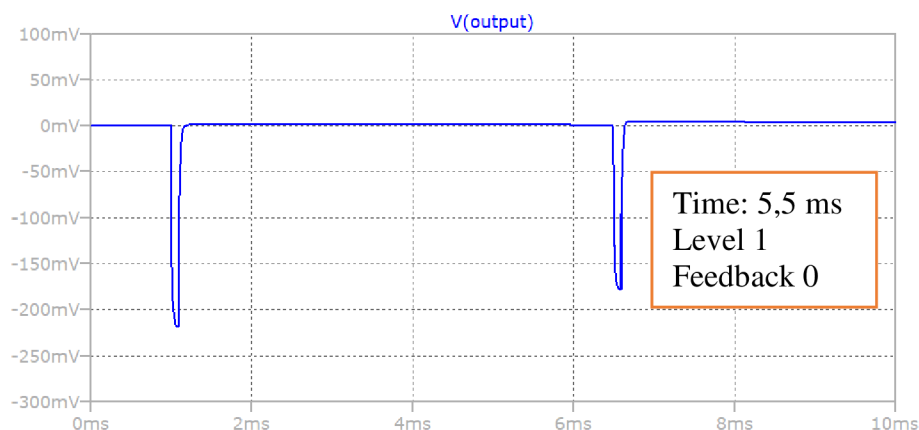
obr. 5.1 Schéma simulačního obvodu delay



obr. 5.2 Simulace obvodu delay (vstupní signál)



obr. 5.3 Simulace obvodu delay (poměry potenciometru level a feedback)

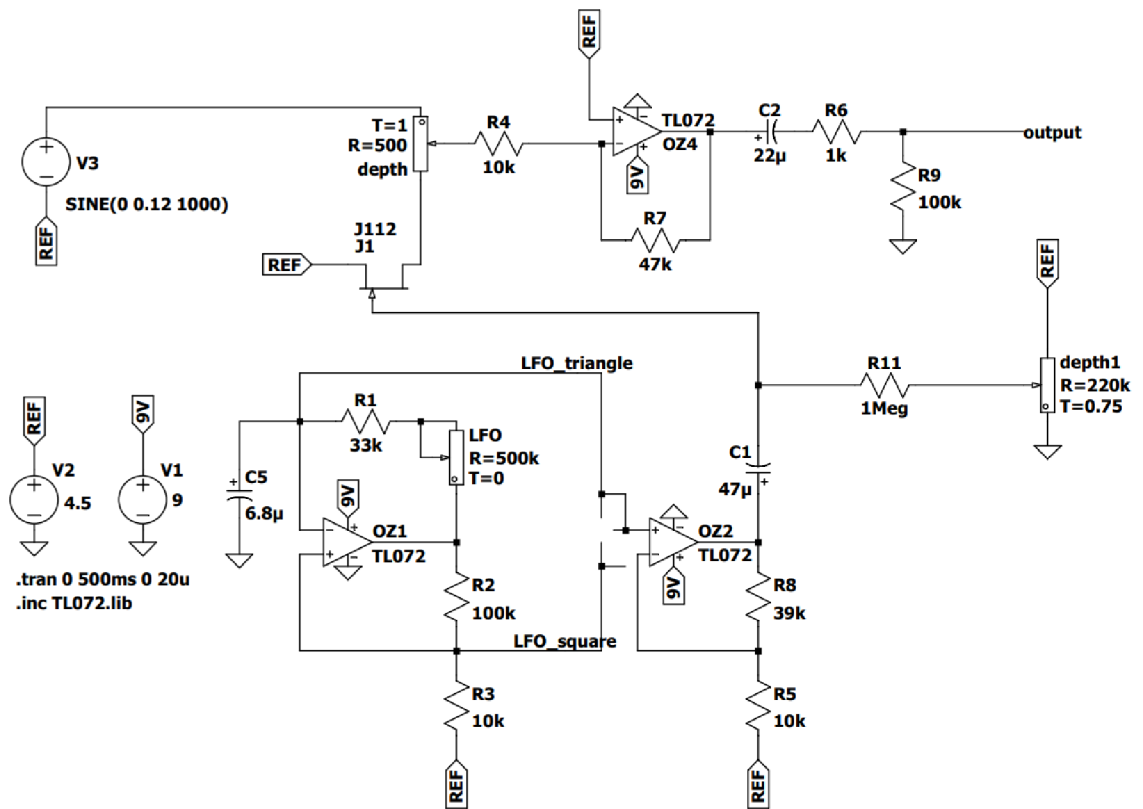


obr. 5.4 Simulace obvodu delay (poměr potenciometru time)

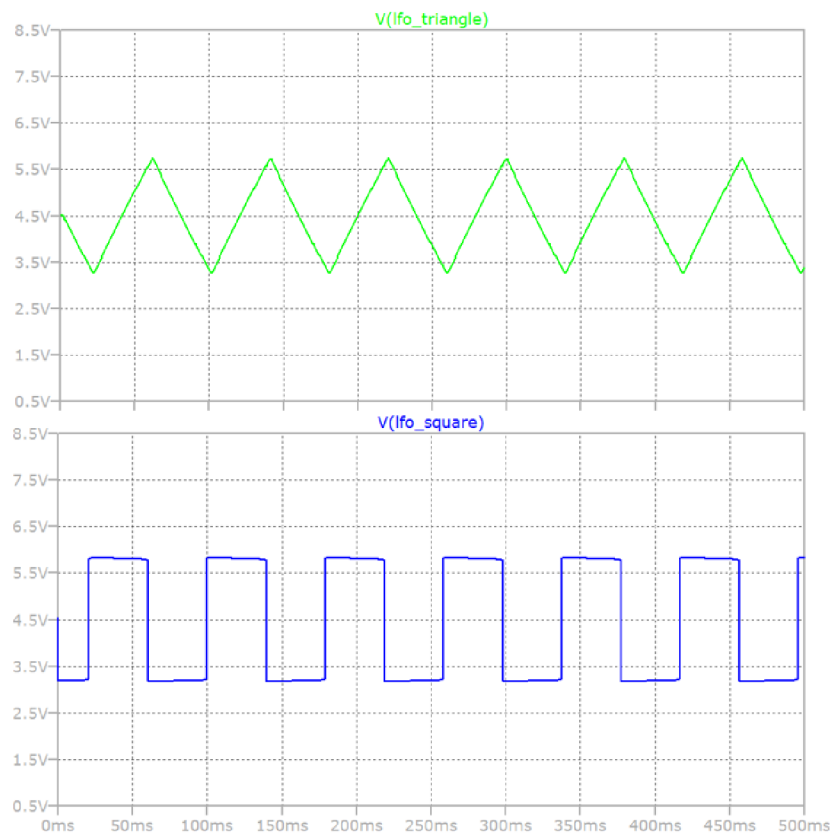
5.2 Simulace efektu tremolo

Obvod je napájený skrze zdroj 9 V, přičemž referenční napětí pro OZ je 4,5 V. Funkce schémat již byla popsána výše viz kapitola 3.3. Obvod LFO funguje stejně jako bylo simulováno a popsáno v kapitolách 3.2.1 a 3.3.1.

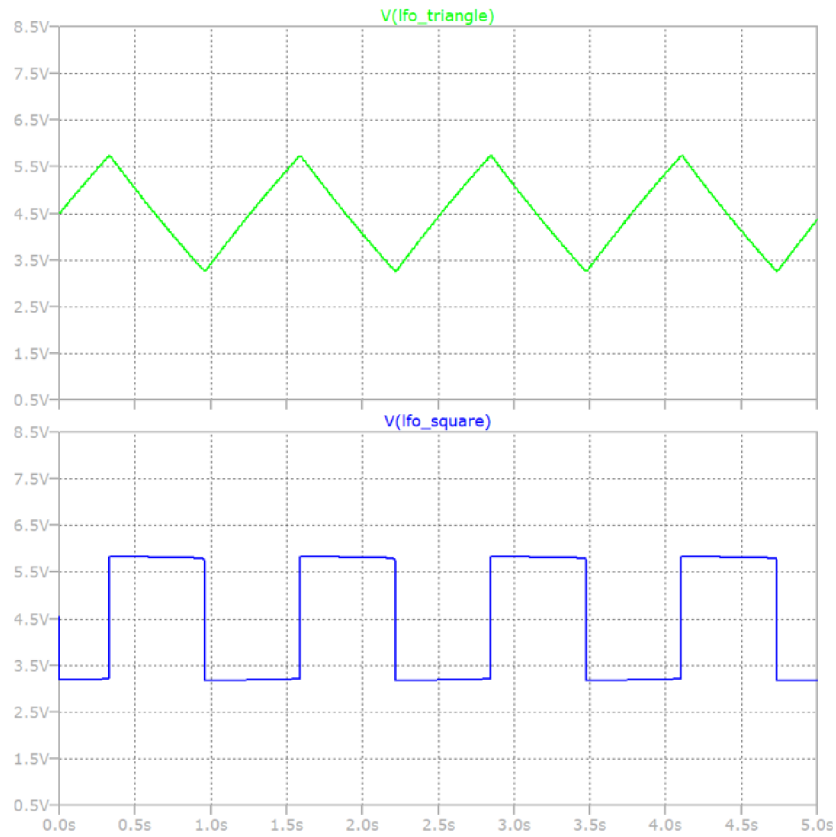
Z LFO přichází modulační signál na řídicí elektrodu (Gate) unipolárního tranzistoru JFET J112 [21]. Tyto modulační signály se mohou frekvenčně pohybovat mezi 0,8 až 14 Hz, což jsou hraniční hodnoty viz obr. 5.6 a obr. 5.7. Nosný signál je sinusového tvaru s frekvencí 1 kHz a napětím pouze 240 mVpp. Tyto vstupní hodnoty odpovídají vstupnímu signálu, který byl použit při měření, aby se lépe porovnávaly rozdíly simulace a měření. Při vyšších vstupních napětích začne JFET limitovat špičky tvaru modulačního signálu. To se zřetelně projevuje hlavně u trojúhelníkového tvaru průběhu. Poměr odporu na potenciometru Depth mění hloubku modulace viz obr. 5.8 obr. 5.9 obr. 5.10. Výstupní invertující zesilovač znovu převrací fázi signálu, který byl již jednou invertován ve výstupní části obvodu delay. Zesílení výstupního OZ skrze poměr rezistorů R4 a R7 je $A_U = 4,7$. Zde je nutné vzít v potaz, že úroveň napětí z kytary může být mnohem nižší nebo také vyšší, než je simulováno. Při konstrukci a zvukovém testování se musí zvážit, zda výstupní OZ signál nezesílí nebo nezeslabí, tak aby výstupní signál z celého multieffektu byl v přirozených napěťových mezích. To by znamenalo změnu zesílení ve výstupním zesilovači s OZ.



