

# 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

**HUDEBNÍ EFEKT FLANGER**

FLANGER MUSIC EFFECT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Tomáš Válek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. David Kubánek, Ph.D.**

**BRNO 2024**



# Bakalářská práce

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

**Student:** Tomáš Válek  
**Ročník:** 3

**ID:** 240213  
**Akademický rok:** 2023/24

## NÁZEV TÉMATU:

### Hudební efekt flanger

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte a popište princip, vlastnosti a možnosti realizace efektů se zpožďovací linkou. Zaměřte se na efekt flanger, navrhnete jeho strukturu na obvodové úrovni včetně parametrů součástek. Modelujte funkci efektu pomocí vybraného software pro simulaci elektronických obvodů a analyzujte výsledky. Vybranou variantu efektu zkonstruujte, změřte její vlastnosti a porovnejte je se simulací. Zpracujte laboratorní úlohu obsahující měření vlastností vámi zkonstruovaného přípravku. K úloze zpracujte návod a vzorový protokol.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] HUNTER, Dave. Guitar effects pedals: the practical handbook. Milwaukee: Backbeat Books, 2004. ISBN 978-0-87930-806-3.  
[2] SELF, Douglas. Small signal audio design. Burlington, MA: Focal Press, 2010. ISBN 0240521773.

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 28.5.2024

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

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

#### UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

V této práci jsou popsány vlastnosti a princip efektů se zpoždovací linkou. Efekt flanger je poté popsán z teoretické stránky až na úroveň dílčích obvodů a navržen na obvodové úrovni včetně parametrů součástek. Návrh flangeru byl simulován pomocí programu LTspice a výsledky analyzovány. Pro tento návrh byla navržena deska plošného spoje v programu Autodesk Fusion. Následně byl flanger zkonstruován jako laboratorní přípravek a jeho změřené parametry porovnány se simulacemi. Nakonec byl k přípravku vytvořen návod k měření a vzorový protokol.

## **Klíčová slova**

Flanger, efekt, BBD, zpoždovací linka, laboratorní úloha

## **Abstract**

This thesis describes the properties and principle of delay line effects. The flanger effect is then described from the theoretical side down to the circuit level and designed at the circuit level including component parameters. The flanger design was simulated using LTspice and the results analyzed. For this design, a printed circuit board was designed in Autodesk Fusion. Afterwards, the flanger was constructed as a laboratory device and its measured parameters were compared with the simulations. Eventually, a measurement guide and a sample measurement report were created for it.

## **Keywords**

Flanger, effect, BBD, delay line, laboratory exercise

## **Bibliografická citace**

VÁLEK, Tomáš. *Hudební efekt flanger*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159292>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce David Kubánek.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Tomáš Válek</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	<i>240213</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Bakalářská práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2023/24</i>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Hudební efekt flanger</i>

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: 23. května 2024

---

podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Davidu Kubánkovi, PhD. za cenné rady a účinnou pomoc při zpracování mé práce.

V Brně dne: 23. května 2024

---

podpis autora

# Obsah

ÚVOD .....	10
<b>1. HUDEBNÍ EFEKTY SE ZPOŽĎOVACÍ LINKOU .....</b>	<b>11</b>
1.1 HUDEBNÍ EFEKTY S KONSTANTNÍM ZPOŽDĚNÍM.....	12
1.2 HUDEBNÍ EFEKTY S PROMĚNNÝM ZPOŽDĚNÍM .....	12
<b>2. FLANGER.....</b>	<b>14</b>
2.1 BBD.....	14
2.2 GENERÁTOR HODINOVÝCH SIGNÁLŮ.....	16
2.3 GENERÁTOR POMALOBĚŽNÝCH PRŮBĚHŮ .....	17
<b>3. NÁVRH A SIMULACE .....</b>	<b>19</b>
3.1 VSTUPNÍ OBVODY .....	20
3.2 VSTUPNÍ SČÍTACÍ ZESILOVAČ .....	21
3.2.1 Vliv C3 a C4 .....	22
3.2.2 Vliv D1 a D2.....	23
3.3 ZPĚTNOVAZEBNÍ LINKA .....	24
3.4 KMITOČTOVÉ FILTRY .....	25
3.5 VÝSTUPNÍ SČÍTACÍ ZESILOVAČ A VÝSTUPNÍ OBVODY.....	26
3.6 CELKOVÉ ŘEŠENÍ EFEKTU .....	26
3.6.1 Kmitočtová charakteristika.....	26
3.6.2 Odezva na impuls.....	27
3.6.3 Zpracování zvuku.....	28
<b>4. KONSTRUKCE LABORATORNÍHO PŘÍPRAVKU.....</b>	<b>30</b>
4.1 NÁVRH NAPÁJECÍCH OBVODŮ .....	30
4.2 ZAPOJENÍ BBD A ŘÍDICÍHO OBVODU.....	31
4.3 NÁVRH DPS.....	32
4.4 INSTALACE ZAŘÍZENÍ DO KRABÍČKY .....	34
4.5 MĚŘENÍ A POROVNÁNÍ SE SIMULACÍ .....	36
4.5.1 Modulová kmitočtová charakteristika .....	36
4.5.2 Impedanční charakteristika .....	37
4.5.3 Analýza limitace signálu.....	38
<b>5. NÁVOD K MĚŘENÍ LABORATORNÍ ÚLOHY .....</b>	<b>39</b>
<b>6. ZÁVĚR.....</b>	<b>40</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>41</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>42</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>43</b>

# Seznam obrázků

1.1	Obecné blokové schéma efektu se zpožďovací linkou.....	11
1.2	Modulová kmitočtová charakteristika univerzálního hřebenového filtru (zleva FIR a IIR). [1].....	12
1.3	Obecná bloková schémata efektů s konstantním zpožděním (zleva echo, multitap echo, infinite echo).....	12
1.4	Obecná bloková schémata efektů s proměnným zpožděním (zleva vibrato, chorus, flanger).....	13
2.1	Obecné blokové schéma efektu flanger rozšířené o generátor hodinových signálů.....	14
2.2	Vnitřní zapojení BBD zpožďovací linky (unipolární vlevo a bipolární vpravo). [5].....	15
2.3	Princip předávání náboje v BBD zpožďovacích linkách. [5].....	15
2.4	Uspořádání elektrod v integrovaném obvodu BBD. [5].....	16
2.5	MOS integrovaný obvod BBD se 72 paměťovými kondenzátory. [5].....	16
2.6	Blokové schéma integrovaného obvodu MN3102. [7].....	17
2.7	Zapojení součástek R a C pro řízení kmitočtu komplementárních hodinových pulzů. [7].....	17
2.8	Příklad zapojení generátoru pomaloběžných průběhů. [8].....	18
3.1	Kompletní návrh efektu flanger v programu LTspice.....	19
3.2	Vstupní obvod s operačním zesilovačem. [9].....	20
3.3	Schéma kompletního vstupního sčítacího zesilovače.....	21
3.4	Modulová kmitočtová charakteristika vstupního sčítacího zesilovače.....	22
3.5	Simulovaná kmitočtová charakteristika modulu přenosu – vliv C3 a R4 na celkovou charakteristiku vstupního sčítacího zesilovače.....	22
3.6	Simulovaná kmitočtová charakteristika modulu přenosu – vliv C4 a R6 na celkovou charakteristiku vstupního sčítacího zesilovače.....	23
3.7	Simulované převodní charakteristiky vstupního sčítacího zesilovače (vlevo jsou diody odpojeny, vpravo zapojeny).....	24
3.8	Vliv C5 na kmitočtovou charakteristiku modulu přenosu zpětnovazební linky.....	25
3.9	Kmitočtová charakteristika modulu přenosu použitých kmitočtových filtrů typu DP.....	26
3.10	Simulovaná kmitočtová charakteristika modulu přenosu celého efektu flanger.....	27
3.11	Simulovaná odezva na impuls celého efektu flanger.....	28
3.12	Řešení zdroje zvuku včetně zeslabovacího článku a simulačních příkazů.....	29
4.1	Odvození pomocné země napětovým děličem pro symetrické napájení OZ.....	30
4.2	Použití stabilizátoru 78L05 („REG“) pro napájení BBD a řídicího obvodu.....	31
4.3	Schémata rozložení vývodů pro řídicí obvod („DRIVER“) a MN3207.....	31
4.4	Zapojení BBD a řídicího obvodu v navrženém flangeru.....	32
4.5	Výsledný návrh DPS – pohled shora.....	33
4.6	Výsledný návrh DPS – pohled zdola.....	33
4.7	Osazená DPS včetně vodičů na připojení potenciometrů a konektorů.....	34
4.8	Hotový laboratorní přípravek.....	35
4.9	Modulová kmitočtová charakteristika (MANUAL na minimu).....	36
4.10	Modulová kmitočtová charakteristika (MANUAL na maximu).....	37
4.11	Charakteristika modulu a fáze impedance.....	38
6.1	Blokové schéma flangeru.....	48
6.2	Propojení přípravku s analyzátozem Bode 100.....	49
6.3	Propojení přípravku s generátorem a osciloskopem.....	50



## Seznam tabulek

3.1	Simulační „SPICE directive“ příkazy potřebné pro simulaci flangeru.....	19
4.1	Ovládací prvky přípravku a jejich funkce.....	35
6.1	Nastavení Bode Analyzer Suite pro měření.....	49

# ÚVOD

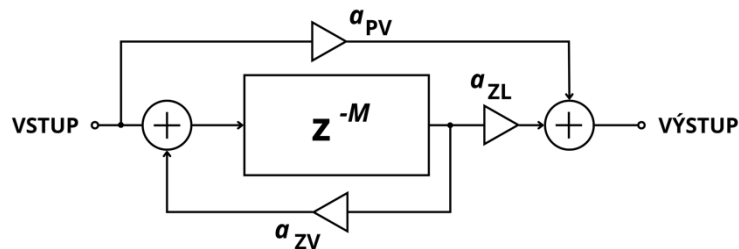
Flanger je obecně zvukový efekt, který při zpracování zvukového signálu využívá zpoždovací linku. Do rodiny efektů se zpoždovací linkou se dále řadí například echo, chorus nebo vibrato. U flangeru je zpožděný signál přiveden zpětnou vazbou na vstup efektu. Na výstupu se navíc sčítá tento zpožděný signál se signálem původním. Hodnota okamžitého zpoždění je pak modulována řídicím signálem, který nejčastěji pochází z generátoru pomaloběžných průběhů. Zdrojem vstupního signálu může být například kytara.

Sečtením přímé a zpožděné signálové linky vzniká efekt hřebenového filtru, jehož minima a maxima se periodicky posouvají v kmitočtové charakteristice v důsledku modulace okamžité doby zpoždění. Výsledný efekt údajně zní tak, jako by zvuk procházel kovovými trubkami vzduchotechniky, nebo jako průlet stíhačky. Na tento charakteristický zvuk flangeru má zásadní vliv zesílení zpětnovazební signálové linky.

Cílem je navrhnout schéma efektu na obvodové úrovni včetně parametrů součástek a provést simulace. Následně navrhnout desku plošných spojů, vložit do krabičky a doplnit ovládací prvky. Takto vzniklý přípravek bude sloužit jako laboratorní pomůcka, aby studenti měli možnost blíže se seznámit s efekty se zpoždovací linkou. Přípravek bude také změřen a výsledky porovnány se simulacemi. K přípravku bude vytvořen návod k měření. Důležité je, aby studenti porozuměli nejen vnitřní stavbě a principu fungování, ale také tomu, jaké parametry efektu jsou řízeny ovládacími prvky na komerčně dostupných pedálových efektech.

# 1. HUDEBNÍ EFEKTY SE ZPOŽĎOVACÍ LINKOU

Tato kapitola je zaměřena na hudební efekty, které pro svou funkci využívají zpožďovací prvek. Takový efekt může mít tři signálové cesty – přímou, zpožděnou a zpětnovazební. Signál z přímé větve je na výstupu sečten se zpožděným signálem. Pomocí zpětné vazby je z výstupu zpožďovací linky přiveden signál zpožděný o  $M$  vzorků opět na její vstup. Univerzální schéma efektu se zpožďovací linkou je na obr. 1.1.



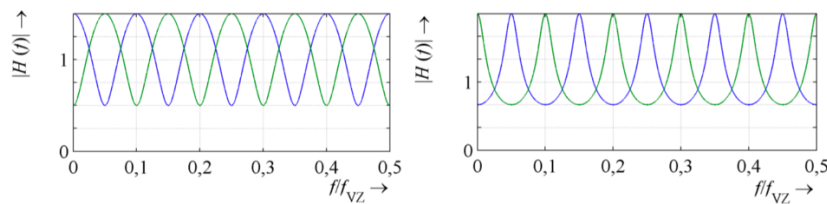
Obrázek 1.1 Obecné blokové schéma efektu se zpožďovací linkou.

Přenosová funkce má tvar [1]

$$H(z) = \frac{a_{PV} + (a_{PV} a_{ZV} + a_{ZL} - a_{ZV}) z^{-M}}{1 - a_{ZV} z^{-M}}, \quad (1.1)$$

kde  $a_{PV}$  je zesílení přímé větve,  $a_{ZL}$  je zesílení zpožďovací linky a  $a_{ZV}$  je zesílení zpětnovazební větve.

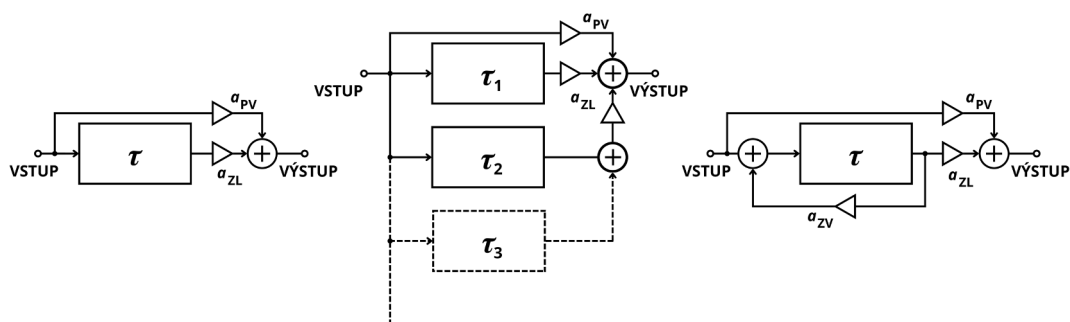
Takový součet signálů z přímé a zpožďovací linky vytvoří efekt hřebenového filtru, jehož přenosová charakteristika je na obr. 1.2. Na něm lze vidět, že existuje hřebenový filtr typu FIR (konečná impulzní odezva) a IIR (nekonečná impulzní odezva). FIR je při nulovém zesílení zpětnovazební větve a IIR pro nulové zesílení přímé a nenulové zesílení zpětnovazební větve. Na něm lze pozorovat minima a maxima. Ta vznikají tak, že když se sčítá signál přímý se zpožděným, dojde na určitých kmitočtech k tomu, že tyto dva signály budou navzájem ve fázi (maxima), resp. v protifázi (minima). Pokud je signál procházející větví s nenulovým zesílením v průběhu invertován, platí zelená křivka, pokud ne, tak platí modrá. Pro neinvertovaný signál platí, že maxima budou na kmitočtech  $f_{\max} = \frac{k}{\tau}$  a minima na kmitočtech  $f_{\min} = \frac{2k+1}{2\tau}$ , kde  $\tau$  je doba zpoždění signálu a  $k = 0, 1, 2, \dots$  Pro invertovaný signál jsou vzorce naopak. [1]



Obrázek 1.2 Modulová kmitočtová charakteristika univerzálního hřebenového filtru (zleva FIR a IIR). [1]

## 1.1 Hudební efekty s konstantním zpožděním

Podle doby zpoždění a zesílení jednotlivých větví lze dosáhnout různých efektů. Bloková schémata vybraných známých efektů jsou na obr. 1.3. Pokud má nenulové zesílení přímá a zpožděná větev a doba zpoždění je delší než 50 ms, jedná se o efekt echo. Zde existují různé varianty. Pokud má i zpětnovazební větev nenulové zesílení, efekt se pak nazývá infinite echo. Pokud je zpožděných větví více a zpětnovazební větev má nulové zesílení, jde o efekt multitap echo. Pokud je zapojení stejné jako u efektu echo, ale doba zpoždění je 25–50 ms, jde o efekt slapback (doubling). Je-li doba zpoždění kratší než 25 ms, efekt se nazývá phase shifter nebo resonator. [15]



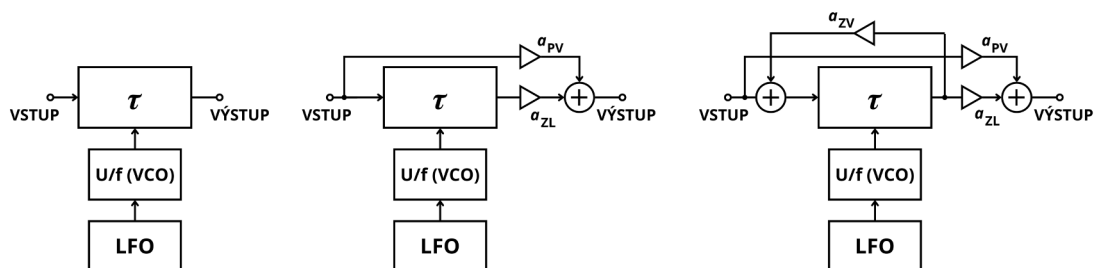
Obrázek 1.3 Obecná bloková schémata efektů s konstantním zpožděním (zleva echo, multitap echo, infinite echo)

## 1.2 Hudební efekty s proměnným zpožděním

U této skupiny efektů se okamžitá doba zpoždění  $\tau$  mění v závislosti na čase. To je v praxi řešeno nejčastěji pomocí LFO, neboli nízkofrekvenčního oscilátoru. Amplituda LFO určuje hloubku modulace a kmitočet LFO určuje rychlost. U LFO se řádově používá kmitočet 0,1–10 Hz.