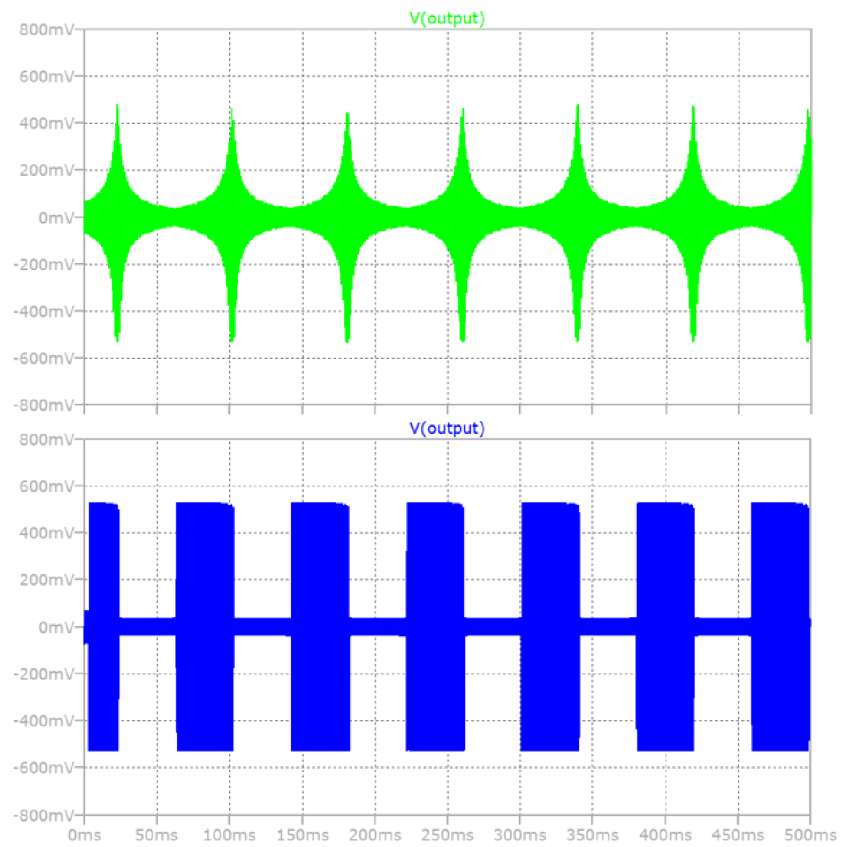
obr. 5.5 Schéma simulačního tremolo obvodu (trojúhelník, obdélník)



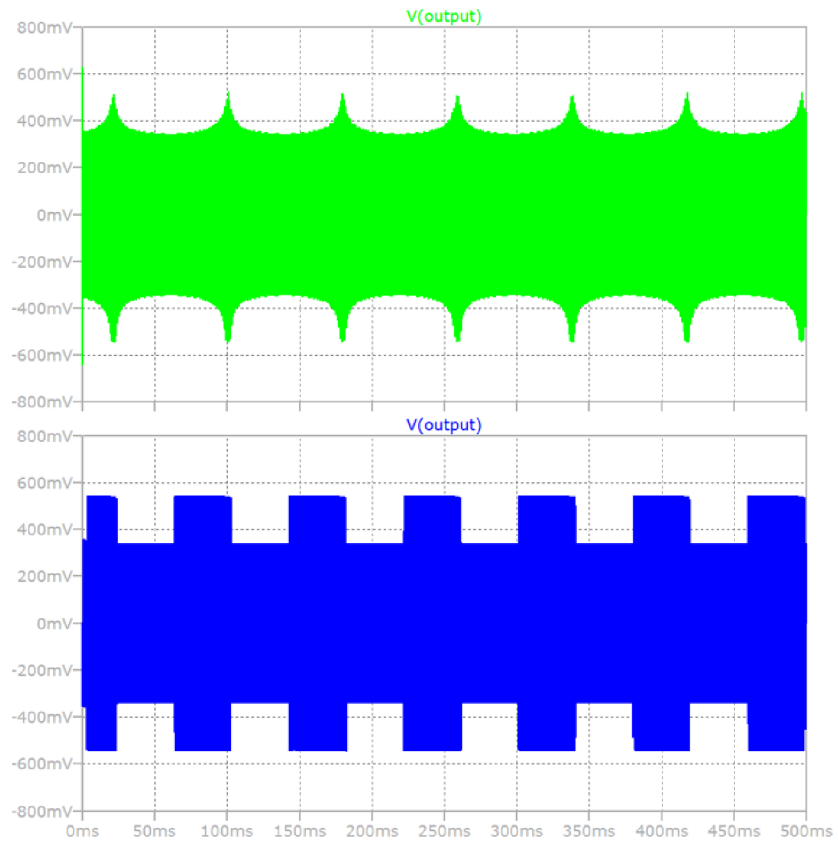
obr. 5.6 Simulace tremolo: výstupní signály z LFO pro 14 Hz



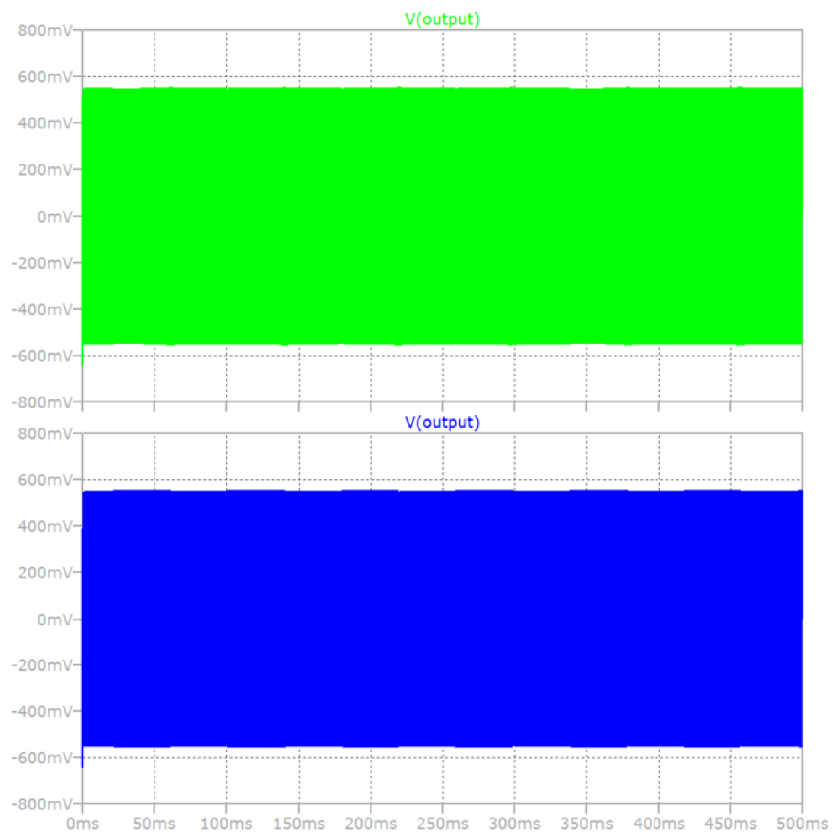
obr. 5.7 Simulace tremolo: výstupní signály z LFO pro 0,8 Hz



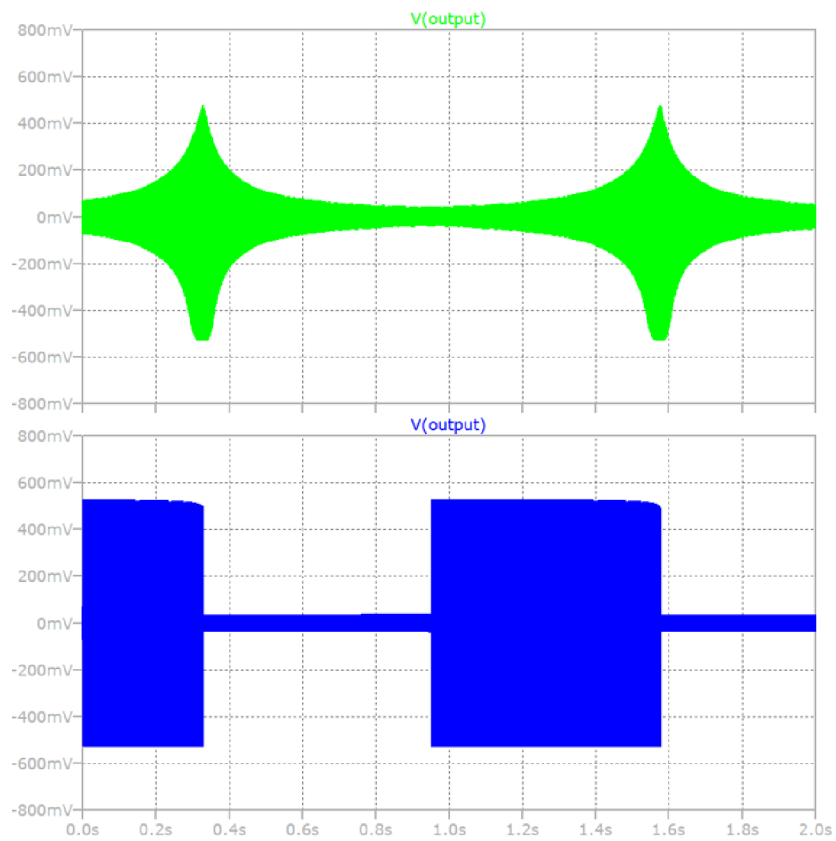
obr. 5.8 Simulace tremolo (maximální hloubka modulace)



obr. 5.9 Simulace tremolo (střední hloubka modulace)



obr. 5.10 Simulace tremolo (minimální hloubka modulace)



obr. 5.11 Simulace tremolo (minimální rychlost LFO)

6. Měření

Měření bylo prováděno při zapojení celého multieffektu na nepájivém poli. Hodnoty napětí měřené na výstupu efektu delay jsou tedy reálným vstupním napětím do efektu tremolo. Bylo tak učiněno z důvodu otestování správné návaznosti obou efektů. Konstrukčně budou oba efekty neoddelitelné, proto je důležitější měření v návaznosti nežli měření selektivní. Pro měření byla použita sonda s poměrem 1:10. Obvod na nepájivém poli byl napájen 9 V ze zdroje Agilent s proudovým odběrem kolem 30 mA.

6.1.1 Použité přístroje pro měření

Generátor: Agilent 33521A
Zdroj: Agilent E3620A
Osciloskop: Agilent DSO-X 2012A
Sonda s poměrem 1:10

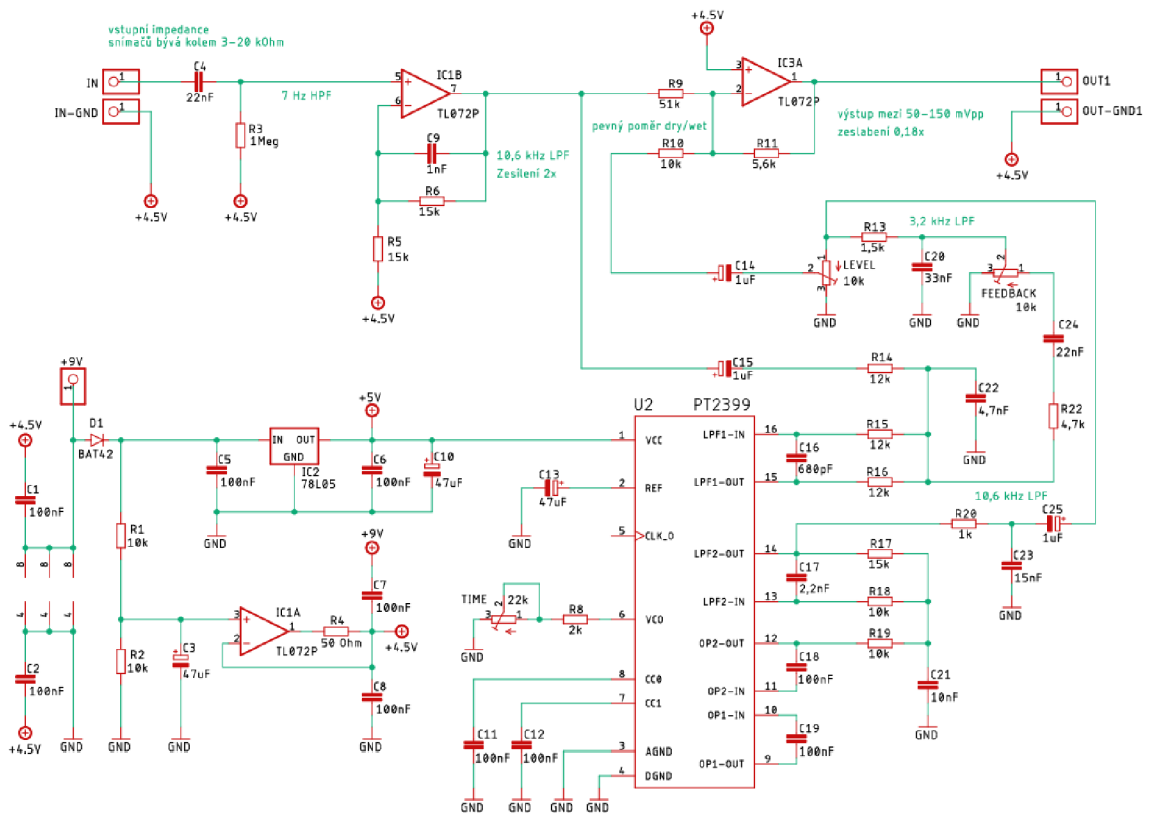
6.1 Měření efektu delay

Měření se vztahuje k obr. 6.1. Jako vstupní signál z generátoru byl zvolen pulsní průběh s amplitudou 500 mV_{pp} obr. 6.2. Jedná se o velikost napětí, které přibližně odpovídá napětí z kytarových snímačů při silnější hře. Při měření byla testována vstupní napětí v rozmezí 0,1 - 1 V_{pp} a pro tento rozsah je zaručen dobrý přenos signálu s minimálním zkreslením. Bylo zjištěno, že pro vstupní napětí 0,1 - 1 V_{pp} se pro různá nastavení potenciometrů výstupní napětí pohybuje v rozmezí 50 - 740 mV_{pp}. Zpoždění wet signálu potenciometrem Time je možné nastavit od 50 ms do přibližně 300 ms. Doba zpoždění je závislá zvláště na velikosti potenciometru Time, pokud by uživatel potřeboval zpoždění kolem 600 ms, musel by se potenciometr vyměnit za hodnotu 50 k Ω . Na obr. 6.3 je uplatněn pouze dry signál. Zbylá měření obr. 6.4, obr. 6.5, obr. 6.6 zobrazují funkce potenciometrů Level, Feedback a Time v různých nastaveních, která jsou vypsána v grafech.

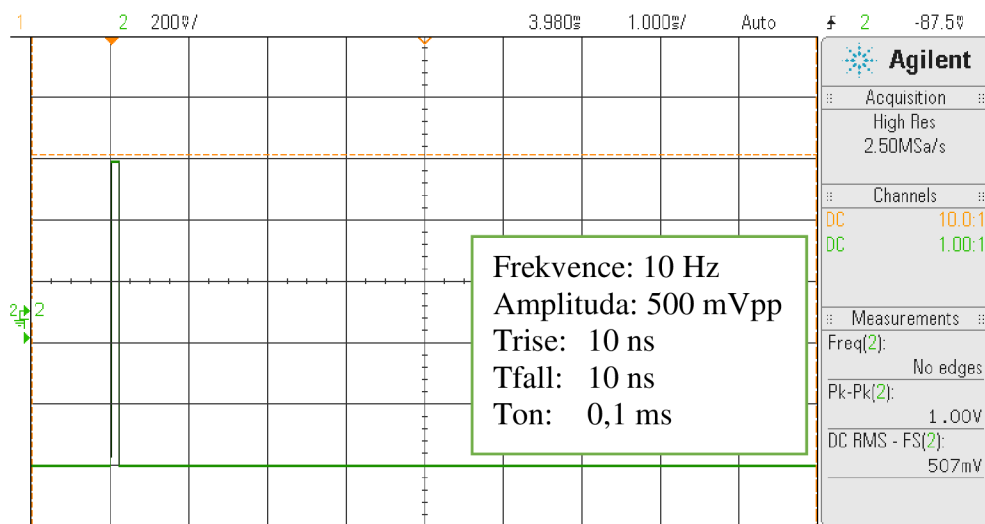
6.1.1 Porovnání rozdílů v simulacích a měření efektu delay

Obvod měření je oproti simulačnímu obvodu rozšířen o čip PT2399 a součástky, které patří k tomuto obvodu dle doporučeného schématu. Na první pohled je vidět, že budící a dry signál na výstupu jsou v simulaci a měření stejné viz obr. 6.3. Rozdíl je znatelný až ve zpoždovací části efektu. Zde je vidět násobně větší útlum a zkreslení wet signálu. První zpožděný signál v měření má amplitudu -75 mV (obr. 6.4), kdežto simulovaný signál až -175 mV (obr. 5.3). Tento znatelný rozdíl je patrný i pro další zpožděné signály při uplatnění efektu ozvěn (feedback). Pokles u měřeného signálu je pravděpodobně způsoben úbytkem napětí v efektové části nebo v čipu PT2399, které se v simulaci nemohou uplatnit. Dalším nezanedbatelným rozdílem je zkreslení a překmit měřeného zpožděného signálu. Zkreslení je z velké části způsobeno několika filtry typu HP a DP přítomných v měřeném obvodu, které nejsou simulovány. Překmit je patrně způsoben oddělovacími kondenzátory a kondenzátory filtrů. Při nastavení Feedback 1, lze vidět na obr. 6.5 začínající rozkmitávání, po kterém se obvod dostane do stavu sebe-oscilace. Tohoto jevu však v simulacích nebylo dosaženo (obr. 5.3). Na obr. 6.6 je zvolen jiný čas zpoždění, který poukazuje na možnost parametrické úpravy zpoždění.

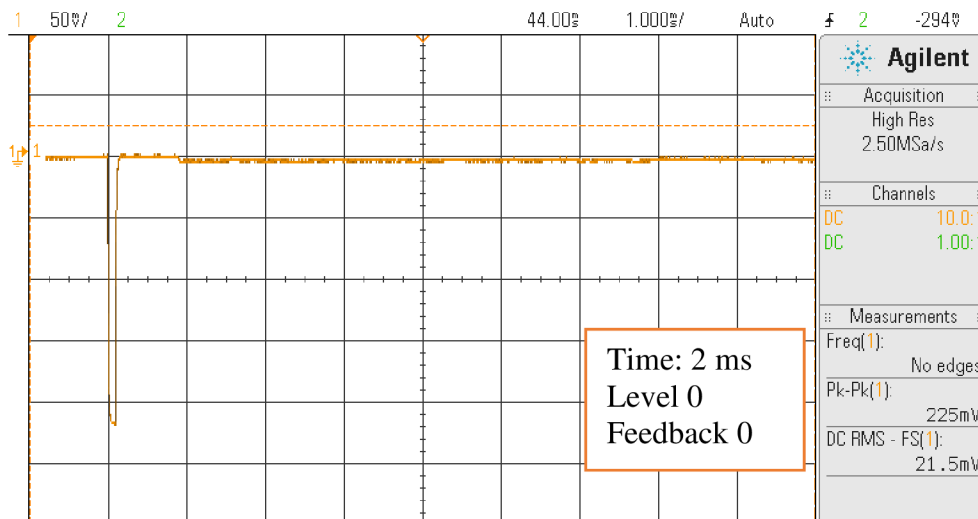
Díky těmto zjištěním došlo ve finálním schématu k několika změnám. Byl upraven poměr rezistorů R9, R10 a R11 v měřeném schématu (obr. 6.1), aby bylo možno nastavit uživatelsky lepší poměr dry/wet skrze potenciometr level.



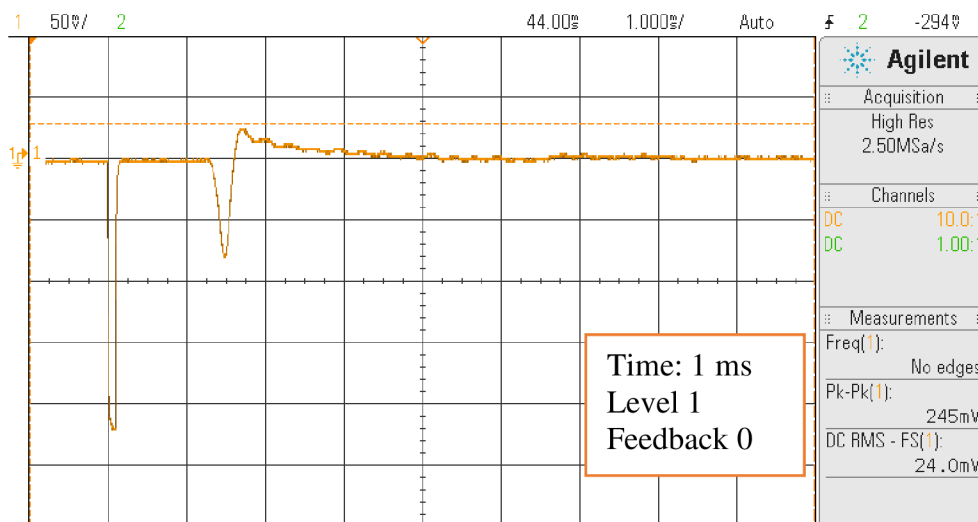
obr. 6.1 Schéma měřeného obvodu delay



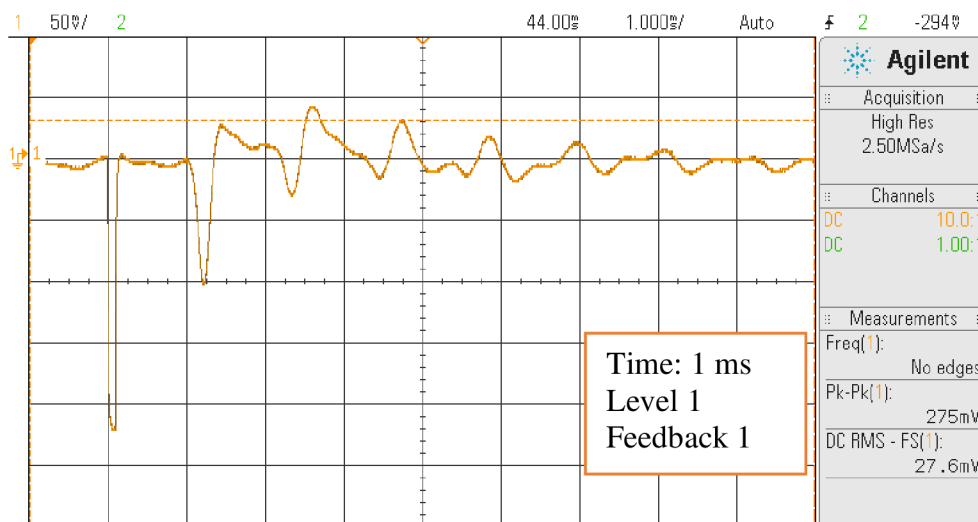
obr. 6.2 Měření obvodu delay (vstupní pulsní signál)