Jedny z nejvýznamnějších efektů s proměnným zpožděním jsou vibrato, chorus a flanger, jejichž obecná bloková schémata jsou na obr. 1.4. Vibrato má nenulové zesílení pouze zpožděné signálové větve a využívá se sinusový průběh LFO. Chorus má nenulové zesílení přímé a zpožděné větve. Často se zde využívá psychoakustiky a signál z přímé

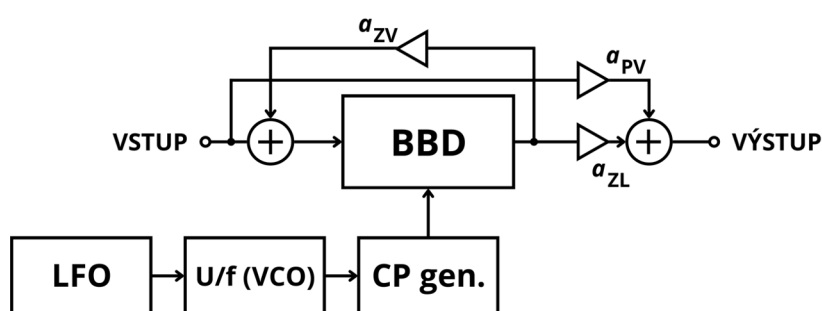
větve je přiveden do jednoho ucha a signál ze zpožděné větve do druhého ucha bez nutnosti sčítání obou větví. Flanger má u všech tří větví nenulové zesílení a stejně jako u vibrata se standardně používá sinusový průběh signálu LFO. Lze se také setkat s tzv. vícefázovými efekty. Ty mají více zpožděných větví s rozdílnou fází, amplitudou nebo kmitočtem řídicího signálu. [15]



Obrázek 1.4 Obecná bloková schémata efektů s proměnným zpožděním (zleva vibrato, chorus, flanger)

## 2. FLANGER

Tato kapitola se podrobně věnuje efektu flanger, který je předmětem této práce. Jak již bylo zmíněno, jedná se o efekt se zpoždovací linkou s proměnným zpožděním. Často je zvuk flangeru srovnáván se zvukem prolétající stíhačky. Parametry, které lze ovládat, jsou střední doba zpoždění signálu ve zpoždovací lince (manual), amplituda LFO neboli hloubka modulace (depth), kmitočet LFO (rate) a poměr zesílení přímé a zpětnovazební větve (resonance nebo regen). Flanger je na trhu běžně dostupný jak v softwarové podobě jako VST (virtual studio technology) plug-in, tak i v hardwarové formě jako například kytarový pedál. U hardwarového provedení může být efekt řešen jak analogově, tak digitálně. Detailní blokové schéma flangeru je na obr. 2.1.

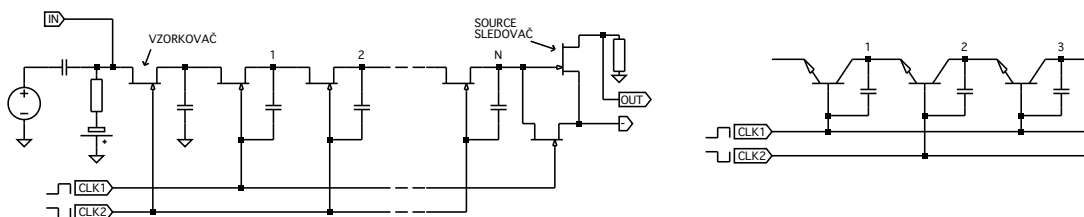


Obrázek 2.1 Obecné blokové schéma efektu flanger rozšířené o generátor hodinových signálů

Celkem je třeba vyřešit tři signálové cesty, a to přímou, zpoždovací a zpětnovazební linku. U přímé a zpětnovazební linky je třeba řešit pouze zesílení, ale u zpoždovací je nutné realizovat samotné zpoždění řízené LFO. Možností zpoždění signálu je více. Lze použít nějaký AD (analogově-digitální) převodník, například sigma-delta, a signál zpoždit digitálně, nebo využít integrovaného BBD obvodu.

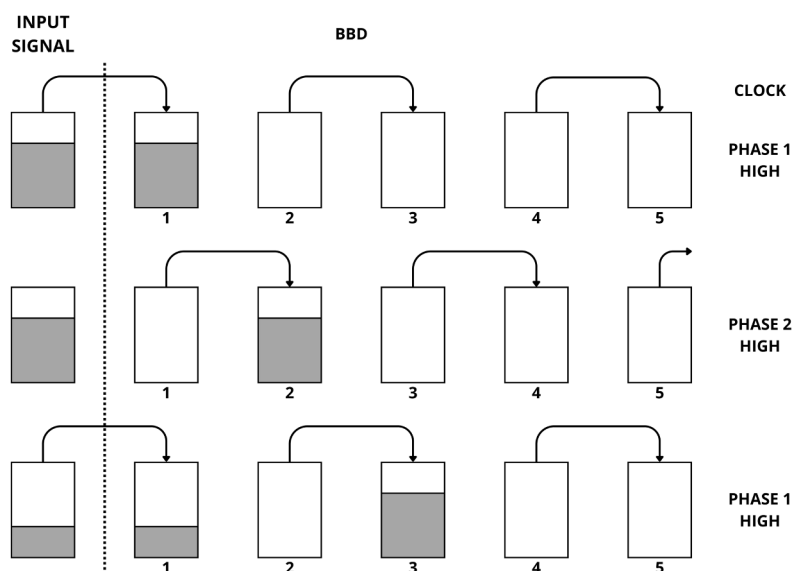
### 2.1 BBD

BBD, neboli bucket brigade device (obvod kbelíkové brigády), je integrovaný obvod zajišťující zpoždění signálu. Skládá se z řady tranzistorů a paměťových kondenzátorů. Řešení může být unipolární nebo bipolární. Vnitřní zapojení unipolárního řešení BBD je znázorněno na obr. 2.2. Lze si ho analogicky přestavit jako řadu lidí s kbelíky při hašení požáru, přičemž si vzájemně přelévají vodu z kbelíku do kbelíku. Ve skutečnosti si takto tranzistory a kondenzátory předávají elektrický náboj. [4]



Obrázek 2.2 Vnitřní zapojení BBD zpožďovací linky (unipolární vlevo a bipolární vpravo). [5]

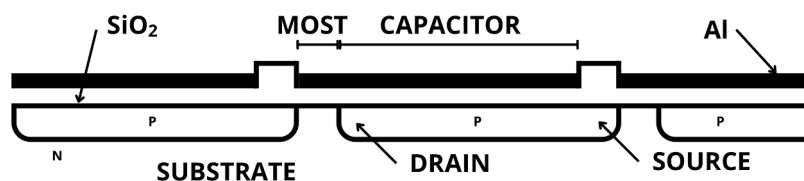
Toto předávání je přesně řízeno dvěma komplementárními hodinovými signály obdélníkového tvaru. Jeden z těchto signálů řídí liché stupně zpožďovací linky, druhý sudé stupně. Tento princip je popsán na obr. 2.3. Platí, že čím je větší kmitočet hodinového signálu, tím je doba zpoždění nižší.



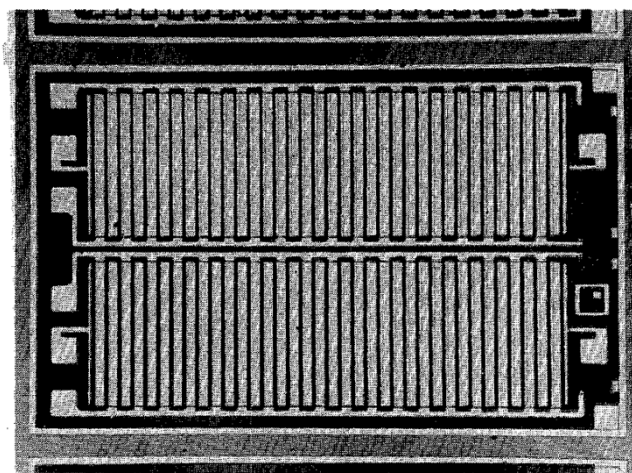
Obrázek 2.3 Princip předávání náboje v BBD zpožďovacích linkách. [5]

Signál je tímto způsobem vzorkován a jednotlivé vzorky jsou přenášeny postupně na výstup. Vzorkovací kmitočet je dvojnásobkem kmitočtu hodinových signálů. Úroveň jednotlivých vzorků však není vyjádřena přímo nábojem, ale úbytkem od úrovně hodinového signálu. Čím více paměťových článků je v celém obvodu, tím je doba zpoždění vyšší. [5]

Řešení integrovaného obvodu unipolárního BBD posuvného registru je na obr. 2.4. Lze vidět, že elektroda D (drain) jednoho článku tvoří zároveň S (source) druhého článku. Díky tomu nepotřebují D a S elektrody propojení a celý řetězec lze realizovat jednodušeji. Obr. 2.5 pak znázorňuje MOS integrovaný obvod BBD se 72 paměťovými buňkami s kapacitou po 8 pF.



Obrázek 2.4 Uspořádání elektrod v integrovaném obvodu BBD. [5]



Obrázek 2.5 MOS integrovaný obvod BBD se 72 paměťovými kondenzátory. [5]

Příkladem takového integrovaného obvodu použitelného v praxi je MN3204 nebo MN3207. Liší se od sebe pouze tím, že MN3204 má 512 paměťových článků a MN3207 jich má 1024. Tyto integrované obvody jsou optimalizované pro zpracování zvuku. Z katalogového listu tohoto obvodu lze vyčíst, že okamžitá doba zpoždění se může pohybovat od 2,56 ms do 51,2 ms. [6]

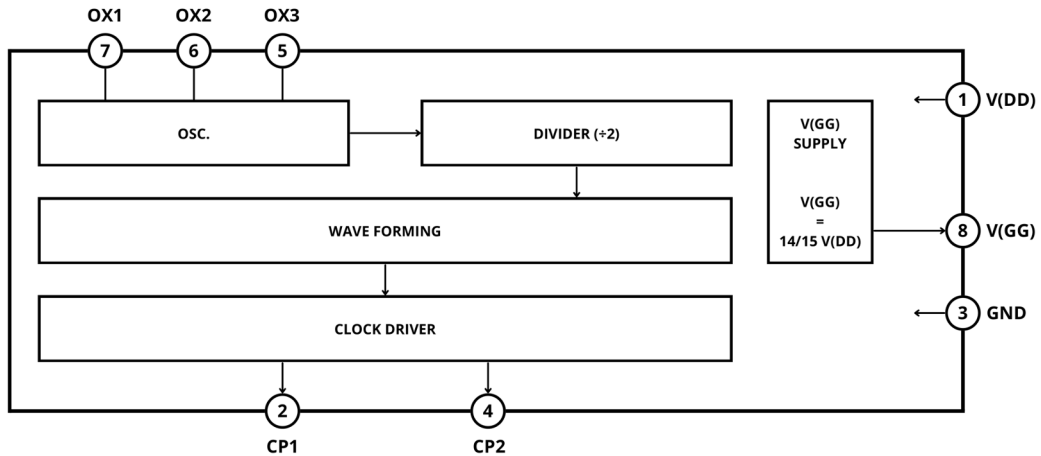
## 2.2 Generátor hodinových signálů

Jak již bylo výše zmíněno, BBD posuvný registr potřebuje ke svému fungování dva komplementární obdélníkové hodinové signály. V praxi se tento problém řeší tak, že se použije integrovaný obvod přímo navržený jako generátor hodinových signálů pro daný typ integrovaného obvodu BBD.

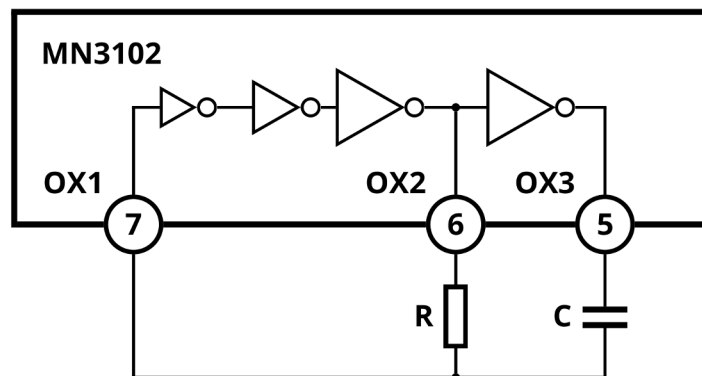
Příkladem takového generátoru je MN3102, jehož blokové schéma je na obr. 2.6. Ten je navržen pro ovládání obvodu MN3207. Na výstupech CP1 a CP2 generuje taktovací hodinový signál a na výstupu  $V_{GG}$  generuje vhodné napětí pro elektrody G (gate) tranzistorů v BBD obvodu. Kmitočet hodinových pulzů je řízen připojeným rezistorem a kondenzátorem stejně, jako je na obr. 2.7. Kmitočet je možné také řídit vnějším signálem, díky čemuž lze dosáhnout v čase proměnného kmitočtu generovaných hodinových signálů. To však nelze přímo napětím pomocí LFO, ale je třeba využít VCO, neboli



napětím řízený oscilátor. Ten obvodu MN3102 „vnutí“ požadovaný kmitočet. Napětím řízený oscilátor zde slouží jako převodník napětí-kmitočet, a tak ho lze řídit přímo pomocí LFO.



Obrázek 2.6 Blokové schéma integrovaného obvodu MN3102. [7]



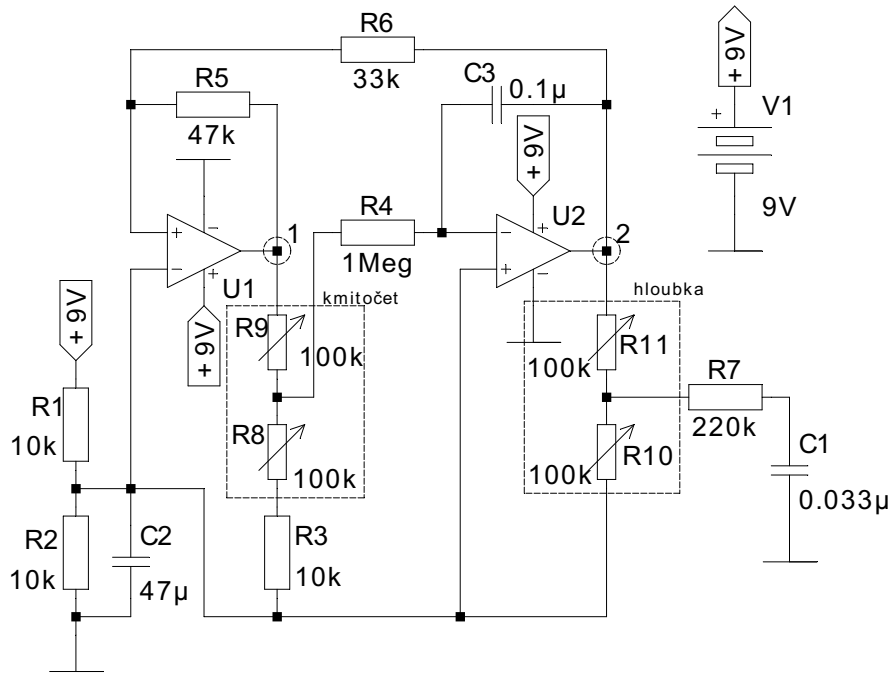
Obrázek 2.7 Zapojení součástek R a C pro řízení kmitočtu komplementárních hodinových pulzů. [7]

### 2.3 Generátor pomaloběžných průběhů

LFO (low frequency oscillator) je generátor pomaloběžných průběhů, který se využívá pro řízení okamžité doby zpoždění u BBD posuvného registru. Jak již bylo zmíněno, je k tomu potřeba ještě VCO jako převodník napětí-kmitočet.

Příklad zapojení LFO je na obr. 2.8. Hlavními částmi obvodu jsou komparátor (U1) a integrátor (U2). Komparátor přivádí napětí na vstup integrátoru a když dosáhne výstupní napětí integrátoru nastavené hranice, komparátor se překlápí a začne na vstup integrátoru přivádět napětí opačné polarity. Potenciometry, které jsou na obr. 2.8 vyjádřeny vždy dvojicí rezistorů, ovládají kmitočet a maximální výchylku (hloubku

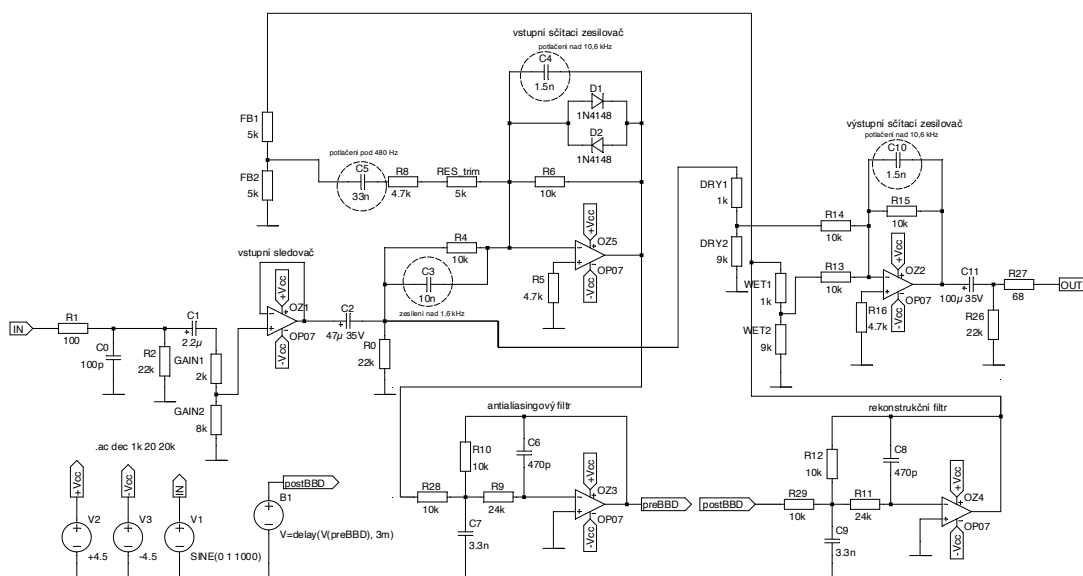
modulace) generovaného signálu. Výsledkem je na uzlu 2 trojúhelníkový signál, který lze pomocí tvarovacích obvodů změnit například na sinus. Pokud by byl jako výstup LFO použit už výstup komparátoru (uzel 1), byl by výsledný signál obdélníkového tvaru, protože, jak již bylo zmíněno, komparátor takto periodicky střídá kladnou a zápornou polaritu napětí. V hudebních efektech se ale nejčastěji využívá sinus nebo trojúhelník. [8]



Obrázek 2.8 Příklad zapojení generátoru pomaloběžných průběhů. [8]

### 3. NÁVRH A SIMULACE

Návrh efektu flanger v této práci vychází z volně dostupných schémat a odborné literatury. V tomto schématu je jeden zásadní rozdíl oproti běžným návrhům. V reálném provedení je využito speciálního řídicího integrovaného obvodu, který kombinuje LFO, VCO a generátor hodinových signálů. Tím se obvod o významnou část zjednodušuje. V této práci bude při simulacích řídicí integrovaný obvod a BBD registr nahrazen zdrojem napětí umožňujícím zpoždění signálu. Hotový návrh pro simulaci je na obr. 3.1.



Obrázek 3.1 Kompletní návrh efektu flanger v programu LTspice

V následujících kapitolách budou všechny části navrženého flangeru popsány a simulovány v programu LTspice. Poté bude simulován celý efekt. Pro zjednodušení u simulací nejsou řešeny napájecí obvody OZ (operačních zesilovačů), zapojení BBD a řídicího integrovaného obvodu. Napájecí obvody budou řešeny až při návrhu DPS. Zpoždovací linka, která se nachází mezi uzly „preBBD“ a „postBBD“ na obr. 3.1, bude simulována pomocí konstantního časového zpoždění pomocnou součástkou B1, protože neexistují LTspice modely součástek MN3207 a MN3102. Všechna dílčí schémata pro simulace jednotlivých částí flangeru jsou v příloze A.

Pro spuštění jakékoli analýzy vyžaduje LTspice simulační příkaz. V tab. 3.1 jsou uvedeny příkazy potřebné pro všechny výše uvedené simulace.

Tabulka 3.1 Simulační „SPICE directive“ příkazy potřebné pro simulaci flangeru

Typ simulace	Syntaxe
V časové oblasti	<code>.tran [t<sub>stop</sub>]</code>
V kmitočtové oblasti	<code>.ac [oct/dec/lin] [počet_kroků] [f<sub>start</sub>] [f<sub>stop</sub>]</code>

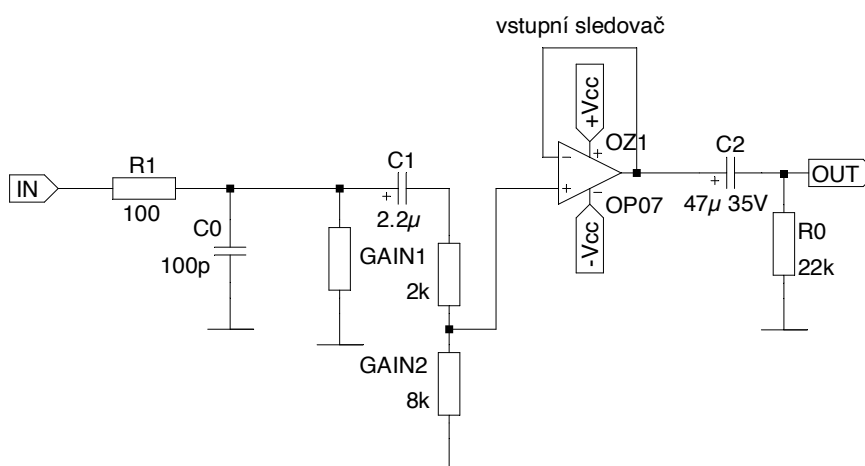
Stejnosemřná analýza	.dc [zdroj] [V <sub>start</sub> ] [V <sub>stop</sub> ] [krok]
Krokování parametru	.step param X [start] [stop] [krok]
Zpracování zvuku	.wave [soubor] [bit_hloubka] [f <sub>s</sub> ] [výstup]

Simulace budou prováděny pouze ve slyšitelném pásmu 20–20000 Hz. Simulace kmitočtových charakteristik využívají příkaz „ac“ a budou s přesností 1000 kroků na dekádu pro vysoké rozlišení výsledků. LTspice příkaz bude vypadat následovně:  
`.ac dec 1k 20 20k.`

### 3.1 Vstupní obvody

Na vstupu bylo použito zapojení, které je na obr. 3.2. Hned za vstupem je pasivní kmitočtový filtr typu dolní propust, tzv. roofing filter. Ten slouží pouze pro odstranění rušivých radiofrekvenčních signálů, aby nedošlo v aktivních prvcích k jejich demodulaci do slyšitelného pásma. Je třeba si uvědomit, že rezistor R1 je v sérii s výstupní impedancí zdroje signálu. Pokud je (v nejhorsím možném případě) výstupní impedance zdroje 2,5 kΩ, je pak mezní kmitočet filtru okolo 612 kHz. To je dostatečně vyšší kmitočet než horní hranice slyšitelného pásma. Doporučeno je umístit tento pasivní filtr typu DP (dolní propust) při konstrukci co nejbliže vstupnímu konektoru, aby nedošlo k rozšíření radiofrekvenčního rušení uvnitř zařízení. [9]

Kondenzátor C2 slouží k oddělení stejnosměrné složky. Je navržen pro napětí 35 V z toho důvodu, aby nedošlo k jeho zničení při připojení k poškozenému zařízení. Rezistor R2 slouží k vybíjení C1. C2 odděluje stejnosměrnou složku signálu na výstupu operačního zesilovače, který je zde zapojen jako napěťový sledovač s jednotkovým přenosem. R0 zde slouží k vybíjení C2. [9]

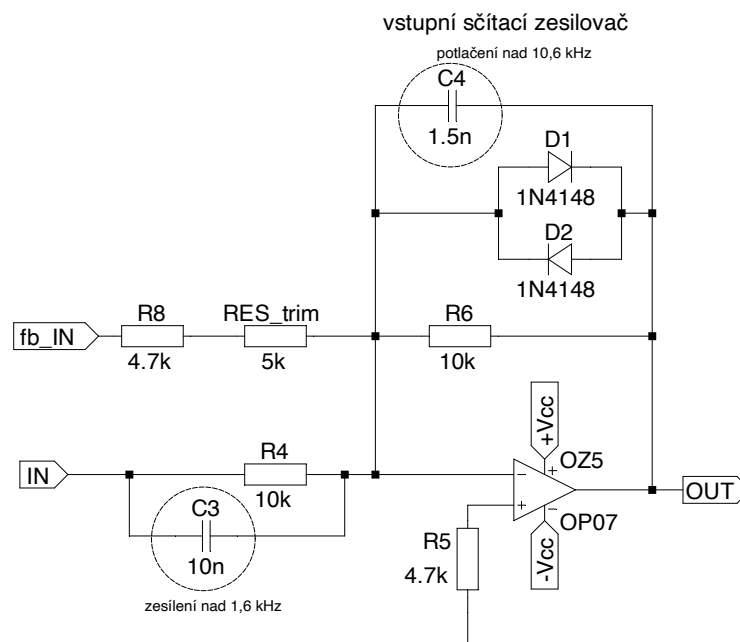


Obrázek 3.2 Vstupní obvod s operačním zesilovačem. [9]

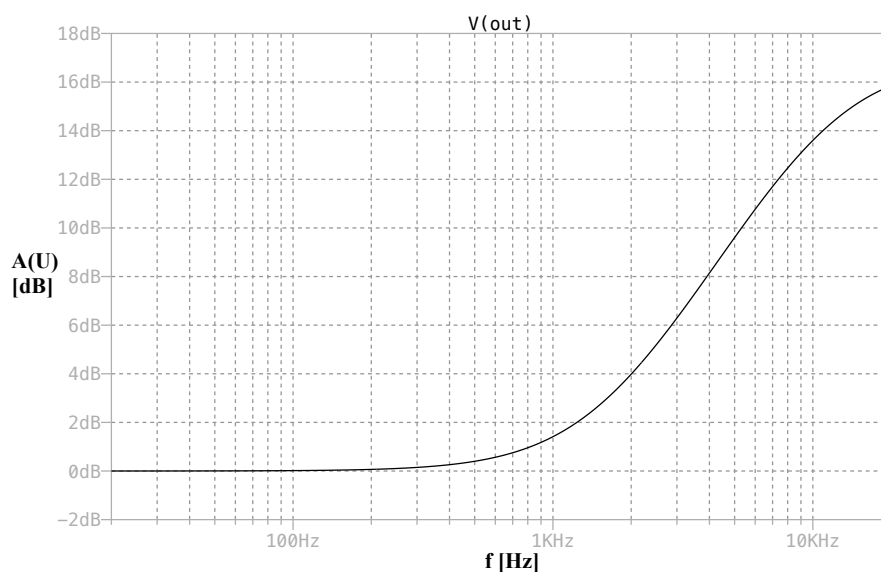
## 3.2 Vstupní sčítací zesilovač

Sčítací zesilovač slouží v tomto případě k sečtení signálů ze zpětnovazební a přímé linky. Je využito zapojení operačního zesilovače jako sčítacího zesilovače, kdy jsou na invertující vstup OZ přivedeny všechny sčítané signály.

Ve schématu na obr. 3.3 jsou vyznačeny kondenzátory C3 a C4, protože mají mít vliv na modulovou kmitočtovou charakteristiku přenosu celého bloku vstupního zesilovače. Je u nich uvedeno, že RC článek C3 a R4 posiluje kmitočty nad 1,6 kHz (označení „zesílení nad 1,6 kHz“) a článek C4 a R6 zeslabuje kmitočty nad 10,6 kHz (označení „potlačení nad 10,6 kHz“). Dále jsou ve zpětné vazbě operačního zesilovače antiparalelně zapojeny diody D1 a D2, jejichž funkce spočívá v omezení výstupního signálu celého vstupního bloku. Postupně bylo provedeno několik simulací pro ověření vlivu jednotlivých součástek C3 a C4 na kmitočtovou charakteristiku modulu přenosu a D1 a D2 na převodní charakteristiku. Modulová kmitočtová charakteristika celého vstupního zesilovače je na obr. 3.4. [10]



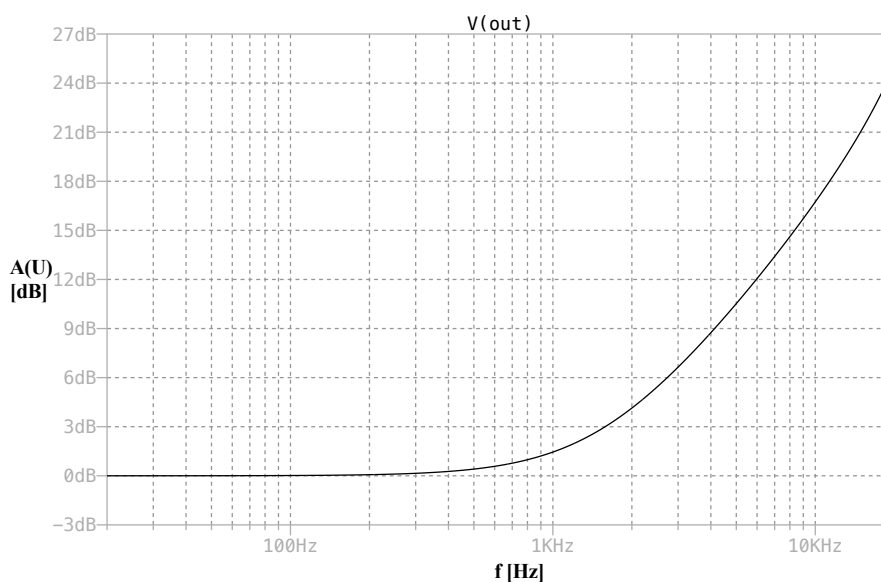
Obrázek 3.3 Schéma kompletního vstupního sčítacího zesilovače.



Obrázek 3.4 Modulová kmitočtová charakteristika vstupního sčítacího zesilovače.

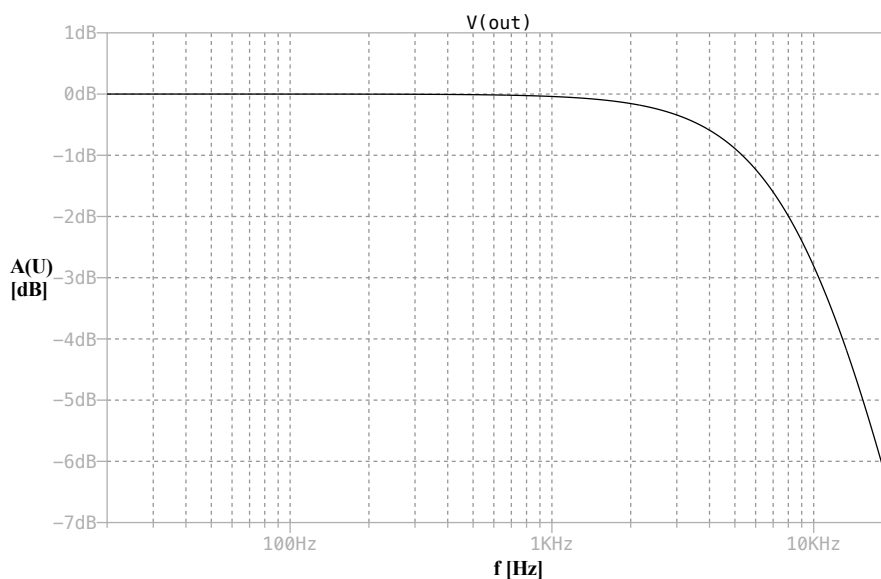
### 3.2.1 Vliv C3 a C4

Jak již bylo zmíněno, C3 a C4 tvoří spolu s R4 a R6 RC články. Při jejich simulaci je použit stejný vstupní obvod a vstupní sčítací zesilovač jako v celkovém návrhu, a to kvůli zachování stejných impedancí na výstupu vstupního obvodu a vstupu sčítacího zesilovače. Na obr. 3.5 je zjištěná modulová kmitočtová charakteristika přenosu článku C3 a R4 (simulační schéma je v příloze A.1). Je vidět, že tento článek výrazně zesiluje vyšší kmitočty a skutečně dojde k zesílení o 3 dB na kmitočtu zhruba 1,6 kHz.