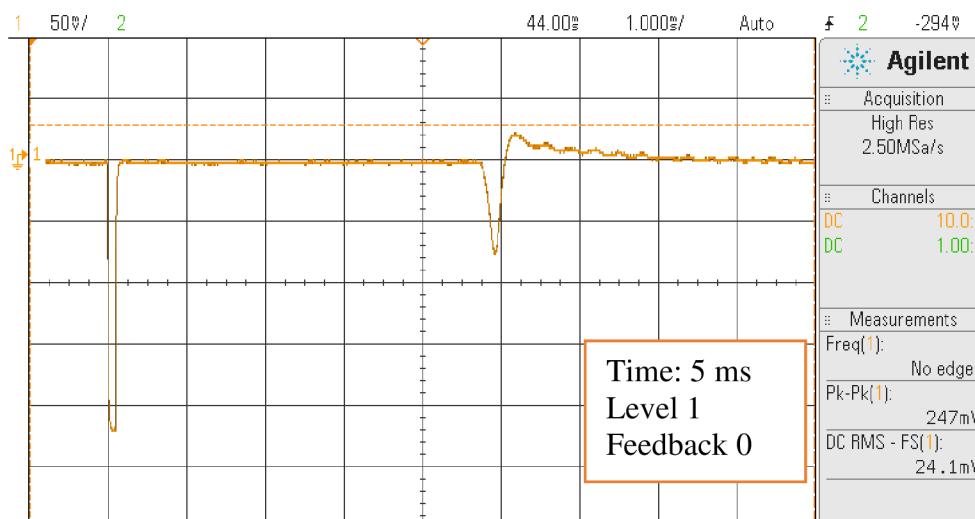
obr. 6.3 Měření obvodu delay (výstupní signál dry)



obr. 6.4 Měření obvodu delay (výstupní signál dry + wet)



obr. 6.5 Měření obvodu delay (výstupní signál dry + wet + feedback)



obr. 6.6 Měření obvodu delay (poměr potenciometru time)

6.2 Měření efektu tremolo

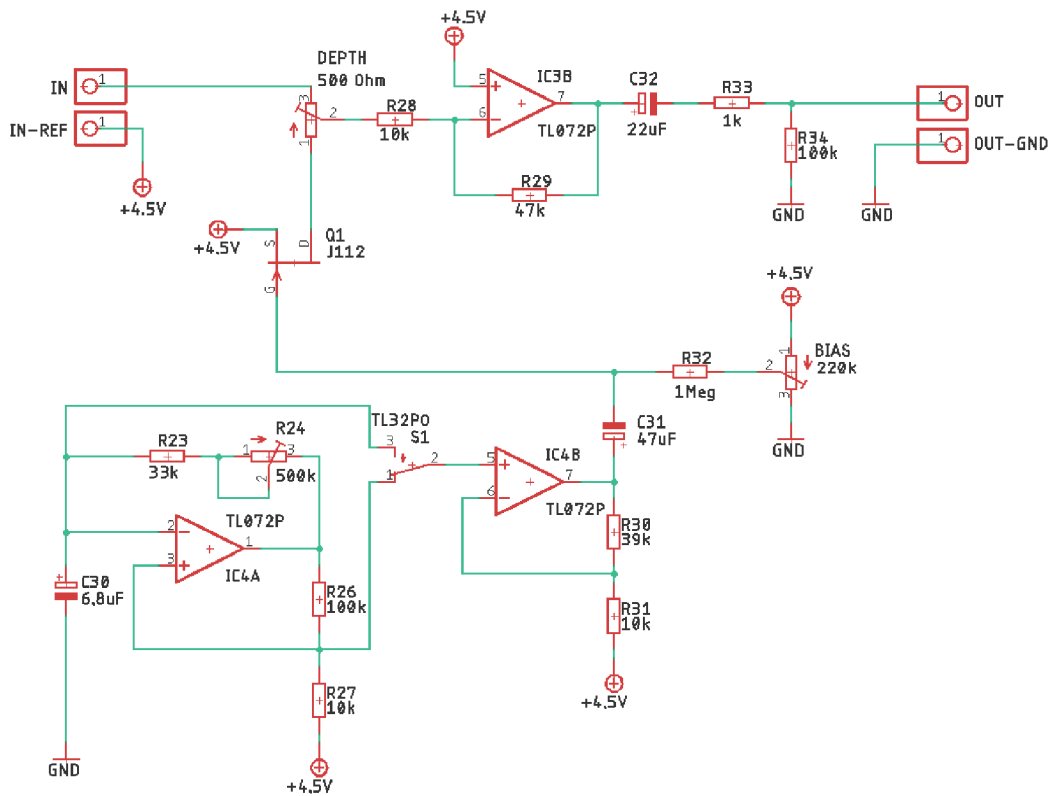
Vstupním signálem celého multieffektu byl sinusový průběh o kmitočtu 1 kHz s amplitudou 500 mV z generátoru, avšak tento signál prošel již celým obvodem delay. Zpoždovací větev efektu delay se neuplatňuje a na vstup efektu tremolo (obr. 6.7) je tedy přivedeno napětí 240 mVpp.

Vstupní signál do celého efektu se může pohybovat v rozmezí 0,05 - 1,5 Vpp, aniž by se začal negativně ovlivňovat tvar modulační křivky na výstupu efektu tremolo. Tyto hodnoty napětí generátoru následně odpovídají vstupním hodnotám do efektu tremolo v rozmezí 50 - 740 mVpp pro různá nastavení efektu delay. Díky těmto poznatkům bylo zjištěno, že efekťová část tremolo bude pracovat s minimálním zkreslením pro různé velikosti vstupních signálů do multieffektu, ale také pro různá nastavení předcházející efekťové části delay. Vstupní signály do multieffektu nad 2 Vpp začínají viditelně zkreslovat tvar modulační křivky.

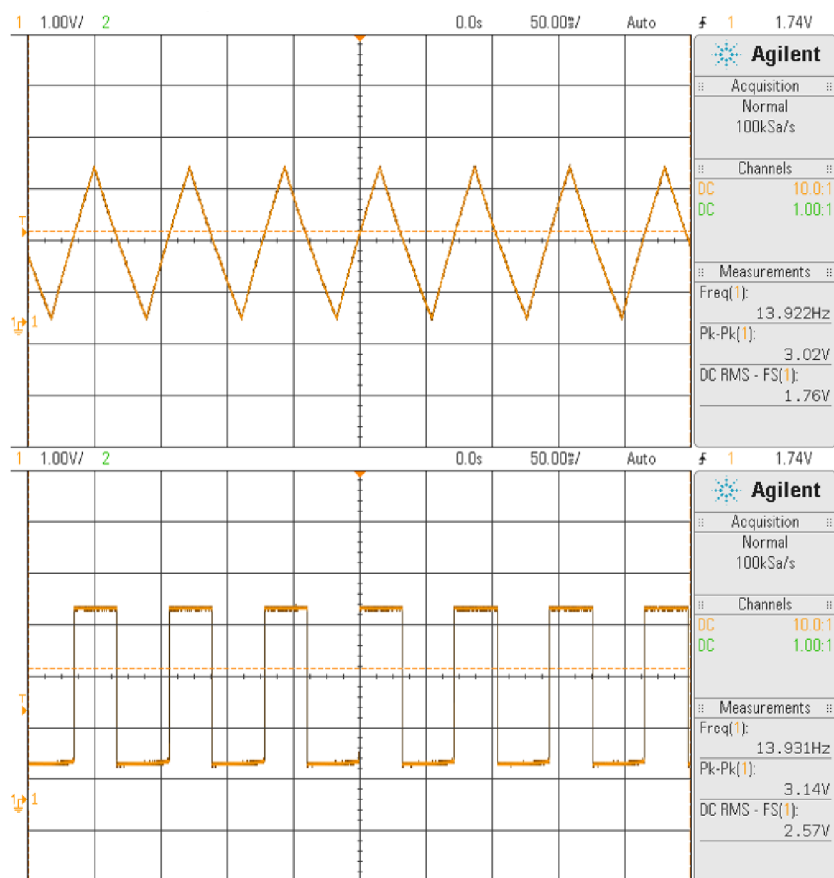
6.2.1 Porovnání rozdílů v simulacích a měření efektu tremolo

Porovnávané obvody jsou identické, za předpokladu že jsou zanedbány reálné vlastnosti součástek použitých při měření. Z výsledných měření a simulací je vidět, že rozdíly jsou minimální. Větší znatelný rozdíl je vidět na (obr. 6.12), kde je v naměřených průbězích minimální hloubka modulace stále dosti modulována skrze nenulový signál z unipolárního tranzistoru J112 [21]. Pro lidské ucho se však stále jedná o téměř nerozpoznatelný jev.

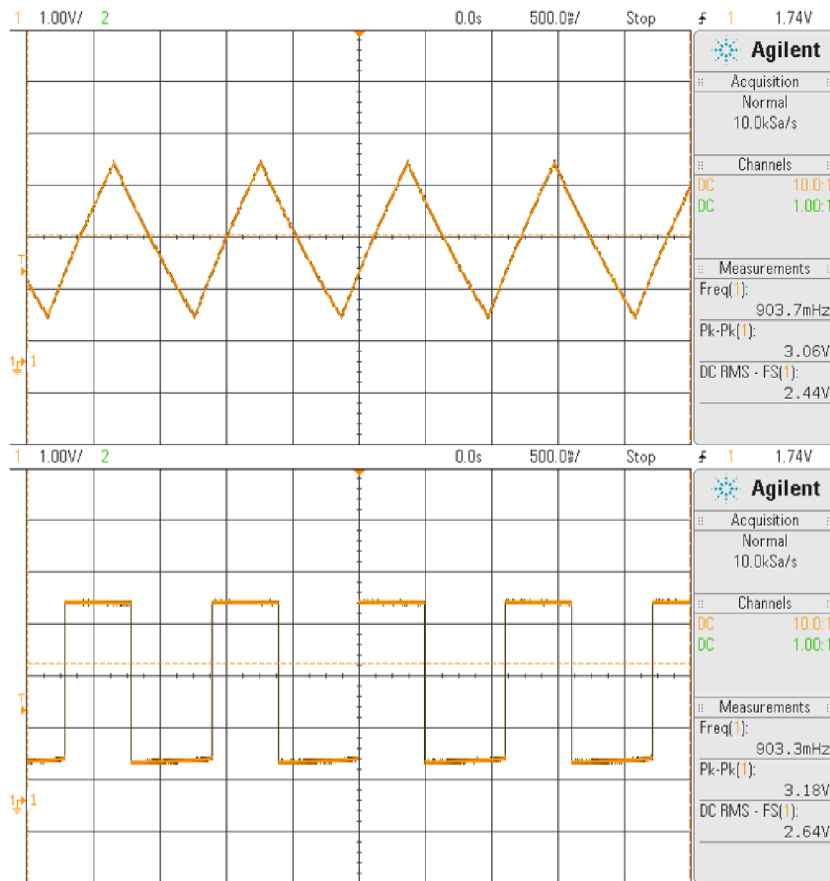
Z těchto všech poznatků se obvod jeví jako dobře navržený a není zde potřeba žádných velkých změn. Bylo zároveň zjištěno, že vstupní tremolo signál může mít větší amplitudu napětí, aniž by to příliš deformovalo obálku modulovaného signálu.