Obrázek 3.5 Simulovaná kmitočtová charakteristika modulu přenosu – vliv C3 a R4 na celkovou charakteristiku vstupního sčítacího zesilovače

Článek s C4 a R6 se liší tím, že je ve zpětnovazební smyčce operačního zesilovače. Zjištěná charakteristika modulu přenosu je na obr. 3.6 a schéma použité při simulaci je v příloze A.2. Jak lze vidět, pokles o 3 dB nastane na kmitočtu okolo 10 kHz.

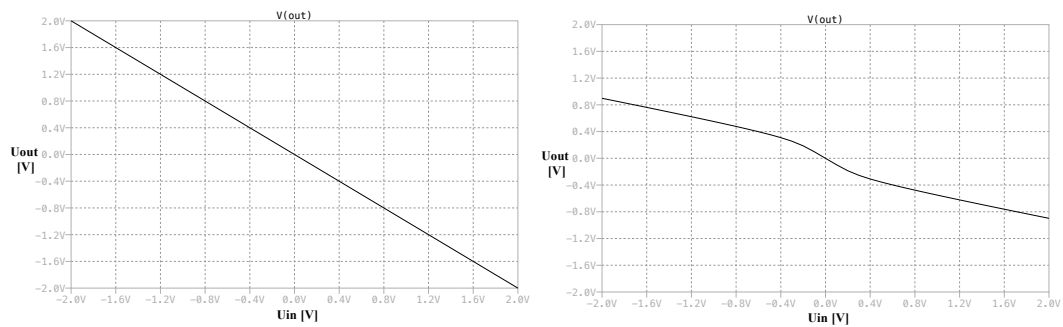


Obrázek 3.6 Simulovaná kmitočtová charakteristika modulu přenosu – vliv C4 a R6 na celkovou charakteristiku vstupního sčítacího zesilovače

### 3.2.2 Vliv D1 a D2

Tyto dvě diody by měly sloužit k omezení signálu na úroveň, kterou zvládne BBD obvod zpracovat [10]. Pomocí stejnosměrné analýzy (DC sweep) byla zjištěna hranice, na jaké napětí na výstupu je vstupní sčítací zesilovač omezen. Rozsah vstupních napětí byl zvolen  $\pm 2$  V, a to proto, aby simulace proběhla v obou polaritách a aby rozsah napětí byl větší, než bude rozsah zpracovávaných zvukových signálů. Výsledný graf převodní charakteristiky se zapojenými a odpojenými diodami je na obr. 3.7 a simulační schémata jsou v přílohách A.3 a A.4. Z grafů je zřejmé, že diody opravdu snižují výstupní napětí.

Dále lze vidět, že u zapojených diod je ovlivněn tvar převodní charakteristiky v okolí 0 V, a proto bude signál zpracovávaný touto větví lehce zkreslený. To je dáno prahovými napětími použitých diod. V důsledku invertujícího zapojení s operačním zesilovačem jsou obě tyto charakteristiky klesající.



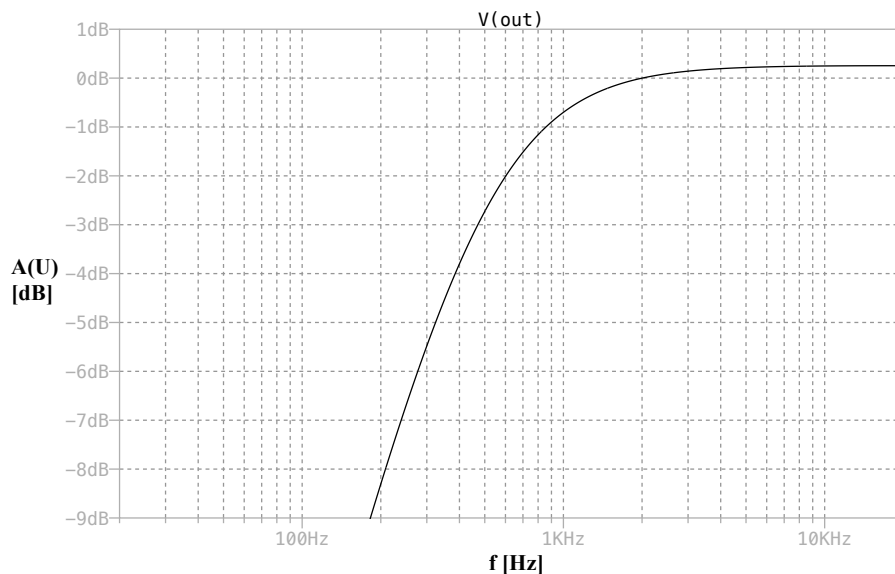
Obrázek 3.7 Simulované převodní charakteristiky vstupního sčítacího zesilovače (vlevo jsou diody odpojeny, vpravo zapojeny)

### 3.3 Zpětnovazební linka

Zpětnovazební linka není nijak složitá, ale i tak je třeba popsat její strukturu. Obsahuje dva regulační prvky – trimr a potenciometr Resonance, kterým se efekt uživatelsky ovládá. Nastavení trimru by mělo proběhnout při krajní poloze potenciometru Resonance, ve které je úroveň zpětnovazebního signálu největší. V tu chvíli se trimr nastaví do polohy, kdy nedochází k rozkmitání vstupního sčítacího zesilovače. [10]

Dále obsahuje zpětnovazební linka kondenzátor C5, u kterého je na schématu uvedeno, že zeslabuje kmitočty nižší než 480 Hz. Důvodem je to, že není žádoucí efektem ovlivňovat takto nízké kmitočty. Vliv C5 byl simulací úspěšně ověřen. Charakteristika byla měřena mezi jezdcem potenciometru FB a výstupem OZ a použité schéma je v příloze A.5. Kmitočtová charakteristika zpětnovazební linky je na obr. 3.8. Nízké kmitočty jsou skutečně potlačeny a pokles o 3 dB nastává okolo 470 Hz. [10]





Obrázek 3.8 Vliv C5 na kmitočtovou charakteristiku modulu přenosu zpětnovazební linky

### 3.4 Kmitočtové filtry

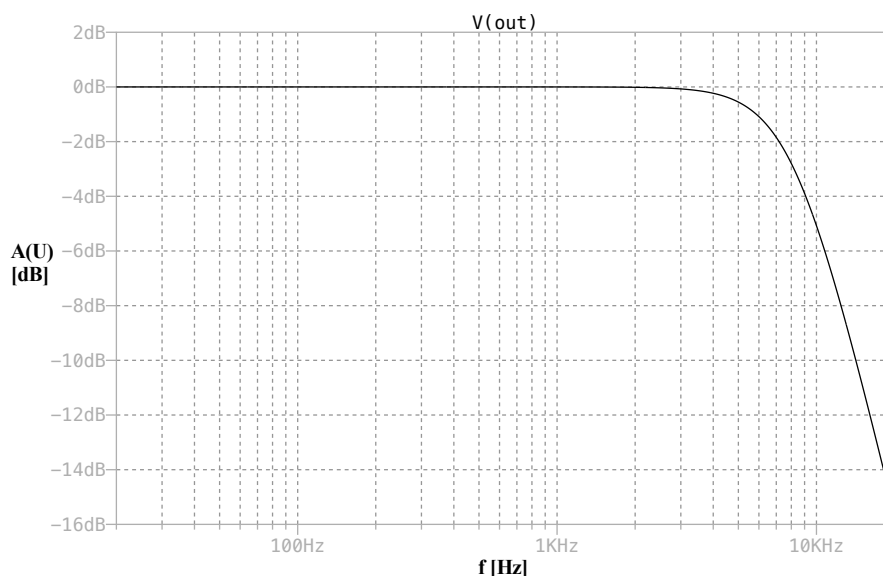
V BBD posuvném registru dochází ke vzorkování signálu a poté k jeho rekonstrukci. S tím je spojeno pár návrhových zásad. Obecně je dobré před vzorkovač vložit anti-aliasingový filtr, aby byla dodržena vzorkovací poučka a nedošlo k překrytí spekter vzorkovaného signálu. Dále je třeba rekonstruovaný signál zbavit příliš strmých hran, které při rekonstrukci vznikají.

V návrhu flangeru jsou využity dva stejné filtry typu dolní propust s rozvětvenou smyčkou zpětné vazby s aproximací podle Butterwortha. Na obr 3.1 jsou vyznačeny jako „antialiasingový filtr“ a „rekonstrukční filtr“. Rozvětvená smyčka zpětné vazby poskytuje výhodu větší strmosti kmitočtové charakteristiky, než pasivní filtry. Mezní kmitočet byl zvolen okolo 8 kHz, a to nejen kvůli vzorkovací poučce, ale i kvůli úpravě výsledné barvy zvuku. Pro mezní kmitočet filtru s rozvětvenou smyčkou zpětné vazby platí vztah

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_9 R_{10} C_6 C_7}}, \quad (3.1)$$

a tak byly zvoleny hodnoty součástek  $R_{10} = R_{28} = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_9 = 24 \text{ k}\Omega$ ,  $C_7 = 3,3 \text{ nF}$  a  $C_6 = 470 \text{ pF}$ . Po dosazení lze ověřit, že mezní kmitočet  $f_m = 8,25 \text{ kHz}$ . Činitel jakosti takového filtru je potom 0,708. [11]

Pro ověření byla provedena simulace použitých filtrů. Výsledná kmitočtová charakteristika přenosu je na obr. 3.9 a schéma použité pro simulaci je v příloze A.6.



Obrázek 3.9 Kmitočtová charakteristika modulu přenosu použitých kmitočtových filtrů typu DP

### 3.5 Výstupní sčítací zesilovač a výstupní obvody

Výstupní sčítací zesilovač je na obr. 3.1 také vyznačen a jak lze vidět, je velmi podobný tomu vstupnímu. Rozdíl je v tom, že sčítá přímou a zpožďovací linku. Také chybí antiparalelně zapojené diody ve smyčce zpětné vazby. Výstupní zesilovač netřeba simulovat, neboť C10 s R15 způsobí stejné potlačení vyšších kmitočtů, jako C4 a R6 u vstupního zesilovače.

Za výstupní sčítací zesilovač je zařazen už jen jednoduchý výstupní obvod. Ten obsahuje kondenzátor C11 na oddělení stejnosměrné složky, rezistor R26, který C11 vybíjí, a R27, který slouží k oddělení výstupu operačního zesilovače od kapacity výstupního kabelu. Tím je výstup OZ chráněn proti VF (vysokofrekvenční) nestabilitě. Tento výstupní obvod také není třeba simulovat, protože nemá na zpracování zvuku vliv. [9]

### 3.6 Celkové řešení efektu

V této kapitole byl navržený efekt flanger simulován jako celek. Nejprve jeho kmitočtová charakteristika modulu přenosu, impulzní odezva a nakonec byl obvodem zpracován zvukový vzorek. Při všech simulacích byl trimr RES\_trim i potenciometr FB nastaven na polovinu rozsahu.

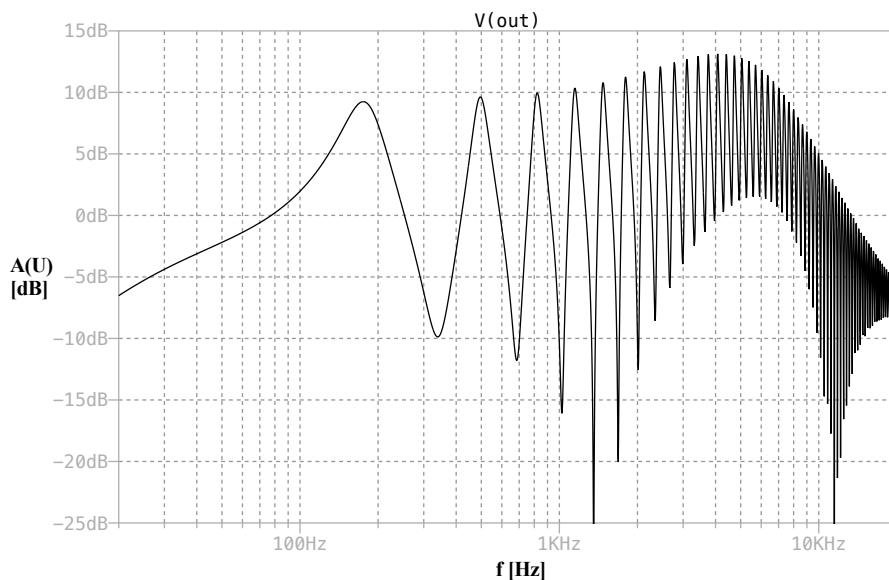
#### 3.6.1 Kmitočtová charakteristika

Jedná se o stejnou analýzu, jako při simulování jednotlivých částí, a to AC analýza s 1000

kroky na dekádu v pásmu 20–20000 Hz. Na obr. 3.10 je výsledná kmitočtová charakteristika modulu přenosu celého efektu. Lze vidět, že charakteristika má přibližně tvar hřebenového filtru, což by měl efekt se zpožďovací linkou mít.

Doba okamžitého zpoždění je nastavena na 3 ms. Podle rovnic pro lokální maxima a minima by první minimum mělo ležet v okolí 170 Hz. V simulované charakteristice tam ale leží maximum. To je způsobeno tím, že signál je sčítán ze dvou větví a na každé větvi dojde k jinému počtu inverzí operačními zesilovači. Zatímco efektovaná větev obsahuje čtyři prvky invertující signál, přímá větev obsahuje pouze jeden invertující prvek. Signály z obou větví jsou vůči sobě posunuty o  $180^\circ$ , a tak na kmitočtu, kde by bylo minimum, je nyní maximum, a naopak. Kmitočty lokálních extrémů v simulované charakteristice zhruba odpovídají výpočtům.

Lokální maxima nejsou na stejných hodnotách zesílení, což je způsobeno dříve zmíněnými prvky, které mají vliv na zesílení nebo zeslabení vyšších, resp. nižších kmitočtů.



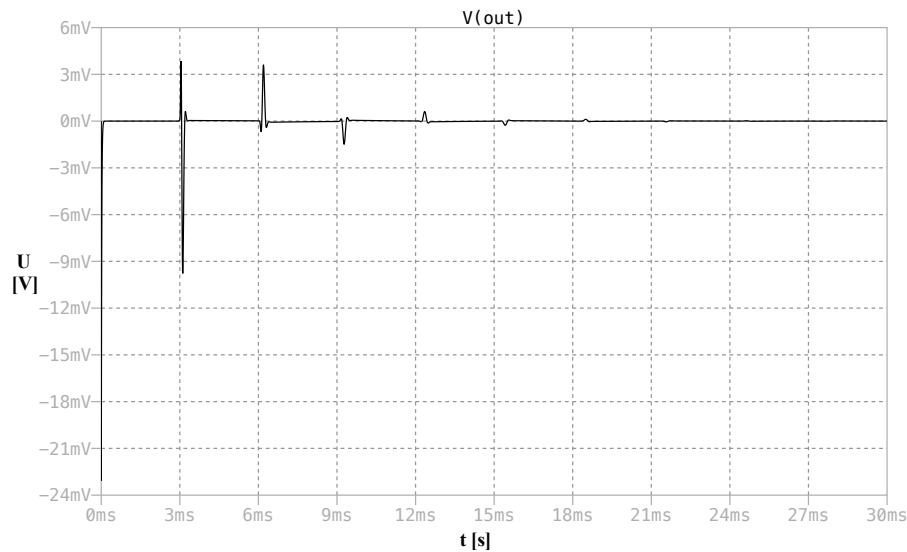
Obrázek 3.10 Simulovaná kmitočtová charakteristika modulu přenosu celého efektu flanger

### 3.6.2 Odezva na impuls

Dále byla provedena simulace odezvy obvodu na impuls. Testovací impuls byl přiveden na celkový vstup obvodu, sledován byl celkový výstup. Amplituda byla zvolena 1 V a čas začátku 0 ms. Sledován byl časový průběh (příkaz „tran“).

Na obr. 3.11, který tuto odezvu na impuls znázorňuje, je vidět, že vstupní impuls se v čase 0 ms invertovaně přenesl na výstup. Impuls se periodicky opakuje po nastavené době zpoždění (3 ms). Každý další impuls má kvůli vlivu invertujícího zapojení vstupního sčítacího zesilovače opačnou polaritu než impuls předchozí a každý další

impulz má nižší maximální výchylku než impulz předchozí. Klesající výchylky jsou důležité pro stabilitu obvodu, aby nedošlo k rozkmitání.



Obrázek 3.11 Simulovaná odezva na impulz celého efektu flanger

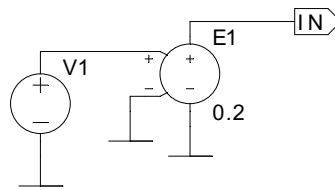
### 3.6.3 Zpracování zvuku

Program LTspice umožňuje mimo jiné také zpracování zvukového souboru navrženým obvodem a uložení průběhu výstupního signálu do nového zvukového souboru. Aby byl určitý soubor zpracován, je třeba nastavit jako parametr hodnoty zdroje napětí příkaz `wavfile="[soubor]" [chan=0]`. Tím bude zdroj generovat průběh napětí odpovídající zvukové vlně uložené ve WAV souboru.

K uložení signálu do nového WAV souboru se používá příkaz „`wave`“, jehož syntaxe je popsána v tabulce 3.1. Jako typ analýzy je třeba zvolit časový průběh, tedy příkaz „`tran`“, a jeho délku shodnou s délkou zpracovávaného zvukového vzorku.

Zpracování zvuku v programu LTspice trvá poměrně dlouhou dobu, kdy samozřejmě záleží na hardwaru. Většinou ale celá simulace trvá déle, než je celková délka zvukového souboru, a proto je vhodné volit kratší vzorky. Tento typ simulace nelze použít pro zpracování zvuku v reálném čase.

Na obr. 3.12 je vidět konkrétní zapojení na vstupu použité pro zpracování zvuku navrženým efektem flanger. Za zdroj vstupního napětí, v tomto případě zvuku, byl zařazen zdroj napětí řízený napětím. Ten pouze pro účely simulace zeslabuje vstupní signál nastaveným koeficientem, aby nedošlo k přebuzení obvodu a zkreslení.



```

wavefile= "/ Users/ tomasvalek/ Desktop/ bakalarka/ LTspice/ guitar_in.wav" chan=0
.tran 5.3
.wave / Users/ tomasvalek/ Desktop/ bakalarka/ LTspice/ guitar_out_20k.wav 16 44.1K V(OUT)

```

Obrázek 3.12 Řešení zdroje zvuku včetně zeslabovacího článku a simulačních příkazů

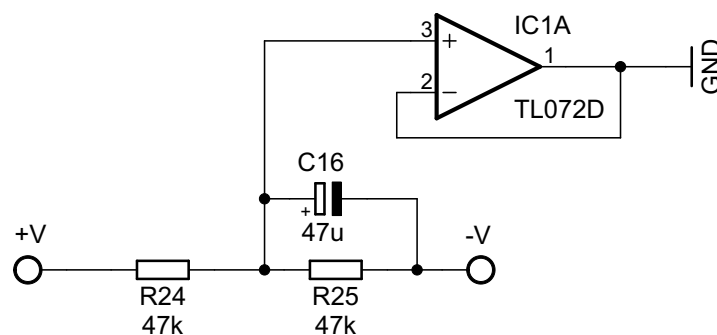
Výsledný zvuk zní téměř tak, jak by měl flanger znít. Přirovnat ho lze například k letu stíhačky nebo ke zvuku ve velké kovové trubce vzduchotechniky. Chybí pouze LFO modulace okamžité doby zpoždění, a tudíž nedochází k periodickému posouvání hřebenevého filtru v kmitočtové charakteristice.

## 4. KONSTRUKCE LABORATORNÍHO PŘÍPRAVKU

V této kapitole bude popsán návrh desky plošných spojů (DPS) v programu Autodesk Fusion. Oproti simulacím bylo navíc potřeba vyřešit napájecí obvody a zapojení zpoždovací linky. Ta se skládá z BBD posuvného registru a jeho řídicího obvodu. Před samotným návrhem DPS byl celý obvod sestaven na nepájivém poli, aby byla ověřena jeho funkčnost. Při tomto testování byly dodatečně upraveny některé části napájecích obvodů oproti vzorovému schématu. Kompletní schéma, na základě kterého je DPS navržena, je v příloze B.

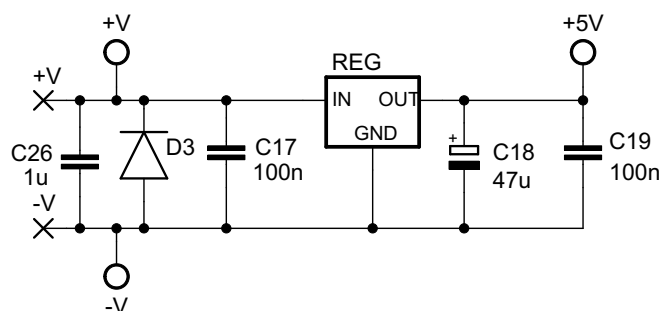
### 4.1 Návrh napájecích obvodů

Je třeba brát v potaz, že každá dílčí část efektu vyžaduje jiné napájení. Současně je třeba dbát na jednoduchost při zapojování během laboratorního měření. Operační zesilovače vyžadují symetrické napájení v rozmezí  $\pm 3,5\text{--}15\text{ V}$  a BBD a jeho řídicí obvod vyžadují nesymetrické napájení  $+5\text{ V}$ . Jako hlavní napájení bylo zvoleno nesymetrické napětí z laboratorního zdroje  $U_N = +10\text{ V}$ . Z něj bylo vytvořeno symetrické napětí  $\pm 5\text{ V}$  pomocí odvozené země z napěťového děliče (řešení je na obr. 4.1) a nesymetrické napětí  $+5\text{ V}$  pomocí lineárního stabilizátoru napětí.



Obrázek 4.1 Odvození pomocné země napěťovým děličem pro symetrické napájení OZ

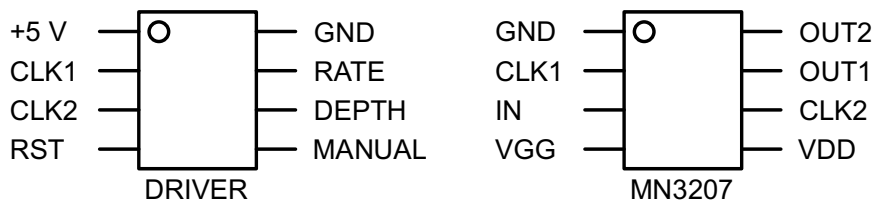
Lineární stabilizátor napětí 78L05 umožňuje ze vstupního napětí o rozsahu  $+7\text{--}20\text{ V}$  vytvořit  $+5\text{ V}$  na svém výstupu pro napájení BBD a řídicího obvodu. Vstup a výstup stabilizátoru je v návrhu blokován  $100\text{n}$  kondenzátory a vstup je také chráněn výkonovou diodou proti přepólování. Celá tato část napájecího obvodu je na obr. 4.2. [12] [13]



Obrázek 4.2 Použití stabilizátoru 78L05 („REG“) pro napájení BBD a řídicího obvodu

## 4.2 Zapojení BBD a řídicího obvodu

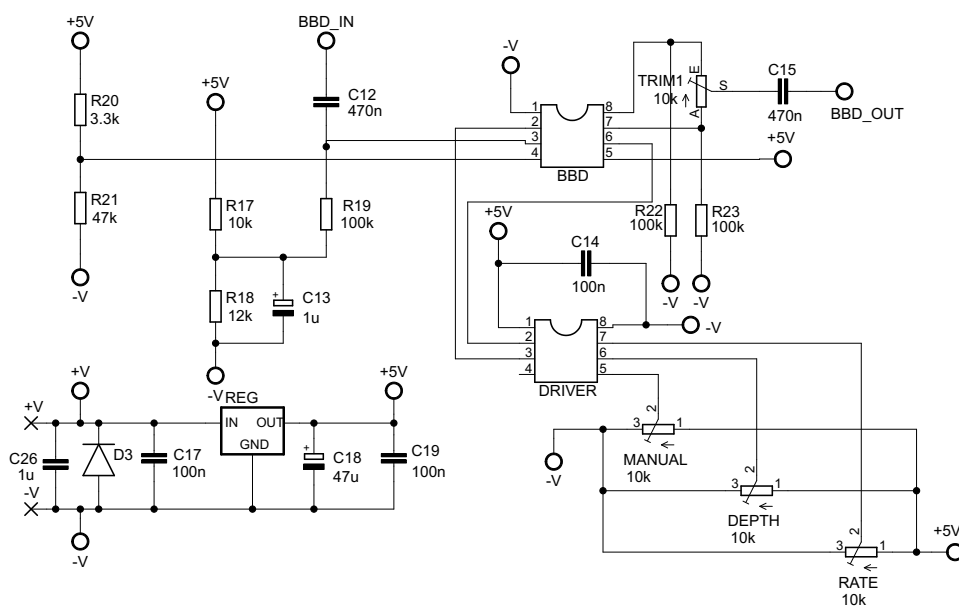
Tato kapitola pojednává o tom, jakým způsobem se zapojují BBD a jeho řídicí obvod. Samozřejmě je napájení a signálové vstupy a výstupy. Obě součástky ale mají i speciální vývody, jejichž funkci je vhodné popsat. U BBD se jedná o dvojitý výstup, vstupy pro taktovací signály a druhý napájecí vstup. U řídicího obvodu se jedná o řídicí vstupy a resetovací vývod. Na obr. 4.3 jsou schémata rozložení vývodů součástek MN3207 a řídicího obvodu. [6] [14]



Obrázek 4.3 Schémata rozložení vývodů pro řídicí obvod („DRIVER“) a MN3207

Vývody  $V_{DD}$  a  $V_{GG}$  slouží k napájení, přičemž na  $V_{GG}$  se přivádí napětí o hodnotě  $14/15 V_{DD}$  ( $V_{DD} = +5 \text{ V}$ ). Vývody CLK1 a CLK2 slouží jako vstupy pro komplementární taktovací signály z řídicího obvodu. OUT1 a OUT2 jsou výstupy, které se dají buď zkratovat, nebo se dá využít zapojení podle obr. 4.4. Ten znázorňuje reálné zapojení obou integrovaných obvodů v navrženém flangeru. Trimrem „TRIM1“ se nastavuje optimální vyvážení, kdy do výstupního signálu proniká minimum špiček z taktovacích signálů. [6]

U řídicího obvodu jsou kromě dvou výstupů pro komplementární taktovací signály přítomny tři řídicí vstupy. Ty rozsahem napětí 0–5 V řídí stejnosměrnou složku, kmitočet a amplitudu LFO signálu. To pak ovlivňuje střední dobu zpoždění, kmitočet a hloubku modulace. Dále je přítomen ještě vývod, jehož krátké spojení se zemí resetuje fázi LFO signálu. Ten ve finálním řešení zůstává nezapojen. [14]



Obrázek 4.4 Zapojení BBD a řídicího obvodu v navrženém flangeru

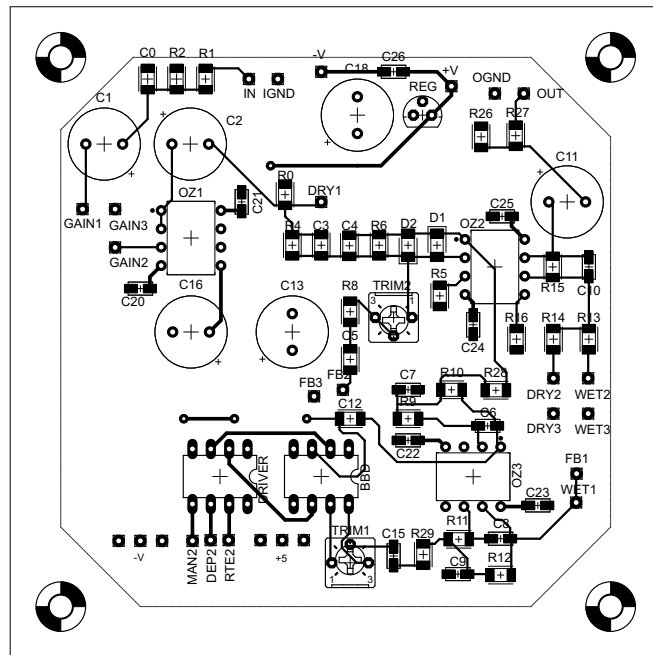
### 4.3 Návrh DPS

Návrh DPS je nedílnou součástí konstrukce jakéhokoli hardwarového zařízení. Návrh je proveden v programu Autocad Fusion 360. K návrhu je přistupováno v souladu se současnými požadavky a doporučeními, jejichž účelem je minimalizovat parazitní jevy. Vzhledem k tomu, že se tato práce zabývá obvody pro zpracování zvukového signálu, je kladen důraz především na přeslechly a ochranu před rozkmitáním operačních zesilovačů.

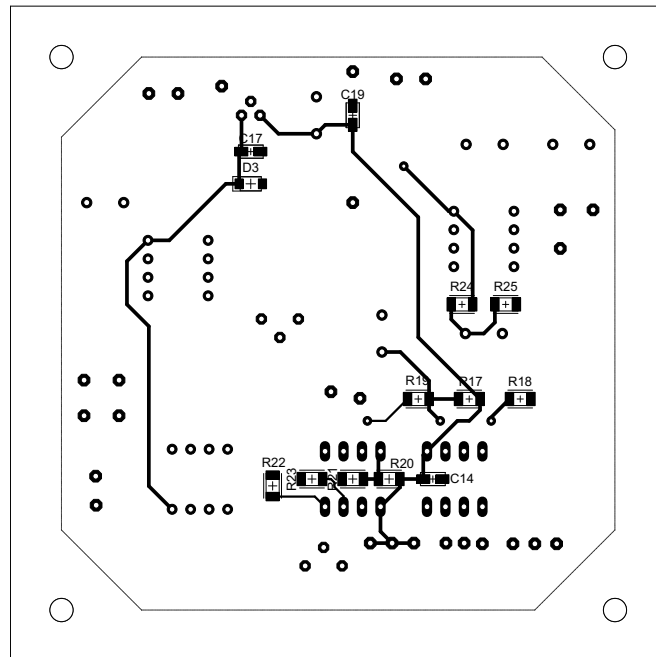
Přeslechly lze eliminovat tak, že vodiče vedené podélně vedle sebe budou co nejkratší. Náchylnost k rozkmitání OZ se dá snížit zkrácením přívodů invertujícího a neinvertujícího vstupu. Další užitečné doporučení je vést zemnicí vodič tam, kde nevede signálový vodič. Nejen, že to usnadňuje rozvod země, ale taková zemnicí vrstva slouží i ke stínění proti nežádoucímu elektromagnetickému rušení. Díky své ploše má zemnicí vodič mnohem menší odpor. [15]

Obr. 4.5 a obr. 4.6 znázorňují navrženou DPS z pohledu shora a zdola. Většina použitých součástek je v provedení SMD v pouzdře 1206. Vývodové jsou všechny OZ, BBD, řídicí obvod, elektrolytické kondenzátory, stabilizátor napětí 78L05, trimry a potenciometry. Potenciometry nejsou přímo připájeny k desce, ale pomocí vodičů připojeny externě z důvodu snazší konstrukce a vkládání přípravku do krabíčky. Všechny integrované obvody v pouzdře DIP8 také nejsou připájeny přímo, ale jsou uloženy v příslušných patičích. Dále lze vidět, že šířka vodivých drah je různá pro napájecí a signálové spoje. Tento postup taktéž vychází z návrhových doporučení. [15]

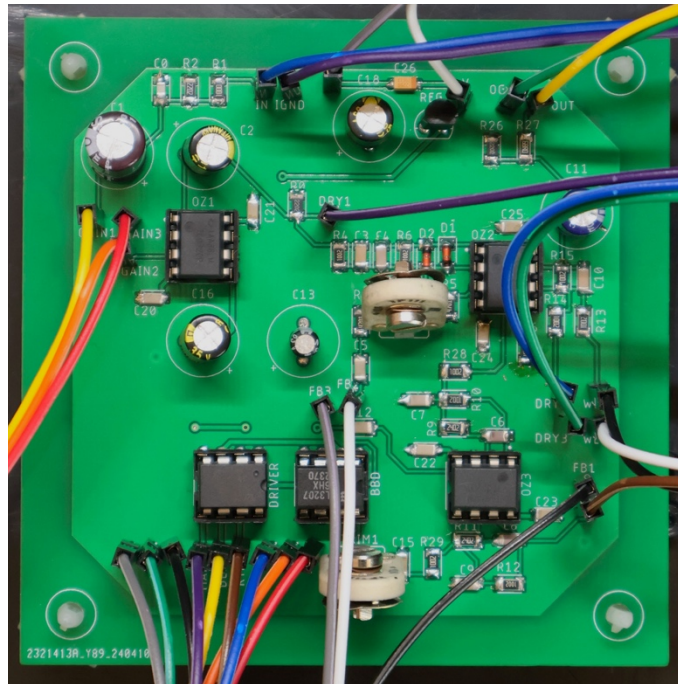




Obrázek 4.5 Výsledný návrh DPS – pohled shora



Obrázek 4.6 Výsledný návrh DPS – pohled zdola



Obrázek 4.7 Osazená DPS včetně vodičů na připojení potenciometrů a konektorů

## 4.4 Instalace zařízení do krabičky

Na závěr byla deska vložena do krabičky, propojena s ovládacími potenciometry a připojena ke vstupním, výstupním a napájecím svorkám. Přidány byly navíc výstupy pro měření signálu na výstupu BBD (BBD OUT) a na výstupu řídicího obvodu (CP OUT). Bude tak možné zobrazit na osciloskopu signál, který generuje BBD, a taktovací impulzy, kterými je BBD obvod řízen. Všechny signálové vstupy a výstupy jsou řešeny BNC konektory z důvodu snazší manipulace při laboratorním měření. Napájení se přivádí přes banánkové konektory.