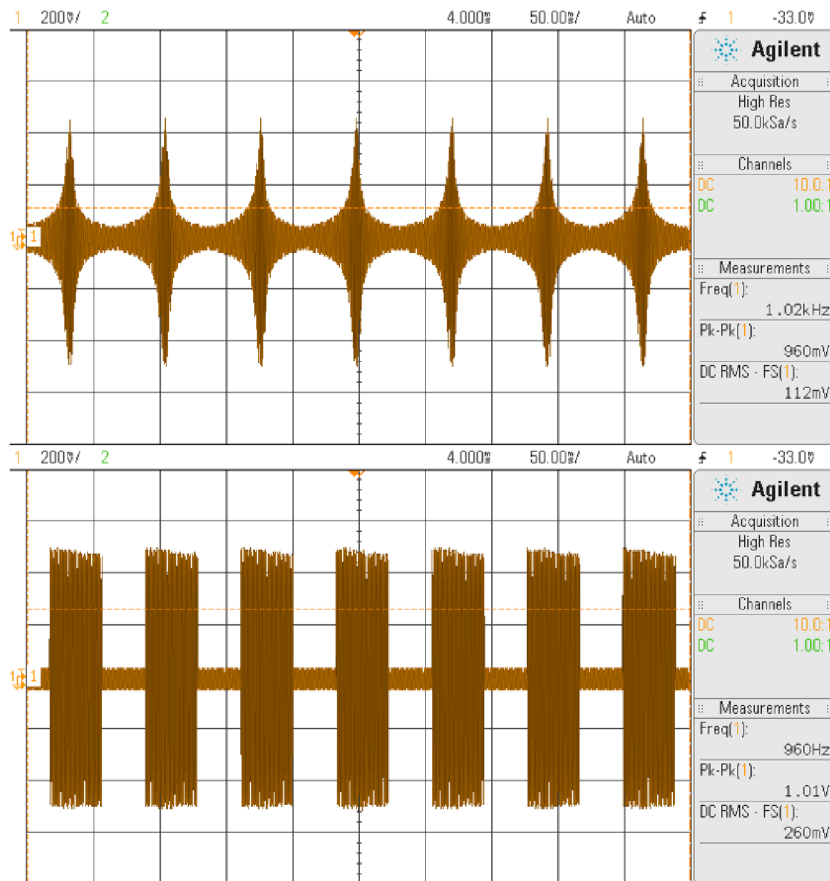
obr. 6.7 Schéma měřeného obvodu tremolo



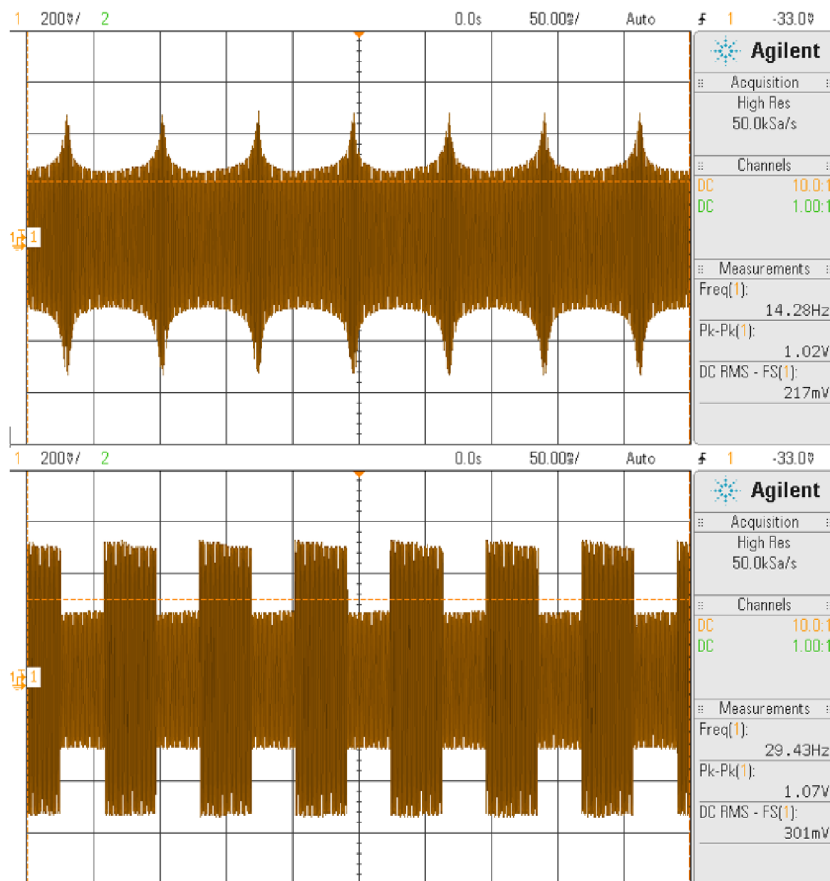
obr. 6.8 Měření obvodu tremolo: výtupní signály LFO pro 14 Hz



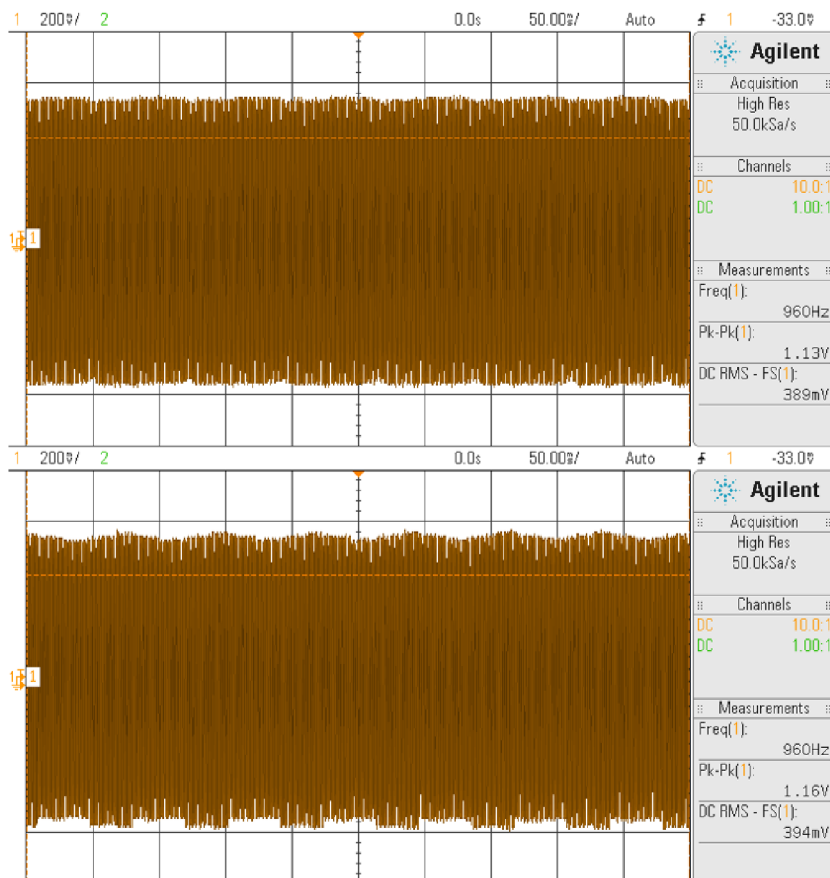
obr. 6.9 Měření obvodu tremolo: výtupní signály LFO pro 0,9 Hz



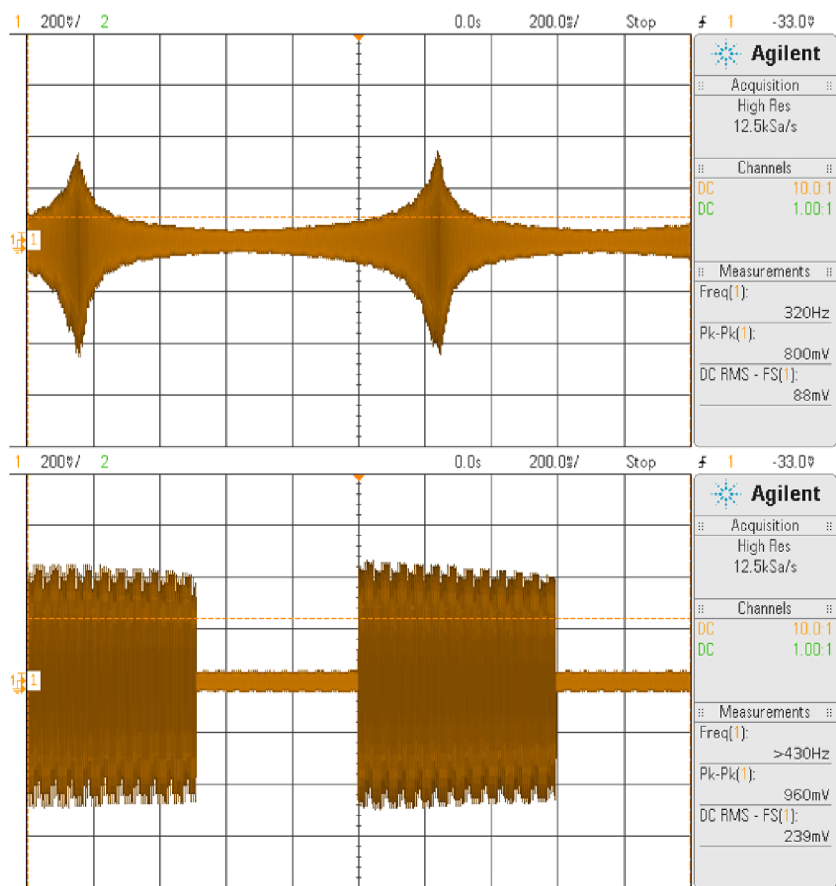
obr. 6.10 Měření obvodu tremolo (maximální hloubka modulae)



obr. 6.11 Měření obvodu tremolo (střední hloubka modulace)



obr. 6.12 Měření obvodu tremolo (minimální hloubka modulace)



obr. 6.13 Měření obvodu tremolo (minimální rychlost LFO)

7. Zvukové testování

Primárním účelem tohoto efektu jsou dobré zvukové vlastnosti, stabilita a přirozené ovládání pro uživatele. Zvukový test byl tedy proveden z důvodu nalezení případných chyb, které nejsou na osciloskopu viditelné nebo na první pohled zřetelné. Multieffekt byl zapojen stejně jako v měření viz kapitola 6.1. K testování byla použita elektrická kytara a výstupní signál z efektu byl nahráván skrze zvukovou kartu do DAW programu. Hodnoty vstupního a výstupního signálu byly zároveň sledovány a měřeny na osciloskopu.

7.1.1 Použité přístroje pro zvukové testování

Zdroj:	Agilent E3620A
Osciloskop:	Agilent DSO-X 2012A
Elektrická kytara:	Fender Pawn Shop Mustang Special MIJ 2011
Zvuková karta:	Focusrite Scarlett 2i2 3rd Gen
Sluchátka:	Audio-technica ATH-M40x
2x BNC měřicí kabely	
2x Jack 6,3 mm kabely	

7.2 Výsledky zvukového testování

Kytara byla osazena humbucker snímači Fender Wide Range. Tyto snímače mají stejnosměrný odpor kolem 10,6 k Ω [4]. Kytara byla nastavena na maximální hlasitost, bez tónové clony a se zapojeným kobylkovým snímačem. Vstupní kytarový signál se pro různou techniku a dynamiku hraní pohyboval přibližně v rozmezí 20 až 200 mV_{rms}.