Na obr. 4.8 je výsledný zkonstruovaný přípravek. Popisky předního panelu jsou v angličtině, aby přípravek reflektoval zpracování komerčně dostupných řešení efektu flanger. Tab. 4.1 popisuje funkci jednotlivých ovládacích prvků. Zpětnovazební linka může být na různých provedeních flangeru označována jinak, například „Feedback“ nebo „Regen“. Znamená to ale totéž. Všechny prvky ovládající zesílení nebo zisk jsou zapojeny jako pasivní napěťový dělič, a proto maximální hodnota zesílení je vždy 1.



Obrázek 4.8 Hotový laboratorní přípravek

Tabulka 4.1 Ovládací prvky přípravku a jejich funkce

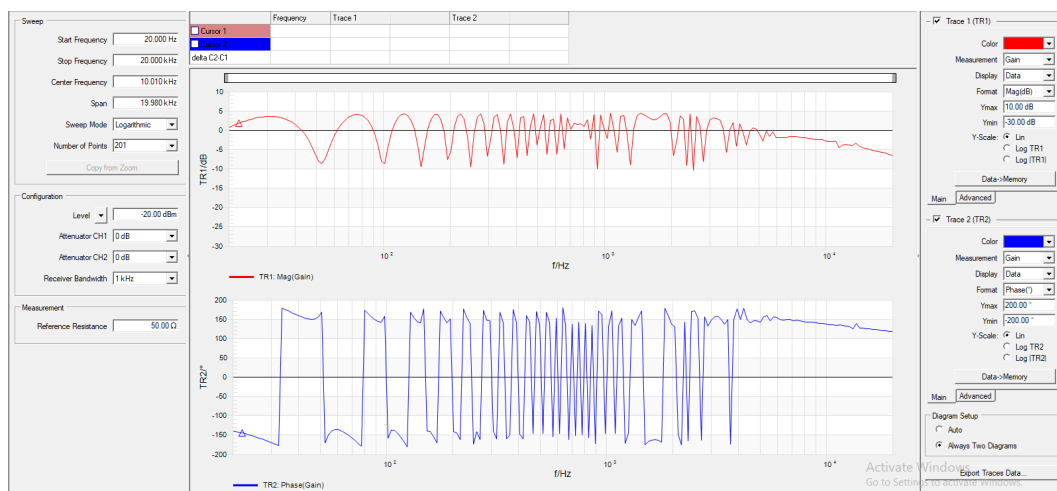
Název ovládacího prvku	Funkce
INPUT GAIN	Zisk signálu na vstupu
DRY	Zesílení přímé signálové větve
WET	Zesílení efektované signálové větve
MANUAL	Velikost stejnosměrné složky LFO signálu (střední doba zpoždění signálu)
DEPTH	Amplituda LFO (hloubka modulace)
RATE	Kmitočet LFO
RESONANCE	Zesílení zpětnovazební signálové větve

## 4.5 Měření a porovnání se simulací

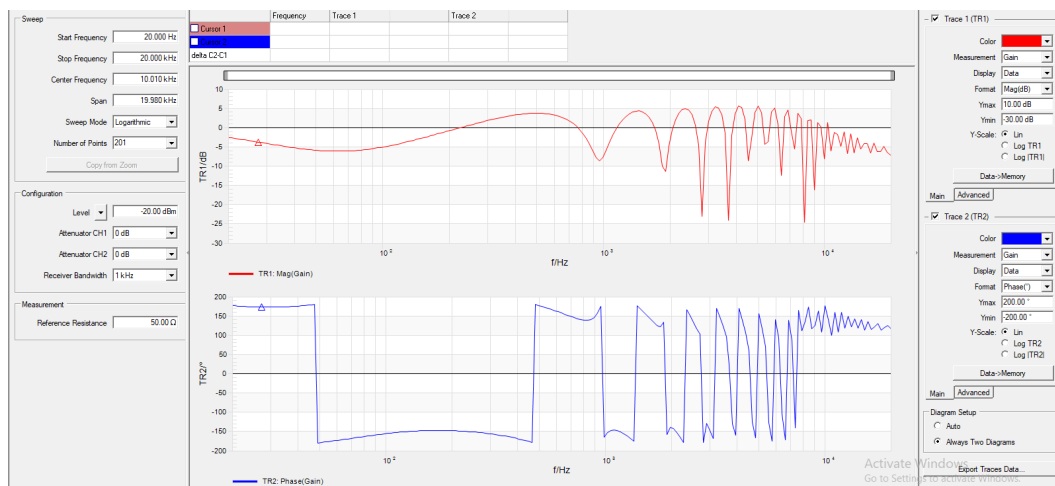
V této kapitole bude popsán průběh měření laboratorního přípravku a porovnání výsledků s počítačovými simulacemi. Změřena bude modulová kmitočtová charakteristika a navíc oproti simulacím bude provedena analýza limitace. Obvod již nebude měřen po částech, ale pouze jako celek.

### 4.5.1 Modulová kmitočtová charakteristika

K měření kmitočtové charakteristiky byl využit analyzátor Bode 100, který je k počítači připojen přes USB a ovládá se přes software Bode Analyzer Suite. Před samotným měřením byla provedena kalibrace. Poté byly nastaveny parametry měření tak, aby bylo pokryto celé slyšitelné pásmo a nedošlo k přebuzení obvodu. Přesné hodnoty parametrů jsou společně se změřenými charakteristikami na obr. 4.9 a obr. 4.10. Při vypnutí časové modulaci doby zpoždění je charakteristika ovlivněna parametrem MANUAL, který řídí střední dobu zpoždění. Proto byly změřeny charakteristiky dvě, každá pro jednu krajní polohu prvku MANUAL.



Obrázek 4.9 Modulová kmitočtová charakteristika (MANUAL na minimu)

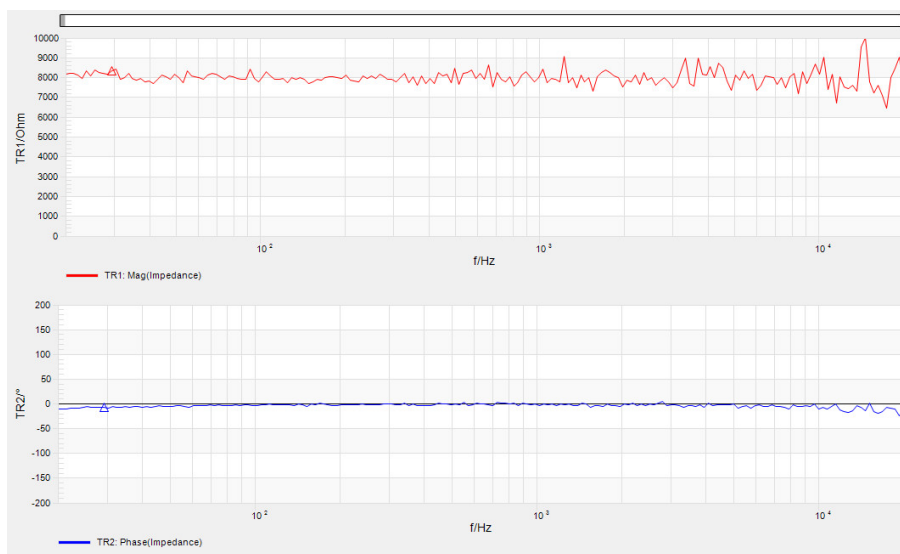


Obrázek 4.10 Modulová kmitočtová charakteristika (MANUAL na maximum)

Z modulových kmitočtových charakteristik lze určit maximální a minimální dobu zpoždění. Z fázových charakteristik lze vidět, že flanger signál invertuje. To znamená, že pro výpočet minim v charakteristice platí vzorec  $f_{\min} = \frac{k}{\tau}$  a pro výpočet doby zpoždění tedy platí  $\tau = \frac{k}{f_{\min}}$ . Z charakteristik byla odečtena první tři výrazná minima pro každé nastavení. Po dosazení do vzorce a zprůměrování vyšlo, že čas minimálního zpoždění je 1,06 ms a čas maximálního zpoždění je 19,6 ms.

#### 4.5.2 Impedanční charakteristika

Dále byla změřena charakteristika modulu a fáze vstupní impedance na celém slyšitelném pásmu. Toto měření je důležité proto, aby se zjistilo, jak moc bude obvod ovlivňovat přechodí stupeň řetězce zpracování zvuku. Výsledné charakteristiky jsou na obr. 4.11. Na celém kmitočtovém rozsahu 20–20000 Hz se impedance pohybuje okolo 8 kΩ. Tato hodnota odpovídá paralelní kombinaci odporů o hodnotách 22k a 10k (potenciometr Gain) na vstupu zařízení.



Obrázek 4.11 Charakteristika modulu a fáze impedance

### 4.5.3 Analýza limitace signálu

Pro účely provozu přípravku je potřeba zjistit, jaké maximální vstupní napětí je obvod schopen zpracovat. Měření probíhalo následujícím způsobem. Na vstup přípravku byl připojen generátor a výstup byl přiveden na jeden z kanálů osciloskopu. Na generátoru byl nastaven sinusový průběh, kmitočet stejný jako celkové maximum modulové kmitočtové charakteristiky (5360 Hz) a napětí bylo postupně zvyšováno ze 100 mVpp (mV špička-špička). Na úrovni vstupního napětí 630 mVpp se skokově zvýšil odběr proudu ze zdroje z 18 na 26 mA a signál na výstupu byl zkreslen. Snížením vstupního napětí se však odběr proudu nesnížil a signál zůstal zkreslen. Takové chování nejspíš způsobuje přebuzení BBD nebo rozkmitání některého z OZ.

## 5. NÁVOD K MĚŘENÍ LABORATORNÍ ÚLOHY

Tato kapitola se zabývá vytvořením návodu k laboratorní úloze. Úlohy jsou popsány krok za krokem tak, aby je zvládli změřit studenti na úrovni bakalářských programů. Některé body jsou zaměřeny na měření základních parametrů zvukového efektu a některé slouží pouze pro to, aby studenti porozuměli určitému principu. K této úloze byl vypracován vzorový protokol. Návod v plném znění i vzorové vypracování je v příloze C. [15] [16]

Při tvoření návodu byl kladen důraz na srozumitelnost, pochopitelnost a konkrétní formulaci toho, čeho mají studenti dosáhnout. Zapojení přípravků společně s generátorem a měřicími přístroji bylo pro zjednodušení znázorněno schémata.

Pro měření této úlohy je potřeba vybavit pracoviště analyzátozem Bode 100, počítačem s programem Bode Analyzer Suite, generátorem průběhů, osciloskopem a stabilizovaným zdrojem stejnosměrného napětí. Volitelně je pak možné doplnit vybavení o sluchátkový zesilovač nebo zvukovou kartu a sluchátka.

## 6. ZÁVĚR

Na začátku byly popsány vlastnosti a princip efektů se zpoždovací linkou. Dále tato práce obsahuje podrobný popis efektu flanger včetně možností realizace jednotlivých částí.

Následně byl celý flanger navržen na obvodové úrovni včetně parametrů součástek. Obvod je obohacen o prvky, které mají vliv na kmitočtovou charakteristiku (například zesilují vyšší kmitočty). Vliv těchto prvků byl simulován a popsán. Celý efekt byl také simulován. Byla zjištěna jeho kmitočtová charakteristika modulu přenosu a odezva na impuls. Nakonec byl obvod využit pro zpracování reálného zvukového vzorku. Všechny simulace dopadly dle očekávání. Vliv ekvalizačních prvků byl úspěšně ověřen, modulová kmitočtová charakteristika celého efektu má tvar hřebenového filtru a po zpracování zvukového vzorku navrženým obvodem zněl výsledek podobně jako běžný komerční flanger.

Na základě teoretického návrhu a simulací bylo navrženo kompletní schéma a deska plošných spojů v programu Autodesk Fusion. Z ní byl zkonstruován přípravek, který bude možno používat v laboratorních cvičeních. Přípravek byl změřen a výsledná modulová kmitočtová charakteristika se podobá simulacím. Modul vstupní impedance je na celém slyšitelném pásmu okolo  $8\text{ k}\Omega$ . Také bylo zjištěno limitní napětí na vstupu, které činí  $620\text{ mVpp}$ .

Nakonec byl vytvořen návod pro laboratorní úlohu a vzorový protokol z měření vlastností přípravku. Laboratorní úloha obsahuje úkoly zaměřené jak na měření parametrů efektu, jako je například kmitočtová charakteristika, tak i na pozorování chování částí efektu a pochopení jeho principu.

Do budoucna by se dal efekt doplnit například o ekvalizér efektované větve, zkreslovač pro úpravu barvy nebo o další efektované větve pro vytvoření vícefázového flangeru.



## LITERATURA

- [1] SCHIMMEL, Jiří. *Zvukové efekty I*. Presentace k přednáškám BPC-STE. Brno: FEKT VUT v Brně. [cit. 2023-10-26].
- [4] KLEIN, Barry. *Electronic music circuits*. Howard W. Sams & Co., 1982. ISBN 0-672-21833-X.
- [5] SANGSTER, F. Integrated MOS and bipolar analog delay lines using bucket-brigade capacitor storage. Online. S. 185. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ISSCC.1970.1154839>. [cit. 2023-11-06].
- [6] PANASONIC. *MN3207: 1024-stage low voltage operation low noise BBD (datasheet)*. Online.
- [7] PANASONIC. *MN3102: CMOS clock generator/driver for low voltage operation BBD (datasheet)*. Online.
- [8] KUBÁNEK, David. *Echa, efektové zesilovače*. Online, prezentace k přednáškám BPC-NKZT. Brno: FEKT VUT v Brně. [cit. 2023-11-11].
- [9] SELF, Douglas. *Small signal audio design*. Second edition. New York: Taylor & Francis, 2015. ISBN 0367468956.
- [10] WILTSHIRE, Tom. *Flangelicious – A super-dooper flanger*. Online. Electric druid. 2016. Dostupné z: <https://electricdruid.net/flangelicious-a-super-dooper-flanger/>. [cit. 2023-11-11].
- [11] *Multiple Feedback Low-pass Filter Design Tool*. Online. OKAWA Electric design. Dostupné z: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/OPtazyuLowkeisan.htm>. [cit. 2023-11-30].
- [12] VRBA, Kamil a MIŠUREC, Jiří. *Technika analogových obvodů*. Online. VUTIUM, 2020. ISBN 978-80-214-5901-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.13164/book.circuits.analog>. [cit. 2024-04-10].
- [13] SEMTECH ELECTRONICS LTD. *ST 78L05 (datasheet)*. Online.
- [14] WILTSHIRE, Tom. *Electric Druid 4 KNOB FLANGE (datasheet)*. Online.
- [15] SCHIMMEL, Jiří. *Studiová technika: Zvukové efekty se zpožd'ovací linkou*. Návod k laboratorní úloze. FEKT VUT v Brně, 2022.
- [15] VRBA, Kamil a HANÁK, Pavel. *Konstrukce elektronických zařízení*. E-kniha. VUTIUM, 2021. ISBN 978-80-214-5957-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.13164/book.construction.electronic.devices>. [cit. 2024-04-26].
- [16] KUBÁNEK, David. *Návrh a konstrukce zvukové techniky: Efekt Chorus*. Návod k laboratorní úloze. FEKT VUT v Brně, 2023.

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Zkratky:

AD	analogově-digitální
BBD	bucket brigade device
D	elektroda Drain
DP	dolní propust
DPS	deska plošných spojů
FIR	finite impulse response
G	elektroda Gate
IIR	infinite impulse response
LFO	low frequency oscillator
mVpp	milivolt peak-to-peak
OZ	operační zesilovač
S	elektroda Source
VCO	voltage-controlled oscillator
VF	vysokofrekvenční
VST	virtual studio technology

### Symboly:

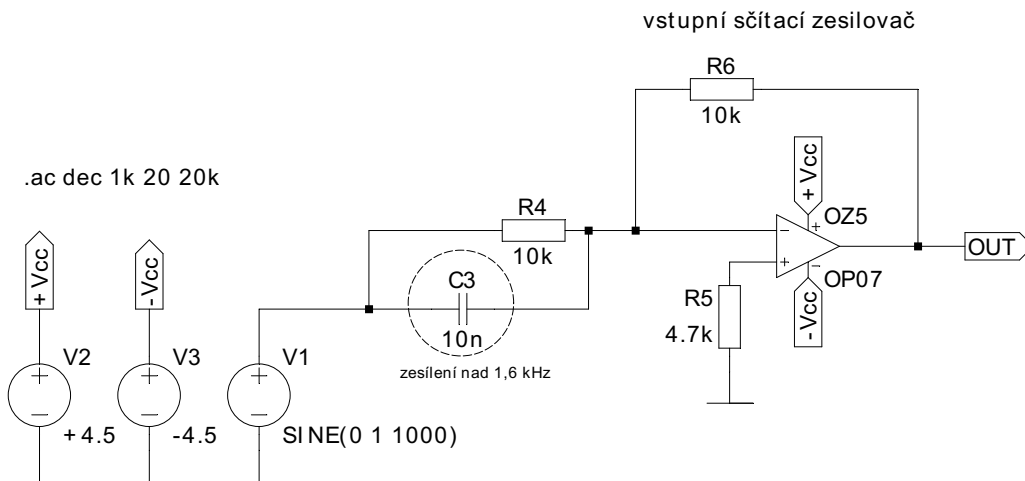
$A$	zesílení	(dB)
$C$	kapacita	(F)
$f$	kmitočet	(Hz)
$I$	proud	(A)
$R$	odpor	( $\Omega$ )
$\tau$	okamžitá doba zpoždění	(s)
$U$	napětí	(V)

# SEZNAM PŘÍLOH

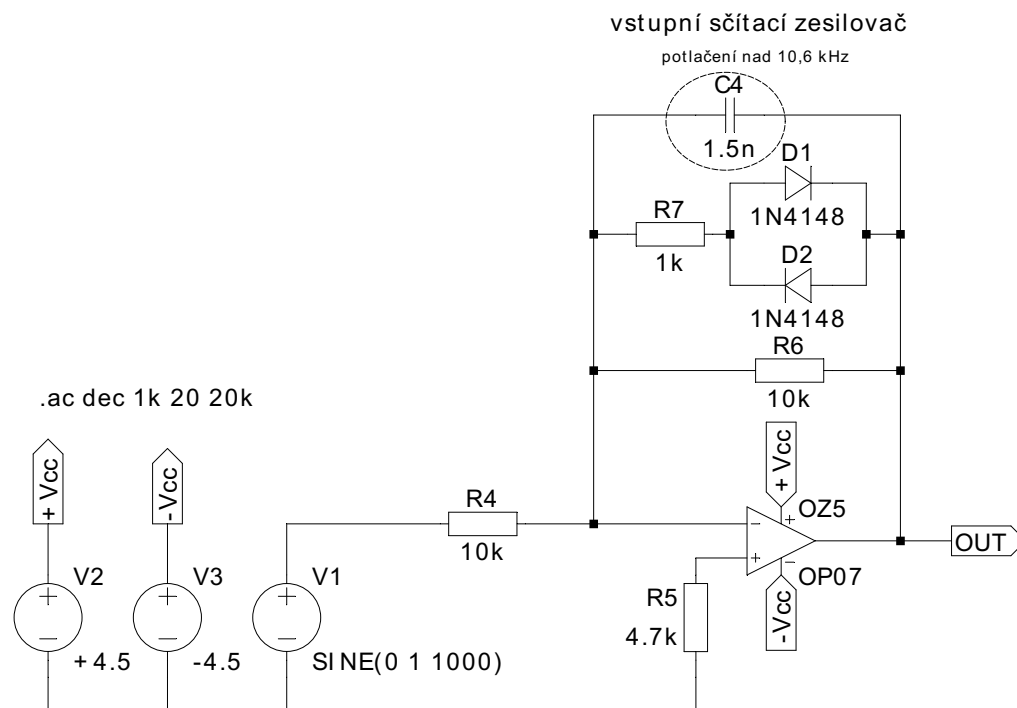
<b>PŘÍLOHA A - SCHÉMATA S NASTAVENÍM SIMULACÍ PRO LTSPICE.....</b>	<b>44</b>
<b>A.1 VLIV C3 NA PŘENOS VSTUPNÍHO ZESILOVAČE.....</b>	<b>44</b>
<b>A.2 VLIV C4 NA PŘENOS VSTUPNÍHO ZESILOVAČE.....</b>	<b>44</b>
<b>A.3 VLIV D1 A D2 NA PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKU VSTUPNÍHO ZESILOVAČE (DIODY ZAPOJENY).....</b>	<b>45</b>
<b>A.4 VLIV D1 A D2 NA PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKU VSTUPNÍHO ZESILOVAČE (DIODY ODPOJENY).....</b>	<b>45</b>
<b>A.5 VLIV C5 NA PŘENOS ZPĚTNOVAZEBNÍ LINKY.....</b>	<b>46</b>
<b>A.6 PŘENOS KMITOČTOVÝCH FILTRŮ.....</b>	<b>46</b>
<b>PŘÍLOHA B - KOMPLETNÍ SCHÉMA PRO NÁVRH DPS.....</b>	<b>47</b>
<b>B.1 VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ OBVODY, FILTRY, ZPĚTNOVAZEBNÍ VĚTEV.....</b>	<b>47</b>
<b>B.2 ZAPOJENÍ BBD OBVODU A JEHO ŘÍDICÍHO OBVODU.....</b>	<b>47</b>
<b>PŘÍLOHA C - LABORATORNÍ ÚLOHA (NÁVOD A VZOROVÝ PROTOKOL).....</b>	<b>48</b>

# Příloha A - Schémata s nastavením simulací pro LTspice

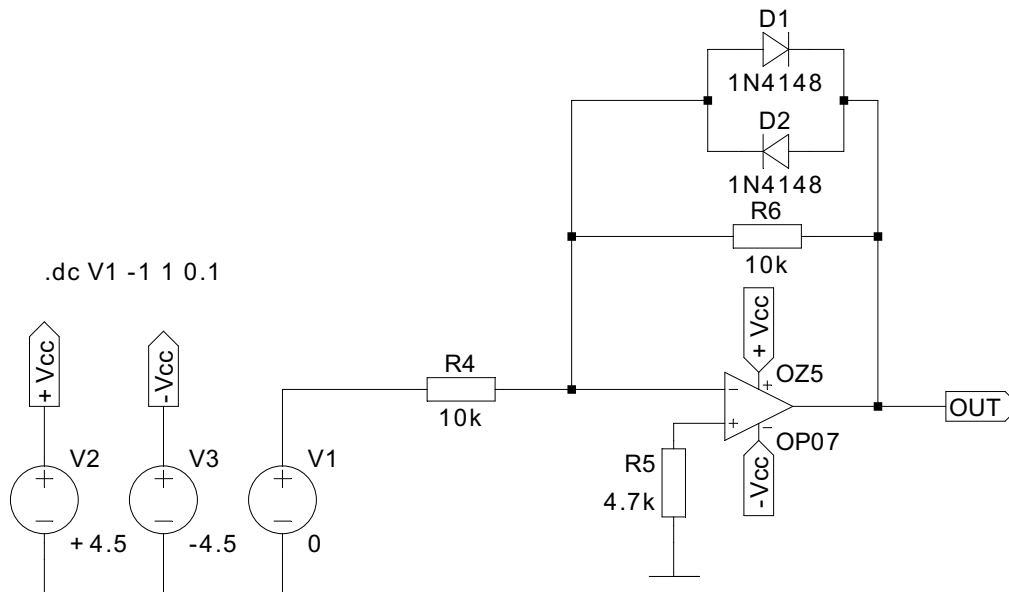
## A.1 Vliv C3 na přenos vstupního zesilovače



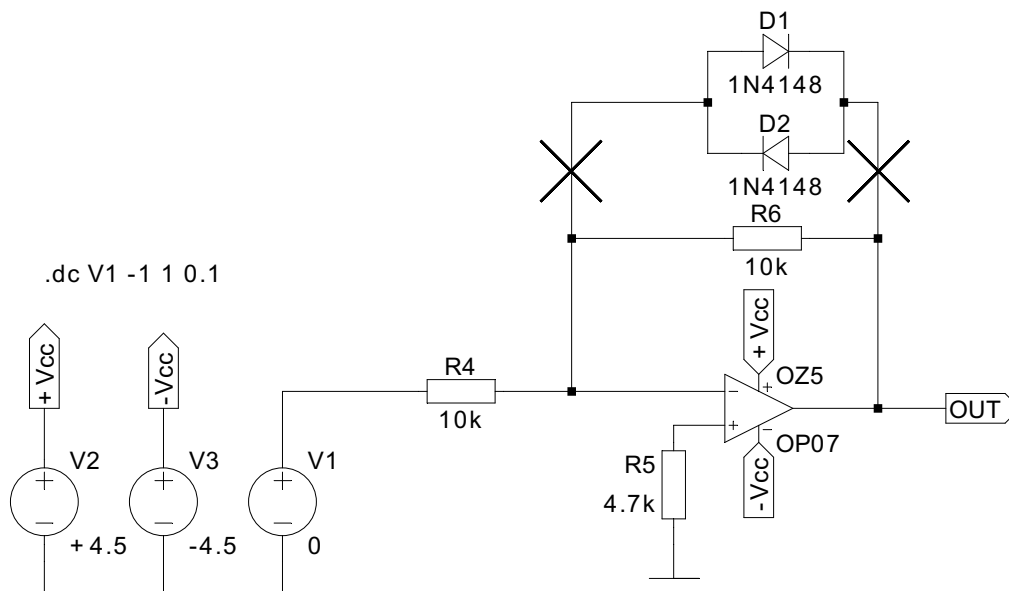
## A.2 Vliv C4 na přenos vstupního zesilovače



### A.3 Vliv D1 a D2 na převodní charakteristiku vstupního zesilovače (diody zapojeny)

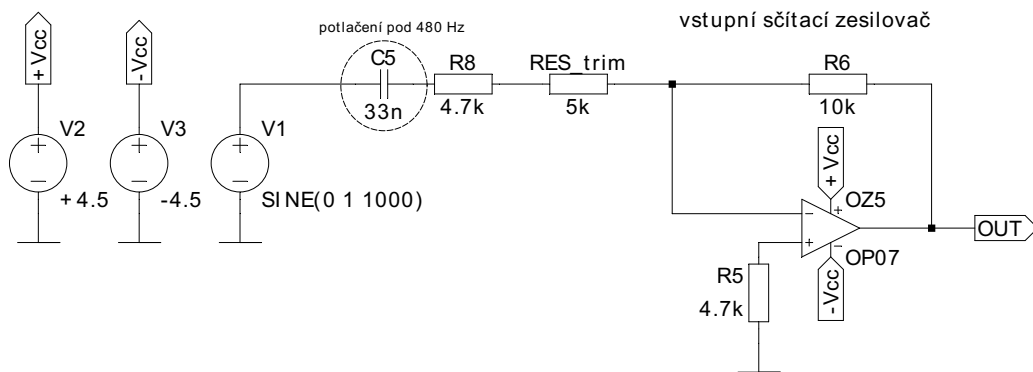


### A.4 Vliv D1 a D2 na převodní charakteristiku vstupního zesilovače (diody odpojeny)



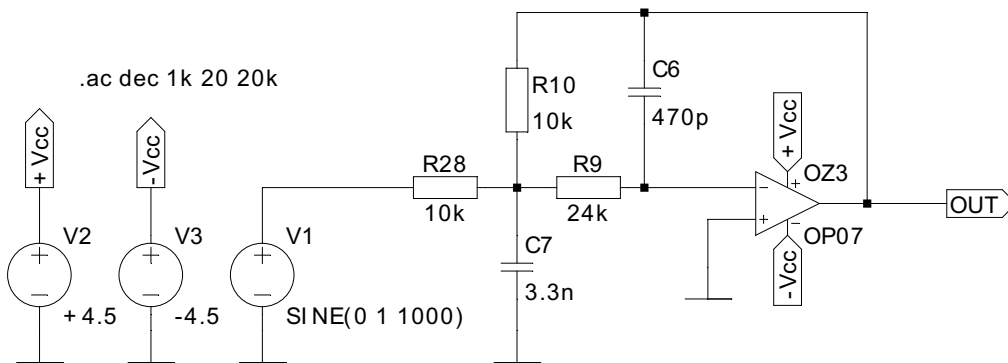
## A.5 Vliv C5 na přenos zpětnovazební linky