7.2.1 Testování zvuku efektu delay

Nastavení parametrů potenciometry efektu delay funguje optimálně a stejně jako při měření. Zvuk čistého dry signálu je dobře zvukově čitelný a zároveň je slyšitelná filtrace vyšších frekvencí. Wet signál je při kratší době zpoždění nezkreslený a dobře čitelný. Ve zvuku oproti dry signálu lze rozpoznat větší úbytek vyšších frekvencí skrze DP filtrace. Od přibližně 200 ms zpoždění se začíná ve zvukovém signále uplatňovat zkreslení způsobené digitálním šumem čipu PT2399. Při maximálním možném zpoždění může být toto zkreslení již velice nepříjemné posluchači. Tento digitální šum lze částečně zmírnit volbou větších hodnot kondenzátorů C22 a C23, které jsou připojeny do OP1 a OP2 zpoždovacího čipu (Příloha A -). Změnou vstupního a výstupního filtru pro čip PT2399 nelze tento digitální šum zmírnit. V případě přidání efektu ozvěn (feedback) se nežádoucí jev zkreslení ještě zesiluje. Pro delší zpoždění s minimálním zkreslením se v komerční praxi využívají kaskádní zapojení více PT2399 za sebou. Barva zvukového signálu wet je dle nastavení filtrů poměrně „temná“ a „hluboká“.

Některé DIY návrhy řeší problémy šumu nebo špatné funkce čipu volbou alternativních zapojení DGND a AGND. Důvodem se zdá být rozdílná výrobní technologie u některých čipů PT2399 od jiných výrobců.

7.2.2 Testování zvuku efektu tremolo

Nastavení parametrů potenciometry efektu tremolo funguje bez znatelných problémů. Modulace skrze LFO funguje dobře a průběhy modulovaného výstupního signálu odpovídají simulacím i měřením. Skrze LFO se však uplatňoval silný a nepříjemný

„klik“, jehož rychlost byla závislá na nastavení oscilátoru a hlasitost na tvaru řídicího signálu a hloubce modulace.

„Klik“ byl odstraněn připojením kondenzátoru o velikost 330 nF mezi neinvertující vstup operačního zesilovače IC4A a GND v obvodu LFO viz Příloha A -. Tento kondenzátor zjemňuje nástupnou hranu obdélníkového signálu, která jinak proniká přes zem do celého obvodu a nepříjemně se projevuje na výstupním zvukovém signálu.

7.2.3 Zvukové možnosti multieffektu

Multieffekt disponuje 6 parametrickými prvky. Potenciometry Level, Feedback, Time, Depth, Speed a také jedním přepínačem tvaru LFO.

Level: jedná se o ovládání poměru hlasitostí dry/wet v efektu delay. Při minimálním nastavení se neuplatní žádný zpožděný signál (wet). Maximální nastavení pot. naopak trochu nestandardně více upřednostňuje průchod wet signálu. Tím se původní dry signál lehce zamaskuje a celkový zvuk „zhutní“ díky poměrně silné filtraci vyšších frekvencí v zpožděném signálu.

Feedback: ovlivňuje počet opakování zpožděného signálu. Na základě nastavení potenciometru se mění rychlost útlumu těchto opakování. Nad určitou mez (téměř max. nastavení) přejde efekt do vlastních oscilací. Oscilace poté frekvenčně nejvíce zvýrazňuje vyšší harmonické složky daného fundamentu ve středním kmitočtovém spektru přibližně mezi 1 až 3 kHz.

Time: ovládá pouze délku zpoždění mezi hodnotami 50 ms do přibližně 300 ms. Vyšší doba zpoždění by efektu pravděpodobně přidala více variability a možností. Lze tak poměrně jednoduše dosáhnout výměnou potenciometru za vyšší hodnotu např. 50 k Ω , kdy se maximální doba zpoždění zvýší až na 600 ms, avšak výměnou za vyšší THD.

Depth: ovlivňuje hloubku modulace od minimální hloubky, kdy se vlastně tremolo efekt neuplatní, až po maximální. Při max. hloubce dojde k tzv. houpání či sekání zvuku závisle na rychlosti LFO.

Speed: ovládá kmitočet oscilátoru mezi hodnotami 0,8 až 14 Hz. Tento potenciometr je dobré synchronizovat s nastavením zpoždění u efektu delay, kvůli rytmičtějšímu charakteru zvuku. K synchronizaci však nemusí vůbec dojít, což má za následek spíše experimentálnější mimo-rytmický charakter zvuku.

Přepínač tvaru LFO: jedná se o přepínač tvaru modulačního signálu. Je možné nastavit buď obdélníkový nebo trojúhelníkový tvar. Toto nastavení má veliký vliv na celkový charakter výsledného zvuku. Pro jemnější zvuk je lepší nastavit trojúhelník, naproti tomu pro hrubější a drsnější zvuk je naopak lepší nastavení obdélníkového tvaru.

8. Schéma, návrh DPS a konstrukce pedálu

8.1 Schéma

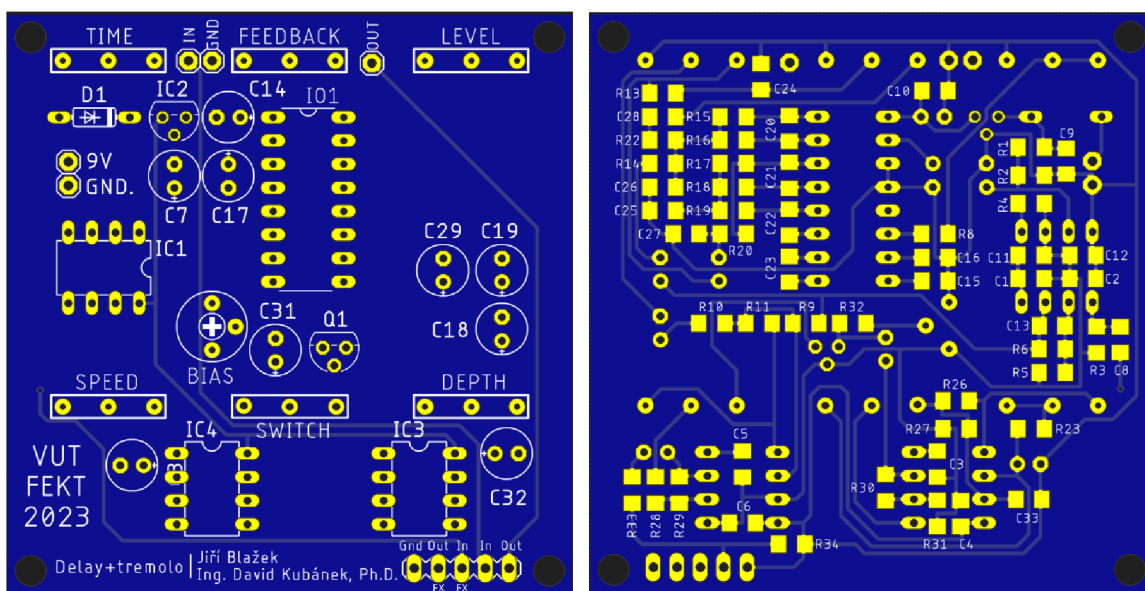
Schéma bylo navrženo již pro co nejjednodušší následnou práci při návrhu desky plošných spojů a také pro montáž do šasi. Bylo nutné počítat s vývody pro vstup, výstup, napájení a také bypass nožní DPDT přepínač. Schéma bylo z těchto důvodů upraveno do finální podoby (Příloha A -), která se lehce odlišuje od popisovaných schémat v teoretických kapitolách.

8.2 Deska plošných spojů (DPS)

Deska byla navrhována přesně na rozměry vybraného šasi krabičky Hammond 1590N1. Zároveň se rozměry ještě upravily, aby nedošlo k nechtěným kolizím s konektory Jack 6,3 mm, nožním přepínačem DPDT a napájecím konektorem. Rozměry desky jsou tedy: šířka 61 mm, délka 62,5 mm. Jedná se o dvouvrstvou desku plošných spojů, kde se kombinují drátové a SMD součástky. SMD součástky jsou umístěny ze spodní strany a drátové součástky jsou naopak umístěny na vrchní straně, aby se ušetřilo co nejvíce místa na DPS.

Při návrhu se již počítalo s montáží potenciometrů a přepínače do přední strany šasi, proto jsou vývody těchto součástek umístěny na příslušných pozicích, které jsou vhodné pro montáž. Vývody pro napájení a konektory byly umístěny na ideální pozice pro montáž z důvodu eliminace co nejvíce kabeláže v šasi krabičky. Tento postup byl zvolen zvláště kvůli estetice a přehlednosti.

DPS byla navržena a dimenzována, aby nedocházelo k případným přeslechům mezi kanály a zároveň aby byly dodrženy podmínky pro správný návrh DPS.



obr. 8.1 DPS vrchní strana (top) a spodní strana (bottom)

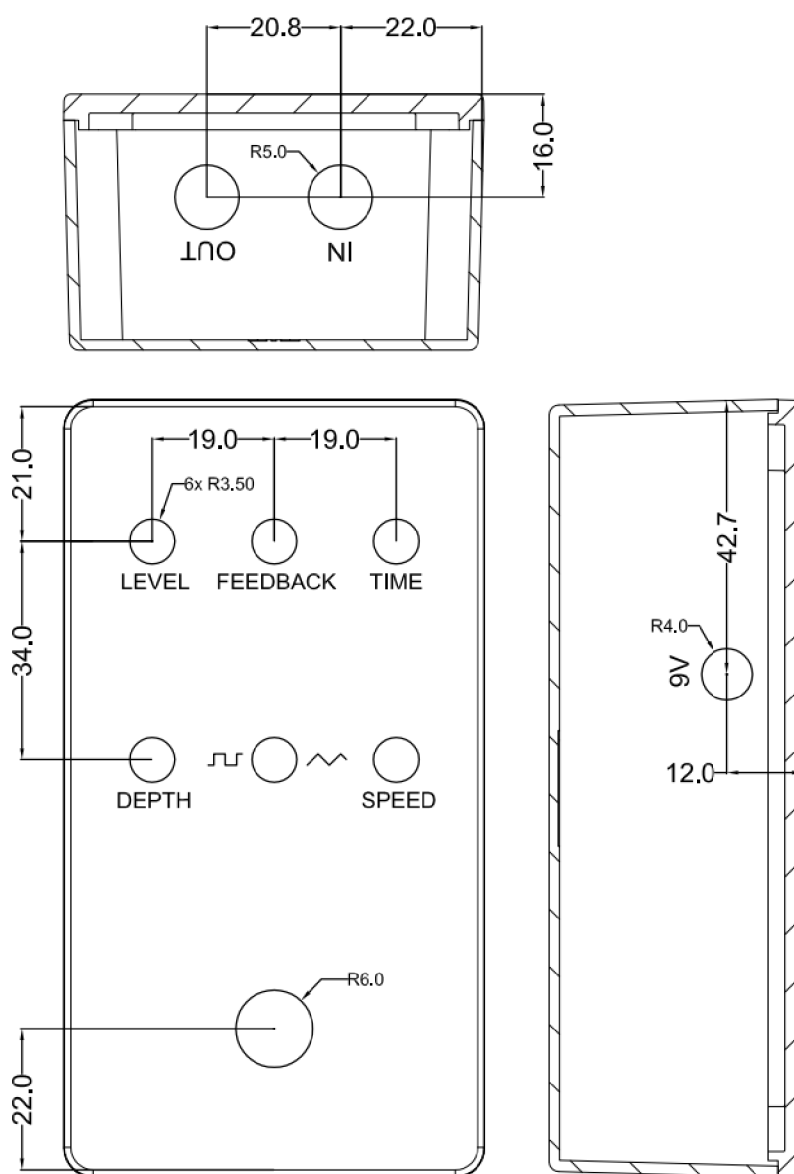
8.3 Konstrukce

Efektový pedál je konstruován jako standardně nožní pedál. Pedál bývá pak nejčastěji umístěn na zemi nebo na pedalboardu a jeho zapnutí uživatel ovládá nožním přepínačem. Jako šasi pro multieffekt slouží odolná hliníková krabička Hammond 1590N1. Pedál bývá často vystaven velké zátěži a je tedy nutné volit pevné a odolné konstrukční řešení.

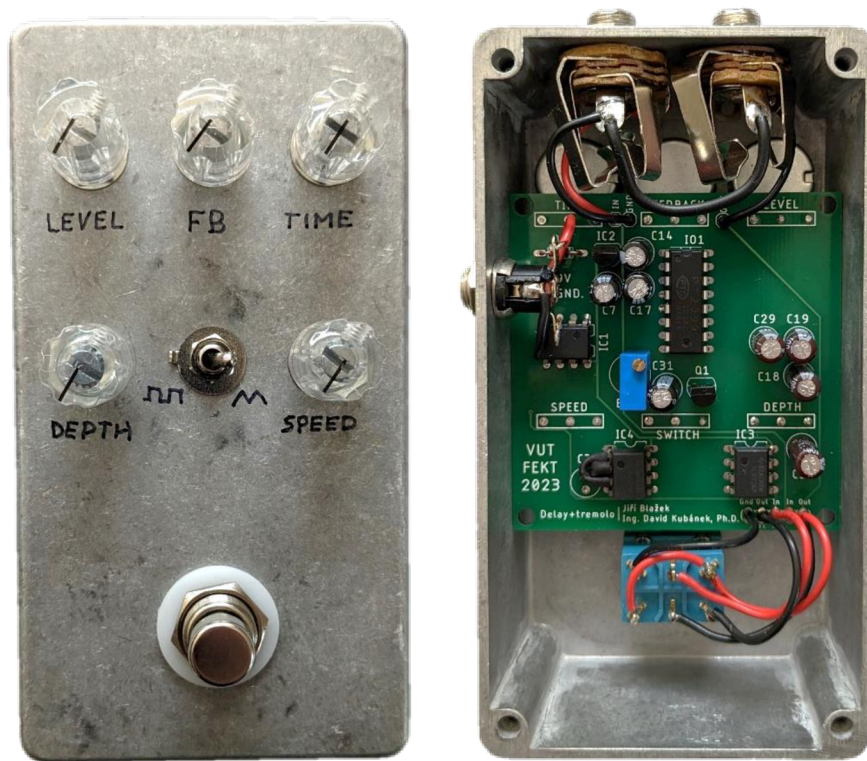
Do šasi musí být pro montáž různých součástek vyvrtány otvory o různých velikostech, zároveň pak nesmí docházet ke kolizím těchto součástek navzájem a deskou plošných spojů. Krabička obsahuje celkem 10 vyvrtaných otvorů pro montáže viz návrh na obr. 8.2.

Vrtané otvory: 2x JACK MONO konektor, 1x napájecí konektor na 9 V, 1x nožní přepínač DPDT, 1x přepínač pro tvar průběhu LFO, 5x potenciometry na ovládání parametrů multieffektu.

Celkově osazený a zkonstruovaný pedál lze vidět na obr. 8.3.



obr. 8.2 Efektový pedál - konstrukce



obr. 8.3 Efektový pedál - osazení

9. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení se s efekty tremolo a delay, návrhem obvodu a jeho následnou simulací.

V teoretickém úvodu byla stručně vysvětlena typologie efektových pedálů a jakým způsobem fungují modulační a zpožďovací efekty. Efekty delay a tremolo pak byly blíže popsány ve vlastních detailnějších kapitolách tohoto textu. Na základě načerpaných informací o efektech byl proveden stručný návrh těchto efektů. Pro detailní návrh obvodu bylo nutné provést hluboký výzkum (research) podobných efektů a různých obvodových schémat. Bylo také důležité se vyvarovat zbytečných chyb v návrhu tím, že bylo čerpáno co nejvíce informací z dostupných již zrealizovaných a funkčních schémat efektů. Komerčně úspěšné efektové pedály využívají často chytrá obvodová řešení, která se následně aplikují v mnoha jiných efektech.

Inovace této práce spočívá více ve vzájemné kombinaci efektů delay a tremolo než v čisté originalitě obvodového schématu. Pro návrh schématu bylo tedy zjištěno, jaké součástky a obvodová řešení se pro dané efekty využívají.

Navržená schémata bylo nutné ověřit v simulačním programu a potvrdit tak správnost jejich funkce. Při porovnání simulace a měření se zjistilo, že výsledky obou metod měření si navzájem dostatečně odpovídají. Simulace jsou tak vhodným nástrojem pro návrh schémat, jež jsou nestandardní nebo jejich funkce není empiricky ověřena. Zároveň bylo zjištěno, že simulační modely některých součástek neodpovídají úplně přesně vlastnostem reálných součástek při měření.

Dalším důležitým ověřením funkčnosti bylo zvukové testování. Tento test měl za cíl určit správnou odezvu multieffektu při jeho připojení do typického kytarového řetězce. Byly zjištěny reálné vstupní úrovně napětí a impedance z kytarových snímačů a zároveň zvukové vlastnosti signálu na výstupu multieffektu. V tomto testování byly také objeveny některé dosud nezjištěné vlastnosti obvodu, které negativně ovlivňují celkový zvukový charakter multieffektu. Díky těmto poznatkům byla některá zvuková negativa plně odstraněna a jiná alespoň potlačena viz kap. 7.2.

Po otestování správnosti celého zapojení v simulacích i na nepájivém poli byla navržena deska plošných spojů. DPS byla navrhována již pro předpřipravené hliníkové šasi spolu s rozmístěním montovaných součástek. Rozměry desky a rozmístění parametrických součástek (potenciometry) při návrhu byly tedy stanoveny. Dalším důležitým konstrukčním krokem bylo minimalizovat využití propojovacích vodičů mezi externími součástkami (konektory, DPDT...). Místo těchto propojovacích vodičů bylo využito propojení skrze vodivé cesty DPS. Díky tomu bylo zamezeno případným přeslechům či indukci na vodiči, zároveň tak bylo učiněno z důvodu přehlednosti a estetiky. DPS kombinuje drátové a SMD součástky, přičemž veškeré SMD součástky jsou umístěny na spodní straně desky a nejsou při otevření krabičky vidět.

Zvukově lze tento multieffekt popsat jako vysoce variabilní. Při nastavení celočíselných poměrů potenciometrů Time a Speed může být nalezena výborná zvuková souhra obou efektů. Důležitou zmínkou je také možnost vlastních oscilací při maximálním využití zpětné vazby (Feedback). Je zde možnost multieffekt kombinovat s jinými efekty, např. řazení multieffekt a následně reverb vytváří výbornou zvukovou kombinaci, která může být vyjádřena slovy „space psychedelic“.

Cílem této práce bylo také porovnat zvukové možnosti multieffektu a porovnat je se standardním řazením (tremolo – delay). Zde je nutné upozornit, že zvukové vlastnosti jednotlivých řazení jsou hodnoceny na subjektivní preferenci každého posluchače. Práce dochází k závěru, že řazení delay – tremolo je méně častým řešením, které však nabízí

zajímavé zvukové vlastnosti a může tak být pro některé hudebníky cestou k novým zvukovým kombinacím například i s jinými efekty.

LITERATURA

- [1] PTÁČEK, Ladislav. *Jak pracují efekty I* [online]. www.casopismuzikus.cz, 2009 [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://www.casopismuzikus.cz/clanky/jak-pracuji-efekty-i>.
- [2] PTÁČEK, Ladislav. *Jak pracují efekty II* [online]. www.casopismuzikus.cz, 2009 [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://www.casopismuzikus.cz/clanky/jak-pracuji-efekty-ii>.
- [3] SCHIMMEL, Jiří. *Studiová a hudební elektronika. Studiová a hudební elektronika*. Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2012. (158 p.). ISBN 978-80-214-4452-2.
- [4] *Fender Wide Range* [online]. Wikipedia.org [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fender_Wide_Range
- [5] *Resistive opto-isolator* [online]. Wikipedia.org [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Resistive_opto-isolator
- [6] KIADI, Zakaria. *Echo vs. Delay: What's the Difference?* [online]. emastered.com, 2021 [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://emastered.com/blog/echo-vs-delay>.
- [7] SVOBODA, Viktor. *Zvukové efekty díl 3.: Dozvukové jednotky a Echo* [online]. Fader.cz, 2017 [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <http://www.fader.cz/2017/04/06/zvukove-efekty-dil-3-dozvukove-jednotky-a-echo/>.
- [8] TAYLOR, Phil. *History of Delay* [online]. EFFECTRODE THERMIONIC [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://www.effectrode.com/knowledge-base/history-of-delay/>
- [9] *Frekvenční modulace* [online]. ackoo.estranky.cz [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://ackoo.estranky.cz/clanky/frekvencni-modulace.html>.
- [10] *PT2399 Datasheet (PDF) 1 Page - Princeton Technology Corp* [online]. alldatasheet.com [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/391581/PTC/PT2399/53/1/PT2399.html>.
- [11] *PT2399 Analysis* [online]. Elektromash [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://www.electromash.com/pt2399-analysis>.
- [12] *Bucket Brigade Devices: MN3007* [online]. Elektromash [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://www.electromash.com/mn3007-bucket-brigade-devices>
- [13] *Nyquistův–Shannonův vzorkovací teorém* [online]. Wikipedia.org [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Nyquist%C5%AFv%E2%80%93Shannon%C5%AFv_vzorkovac%C3%AD_teor%C3%A9m.
- [14] Self, D.: *Small Signal Audio Design*. Focal Press, 2010, 556 s. ISBN 978-0-240-52177-0. (EN)

- [15] *The alternative to bbd delays: the pt2399* [online]. anasounds.com, 2020 [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://anasounds.com/the-alternative-to-bbd-delays-the-pt2399/>
- [16] *Op Amps for Effects Pedals* [online]. davidmorrin.com [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://sites.google.com/a/davidmorrin.com/www/home/trouble/troubleeffects/op-amps>
- [17] ELLIOTT, Rod. *Guitar & Bass Pickup Output Voltages* [online]. sound-au.com, 2021 [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://sound-au.com/articles/guitar-voltage.htm>
- [18] *78L05 Datasheet (PDF) - National Semiconductor (TI)* [online]. alldatasheet.com [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/9047/NSC/78L05.html>
- [19] *TL072 Datasheet (PDF) - Texas Instruments* [online]. alldatasheet.com [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/28775/TI/TL072.html>
- [20] *BAT42 Datasheet (PDF) - STMicroelectronics* [online]. alldatasheet.com [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/21953/STMICROELECTRONICS/BAT42.html>
- [21] *J112 Datasheet (PDF) - Motorola, Inc* [online]. alldatasheet.com [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/3046/MOTOROLA/J112.html>
- [22] *Power Jack Protection Schemes for Effects Pedals* [online]. davidmorrin.com [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://sites.google.com/a/davidmorrin.com/www/home/trouble/troubleeffects/power-jack-modification>
- [23] *Operační zesilovače* [online]. is.muni.cz [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/jaro2015/F6270/um/Operacni_zesilovace_navod.pdf
- [24] *Buffers, impedance and other internet lore* [online]. mrblackpedals.com, 2012 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <https://www.mrblackpedals.com/blogs/straight-jive/6629774-buffers-impedance-and-other-internet-lore>
- [25] FORMOSA, Dan. *A Brief History of Tremolo* [online]. premierguitar.com, 2013 [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: <https://www.premierguitar.com/gear/a-brief-history-of-tremolo>
- [26] *Low-frequency oscillation* [online]. Wikipedia.org [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Low-frequency_oscillation
- [27] *Rezonanční obvod* [online]. Wikipedia.org [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Rezonan%C4%8Dn%C3%AD_obvod