.ac dec 1k 20 20k



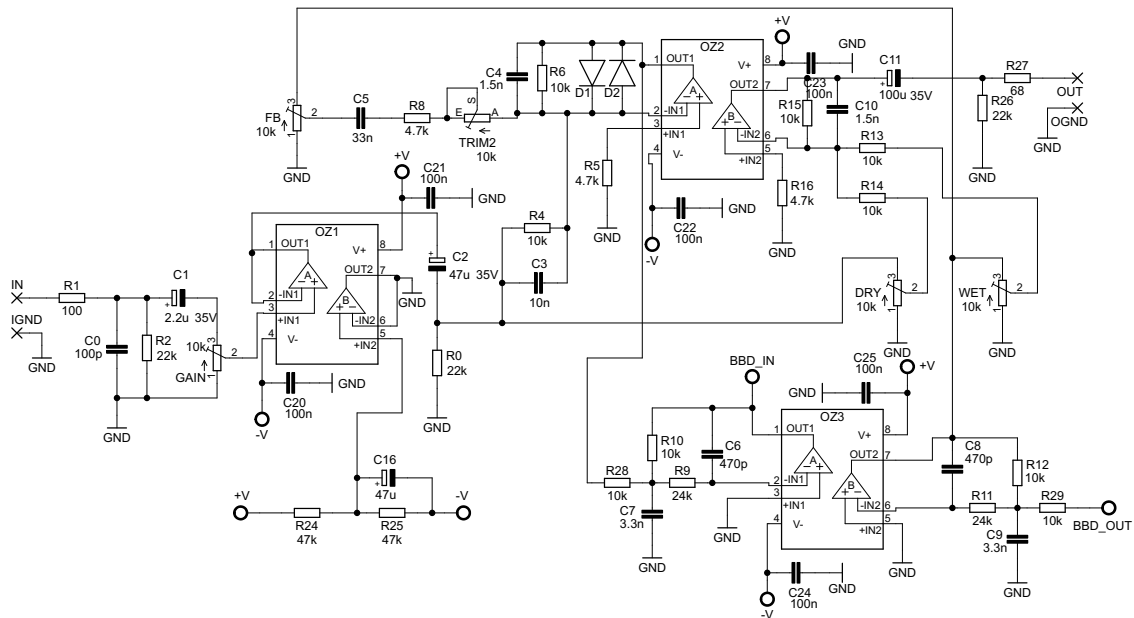
## A.6 Přenos kmitočtových filtrů

.ac dec 1k 20 20k

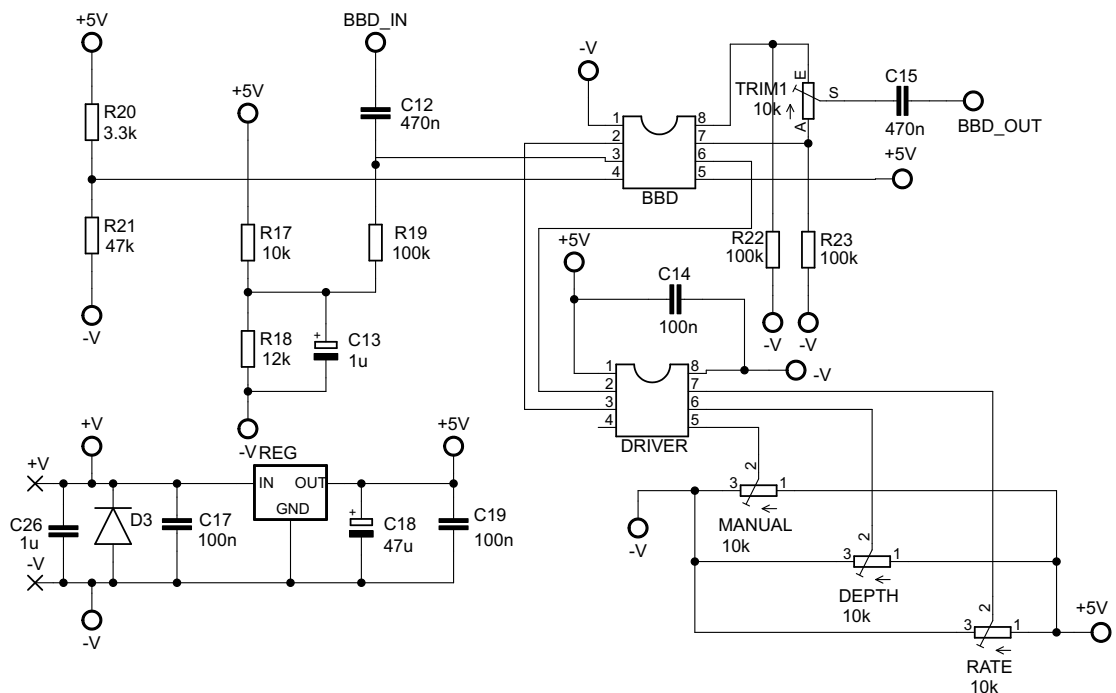


# Příloha B - Kompletní schéma pro návrh DPS

## B.1 Vstupní a výstupní obvody, filtry, zpětnovazební větve



## B.2 Zapojení BBD obvodu a jeho řídicího obvodu



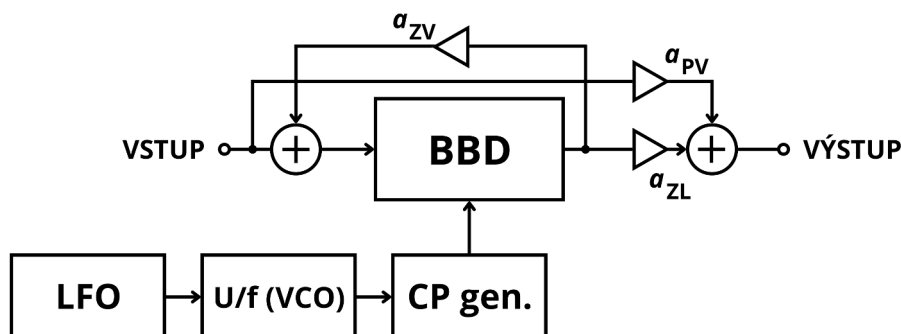
# Příloha C - Laboratorní úloha (návod a vzorový protokol)

## Teoretický úvod

Flanger je obecně zvukový efekt, který při zpracování zvukového signálu využívá zpožďovací linku, přičemž okamžitá doba zpoždění signálu se v čase mění. Do rodiny efektů se zpožďovací linkou s proměnným zpožděním dále patří například chorus nebo vibrato. Z obr. 6.1 jsou patrné signálové cesty. Důležité je, že zesílení všech tří větví je nenulové. Zdrojem vstupního signálu může být například kytara.

Sečtením přímé a zpožděné signálové linky vzniká efekt hřebenového filtru, jehož minima a maxima se periodicky posouvají v kmitočtové charakteristice v důsledku modulace okamžité doby zpoždění. Hodnota okamžitého zpoždění je modulována řídicím signálem, který nejčastěji pochází z generátoru pomaloběžných průběhů (LFO). Tento řídicí signál upravuje přes převodník napětí-frekvence kmitočet komplementárních hodinových pulzů, které řídí předávání náboje v BBD registru. Čím je kmitočet hodinových pulzů vyšší, tím se náboj předává rychleji a doba zpoždění signálu je kratší. Hodinové pulzy mohou mít kmitočet zhruba mezi 20–500 kHz a v určitých částech obvodu pronikají do zpracovávaného signálu.

V této úloze máte za úkol změřit základní vlastnosti flangeru, podívat se, jak efekt pracuje uvnitř a popsat jeho ovládací prvky.

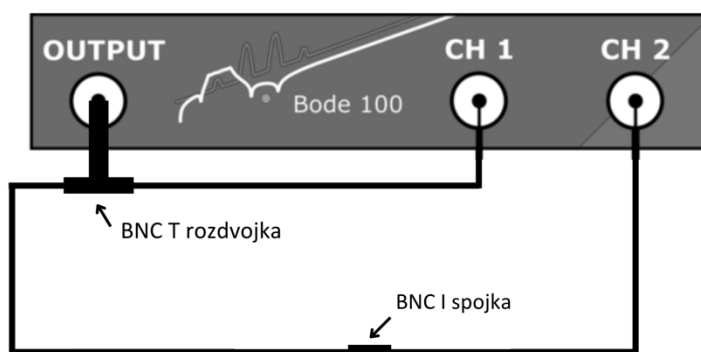


Obrázek 6.1 Blokové schéma flangeru



## Úkoly měření

- 1) Pomocí analyzátoru Bode 100 změřte modulovou a fázovou kmitočtovou charakteristiku flangeru a vypočítejte nejkratší a nejdelší dobu zpoždění. Poté změřte kmitočtovou charakteristiku modulu a fáze impedance.
  - a. Na přípravku nastavte INPUT GAIN, DRY a WET na maximum. Protože se při běžném provozu efektu modulová kmitočtová charakteristika v čase mění, je potřeba zařídit, aby LFO signál nezasahoval do okamžité doby zpoždění. Nastavte proto parametry RATE, DEPTH a RESONANCE na minimum.
  - b. Na počítači spusťte program Bode Analyzer Suite. Klikněte na *Configuration* – *Device configuration* a ujistěte se, že je aktivní *External reference*. Propojte analyzátor podle následujícího schématu (obr. 6.2) a kliknutím na *Calibration* – *User calibration* – *Thru* provedete kalibraci.



Obrázek 6.2 Propojení přípravku s analyzátozem Bode 100

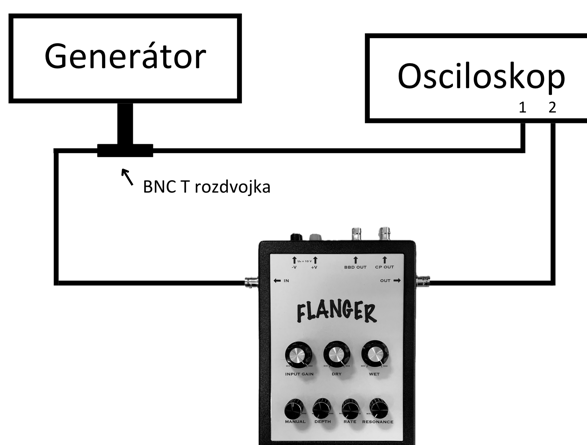
Výstup analyzátoru Bode 100 připojte na vstup přípravku a vstup kanálu 2 analyzátoru na výstup přípravku. Nastavte měření kmitočtové charakteristiky v levé a pravé části programu podle následující tabulky (tab. 6.1).

Tabulka 6.1 Nastavení Bode Analyzer Suite pro měření

Parametr	Hodnota
Start Frequency	20 Hz
Stop Frequency	20 kHz
Sweep Mode	Logarithmic
Level	-20 dBm
Attenuator (CH1, CH2)	0 dB
Trace 1 Measurement	Gain
Trace 1 Format	Mag(dB)
Trace 2 Measurement	Gain

Trace 2 Format	Phase(°)
Diagram Setup	Always Two Diagrams

- c. Nastavte parametr MANUAL na minimum, odečtěte z výsledné charakteristiky kmitočty tří libovolných výrazných lokálních minim, nastavte parametr MANUAL na maximum a znovu odečtěte kmitočty tří minim. Podle rovnice  $f_{\min} = \frac{k}{\tau}$  ( $k$  je pořadové číslo minima) vypočítejte doby zpoždění pro maximální a minimální hodnotu parametru MANUAL a zprůměrujte.
  - d. Vytvořte snímek obrazovky zachycující libovolnou modulovou kmitočtovou charakteristiku a vložte do vypracování. Nezapomeňte u snímku uvést polohu parametru MANUAL. Nakonec nastavte MANUAL na střed a z charakteristiky odečtěte kmitočet celkového maxima. Zamyslete se, proč má fázová charakteristika takový tvar, a v závěru zhodnoťte.
  - e. Odpojte od analyzátoru všechny kabely a připojte BNC kabel k jeho výstupu, druhý konec kabelu nechte nezapojený. Opět otevřete *User calibration* a v části *Impedance* klikněte na *Open*. Na nezapojený konec kabelu připojte BNC zkratovací propojku a klikněte na *Short*. Okno kalibrace zavřete a v pravé části programu nastavte zobrazení modulu a fáze impedance. Nezapomeňte zvolit vhodné měřítko osy y.
- 2) Sledujte, jak probíhá řízení BBD registru na úrovni hodinových (taktovacích) pulzů a jak je tím ovlivněn výstupní signál. Následně určete funkci jednotlivých ovládacích prvků.
- a. Odpojte přípravek od analyzátoru a propojte ho s generátorem podle následujícího schématu (obr. 6.3). V menu *Trigger* na osciloskopu nastavte synchronizaci podle kanálu 1.



Obrázek 6.3 Propojení přípravku s generátorem a osciloskopem

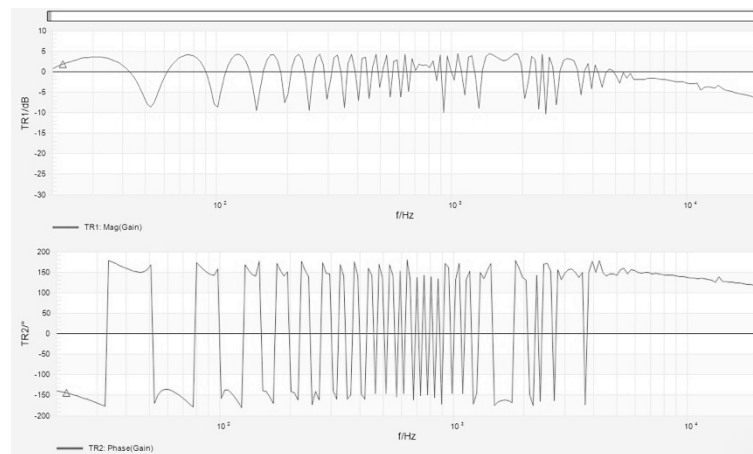
- Pozorujte chování výstupního signálu v závislosti na změně parametrů MANUAL, DEPTH, RATE a RESONANCE. Zkuste také měnit poměr přímé a efektné větve potenciometry DRY a WET. Popište, proč se výstupní signál chová tak, jak je vidět na osciloskopu (proč se hýbe).
- b. Přepojte druhý kanál osciloskopu na výstup CP OUT, nastavte podle tohoto kanálu synchronizaci a pozorujte chování hodinových pulzů. Opět popište, co se signálem děje, a pomocí vhodného nastavení parametrů a tlačítka START/STOP určete nejvyšší a nejnižší kmitočet hodinových pulzů.
  - c. K jednotlivým ovládacím prvkům přiřaďte jejich funkci z následujícího seznamu:
    - Kmitočet LFO
    - Zesílení zpětnovazební signálové cesty
    - Amplituda LFO (hloubka modulace)
    - Hodnota stejnosměrné složky LFO (střední kmitočet hodinových pulzů)
- 3) Prozkoumejte, jak vypadá signál přímo na výstupu BBD.
- a. Přepojte osciloskop z celkového výstupu na výstup BBD OUT a ujistěte se, že výstup generátoru je zapnut a nastaven na sinusový průběh o kmitočtu 1 kHz a napětí 100 mVpp.
  - b. Pozorujte chování signálu přímo na výstupu BBD. Berte v potaz, že BBD registr signál v podstatě vzorkuje. Výstup BBD OUT je ale vyveden ještě před rekonstrukčním filtrem. Ověřte, že vzorkovací kmitočet signálu na výstupu BBD OUT odpovídá dvojnásobku kmitočtu hodinových pulzů.
- 4) Poslechněte si běžné průběhy signálu. (volitelné) – varianta s Audacity
- a. Odpojte osciloskop a generátor ponechte nastavený z předchozího bodu. Na celkový výstup přípravku kabelem BNC-Jack připojte vstup zvukové karty. Na počítači spusťte program Audacity, ve kterém správně nastavte vstup a pomocí ukazatelů úrovně i zisk vstupu zvukové karty.
  - b. Na generátoru postupně nastavujte různé průběhy (pila, trojúhelník, obdélník), nahrávejte do Audacity a poslouchejte. Nezapomeňte experimentovat s ovládacími prvky flangeru.
- 5) Poslechněte si běžné průběhy signálu. (volitelné) – varianta se sluchátkovým zesilovačem
- a. Odpojte osciloskop a generátor ponechte nastavený z předchozího bodu. Na celkový výstup přípravku kabelem BNC-Jack připojte sluchátkový zesilovač.
  - b. Na generátoru postupně nastavujte různé průběhy (pila, trojúhelník, obdélník) a poslouchejte. Nezapomeňte experimentovat s ovládacími prvky flangeru.

## Vzorové vypracování

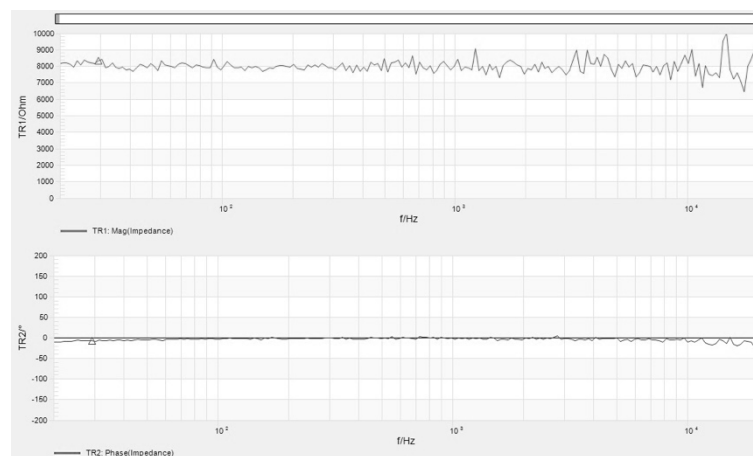
1) Kmitočtová charakteristika modulu a fáze přenosu a impedance, největší a nejmenší doba zpoždění

Nastavení MANUAL		pořadí minima		
		1	2	3
min	f [Hz]	53	101	149
	$\tau$ [ms]	18,9	19,8	20,1
max	f [Hz]	956	1906	2784
	$\tau$ [ms]	1,05	1,05	1,08

- Po zprůměrování vyšlo  $\tau_{\min} = 1,06$  ms a  $\tau_{\max} = 19,6$  ms



- Modulová kmitočtová charakteristika přenosu má tvar hřebenového filtru, což je způsobeno tím, jak se zpožděný signál sčítá střídavě ve fázi a v protifázi s přímým.
- Toto střídání dvou signálů ve fázi a v protifázi je vidět i na fázové charakteristice. Každému maximu a minimu na modulové charakteristice odpovídá jeden průchod nulou na fázové charakteristice.



- Vstupní impedance je zhruba 8 k $\Omega$  na celém slyšitelném kmitočtovém pásmu.

## 2) Určení funkcí jednotlivých ovládacích prvků

MANUAL	Hodnota stejnosměrné složky LFO
DEPTH	Amplituda LFO (hloubka modulace)
RATE	Kmitočet LFO
RESONANCE	Zesílení zpětnovazební signálové cesty

- Na osciloskopu lze pozorovat, jak se u výstupního signálu periodicky mění zpoždění vůči vstupnímu signálu. Rychlost a meze tohoto „posouvání“ v časové oblasti je ovlivněno nastavením parametrů flangeru.
- Na výstupu CP OUT lze pozorovat přímo jeden ze dvou taktovacích signálů, jehož kmitočet přímo ovládá okamžitou dobu zpoždění. Kmitočet taktovacího signálu se periodicky mění v závislosti na nastavení parametrů flangeru.
- Nejvyšší kmitočet pulzů je 25 kHz a nejnižší je 486 kHz.

## 3) Pozorování signálu přímo na výstupu BBD

- Signál na výstupu BBD je silně ovlivněn taktovacími signály, protože mají velmi vysoký kmitočet (až 200 kHz) v důsledku vzorkování a parazitních kapacit pronikají přímo do zpracovávaného signálu.
- Tento problém je vyřešen rekonstrukčním filtrem, který se v obvodu nachází hned za výstupem BBD.
- Připojením výstupu BBD OUT na jeden kanál a CP OUT na druhý kanál lze ověřit, že vzorkovací kmitočet zpracovávaného signálu koresponduje s dvojnásobkem kmitočtu taktovacích pulzů.