- [28] *Synth DIY: the Relaxation LFO* [online]. [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://synthnerd.wordpress.com/2018/12/31/synth-diy-the-relaxation-lfo/>
- [29] *Oscilatory* [online]. sse-najizdarne.cz [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.sse-najizdarne.cz/ov-2-mb-uvs-55/>
- [30] ELLIOTT, Rod. *Guitar Tremolo Unit* [online]. Elliott Sound Products, 1999 [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: <https://sound-au.com/project29.htm>
- [31] ERNANDEZ, Alexandre. *The tremolo effect: origins, mechanisms and improvements!* [online]. anasounds.com, 2020 [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: <https://anasounds.com/the-tremolo-effect/>
- [32] *Variable-gain amplifier* [online]. Wikipedia.org [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Variable-gain_amplifier

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
LFO	Low-Frequency Oscillator
MIDI	Musical Instrument Digital Interface
AD	Analogově digitální převod
DA	Digitálně analogový převod
FM	Frekvenční modulace
AM	Amplitudová modulace
PM	Fázová modulace
AP	All-Pass filtr
BBD	Bucket-Brigade Devices
CCD	Charge-coupled device
CLK	Clock signal
THD	Total harmonic distortion
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
RAM	Random Access Memory
VCO	Voltage-controlled oscillator
MFB	Multi-feedback filtr
OZ	Operační zesilovač
LPF	Low pass filter
SNR	Signal to noise ratio
CR	Kondenzátor-rezistor článek (filtr)
RC	Rezistor-kondenzátor článek (filtr)
HP	Horní propust (filtr)
DP	Dolní propust (filtr)
V _{pp}	Peak-to-peak voltage
V _{rms}	Root-mean-square voltage
IO	Integrovaný obvod
Ref	Referenční hodnota napětí
NMOS	N-type metal-oxide-semiconductor
JFET	Junction gate field-effect transistor
VCA	Voltage-controlled amplifier
VCR	Voltage-controlled resistor
OTA	Operational transconductance amplifier
LDR	Light dependent resistor
LED	Light-emitting diode
DAW	Digital audio workstation
DIY	Do It Yourself
SMD	Surface Mount Device
DPDT	Double Pole, Double Throw přepínač
DPS	Deska plošných spojů
IN	Signálový vstup
OUT	Signálový výstup

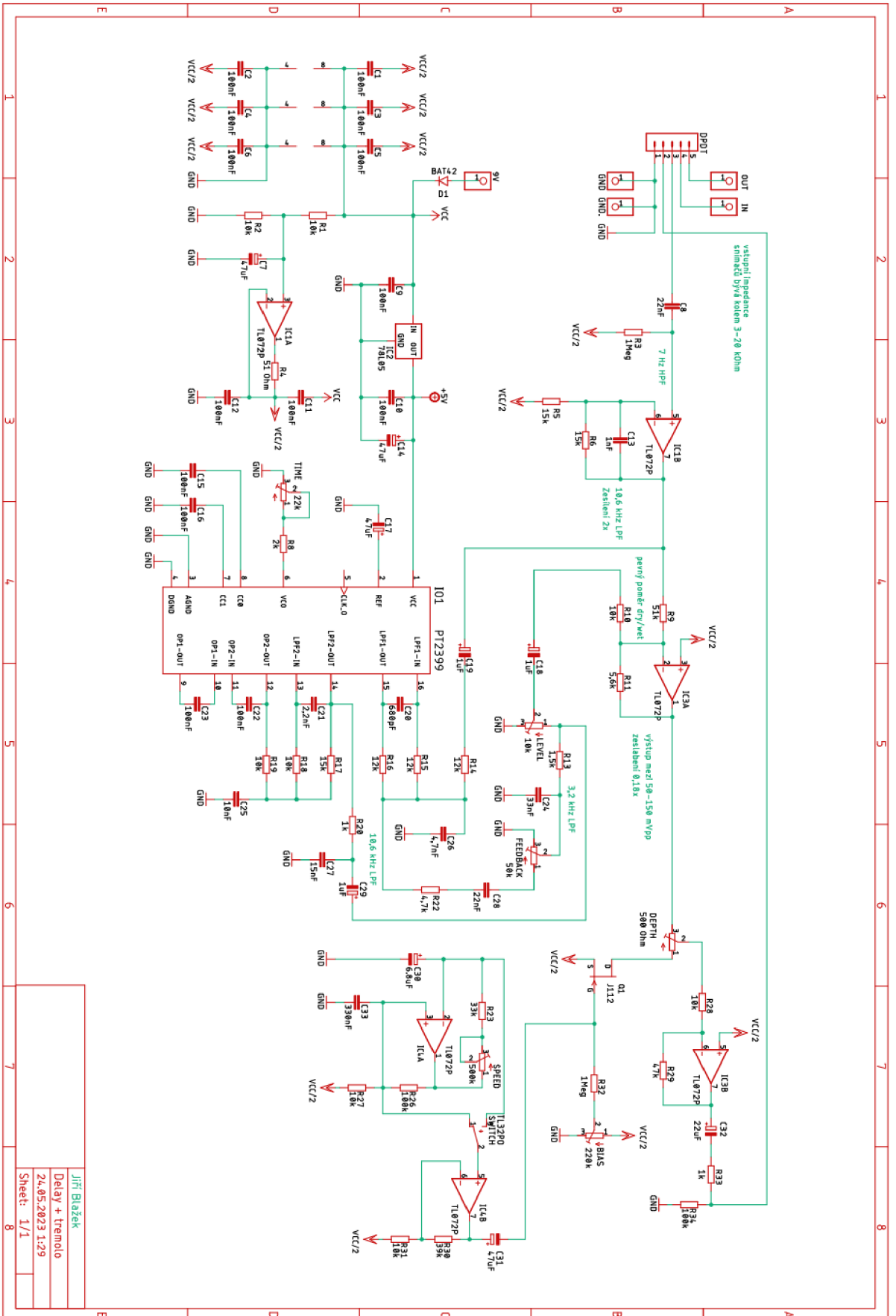
Symboly:

U	napětí	(V)
I	proud	(A)
f	frekvence	(Hz)
m	hloubka modulace	(-)
s	modulovaný signál	(-)
τ	časové zpoždění	(s)
R	odpor	(Ω)
C	kapacita	(F)
Z	impedance	(Ω)
T	čas	(s)
A_U	napět'ové zesílení/přenos	(dB)

10. SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A – SCHÉMA MULTIEFEKTU.....	58
PŘÍLOHA B – TABULKA SOUČÁSTEK.....	59
PŘÍLOHA C – PROJEKT A SOUBORY PROGRAMU EAGLE
PŘÍLOHA D – SOUBORY SIMULACÍ PROGRAMU LTSPICE
PŘÍLOHA E – DWG SOUBOR S NÁVRHEM VRTÁNÍ.....
PŘÍLOHA F – ZVUKOVÉ UKÁZKY MULTIEFEKTU

Příloha A - Schéma multieffektu



Jiří Blažek
Delay + Tremolo
24.05.2023 1:29
Sheet: 1/1

Příloha B - Tabulka součástek

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C2	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C3	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C4	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C5	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C6	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C7	47uF	E2,5-6E	elektrolytický kondenzátor
C8	22nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C9	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C10	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C11	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C12	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C13	1nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C14	47uF	E2,5-6E	elektrolytický kondenzátor
C15	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C16	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C17	47uF	E2,5-6E	elektrolytický kondenzátor
C18	1uF	E2,5-6E	elektrolytický kondenzátor
C19	1uF	E2,5-6E	elektrolytický kondenzátor
C20	680pF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C21	2,2nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C22	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C23	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C24	33nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C25	10nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C26	4,7nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C27	15nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C28	22nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C29	1uF	E2,5-6E	elektrolytický kondenzátor
C30	6.8uF	E2,5-6E	elektrolytický kondenzátor
C31	47uF	E2,5-6E	elektrolytický kondenzátor
C32	22uF	E2,5-6E	elektrolytický kondenzátor
C33	330nF	C1206	drátový keramický kondenzátor
D1	BAT42	DO35-7	schottkyho dioda
IC1	TL072P	DIL08	operační zesilovač
IC2	78L05	TO92	stabilizátor 5 V
IC3	TL072P	DIL08	operační zesilovač
IC4	TL072P	DIL08	operační zesilovač
IO1	PT2399	DIL16	zpožďovací čip
Q1	J112	TO92	unipolární JFET
R1	10k	R1206	SMD rezistor
R2	10k	R1206	SMD rezistor
R3	1Meg	R1206	SMD rezistor
R4	51 Ohm	R1206	SMD rezistor

R5	15k	R1206	SMD rezistor
R6	15k	R1206	SMD rezistor
R8	2k	R1206	SMD rezistor
R9	51k	R1206	SMD rezistor
R10	10k	R1206	SMD rezistor
R11	5,6k	R1206	SMD rezistor
R13	1,5k	R1206	SMD rezistor
R14	12k	R1206	SMD rezistor
R15	12k	R1206	SMD rezistor
R16	12k	R1206	SMD rezistor
R17	15k	R1206	SMD rezistor
R18	10k	R1206	SMD rezistor
R19	10k	R1206	SMD rezistor
R20	1k	R1206	SMD rezistor
R22	4,7k	R1206	SMD rezistor
R23	33k	R1206	SMD rezistor
R26	100k	R1206	SMD rezistor
R27	10k	R1206	SMD rezistor
R28	10k	R1206	SMD rezistor
R29	47k	R1206	SMD rezistor
R30	39k	R1206	SMD rezistor
R31	10k	R1206	SMD rezistor
R32	1Meg	R1206	SMD rezistor
R33	1k	R1206	SMD rezistor
R34	100k	R1206	SMD rezistor
SPEED	500k	RTRIM3296W	potenciometr
TIME	22k	RTRIM3296W	potenciometr
LEVEL	10k	RTRIM3296W	potenciometr
DEPTH	500 Oh	RTRIM3296W	potenciometr
FEEDBACK	50k	RTRIM3296W	potenciometr
BIAS	220K	RTRIM3339P	trimr
SWITCH	TL32PO	TL3XPO	přepínač LFO
DPDT	-	MA05-1	nožní přepínač
IN	-	1X01	piout
OUT	-	1X01	piout
GND	-	1X01	piout
GND	-	1X01	piout
GND.	-	1X01	piout
GND.	-	1X01	piout