

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Návrh analogových nízkofrekvenčních zesilovačů
Low frequency analog amplifiers design

2010/2011

Jaromír Továrek

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Jaromír Továrek**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: **Návrh analogových nízkofrekvenčních zesilovačů**
Low frequency analog amplifiers design

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte přehled principů používaných zapojení u nízkofrekvenčních zesilovačů (pracovní třídy, druhy vazeb, druhy zátěže, metody řízení pracovního bodu, vlastnosti, výhody a nevýhody).
2. Po dohodě s vedoucím práce navrhnete vybrané zapojení a experimentálně ověříte jeho parametry.

Seznam doporučené odborné literatury:

DOLEČEK, J. *Moderní učebnice elektroniky díl IV.* 1. vydání. Praha : BEN, 2006. 295 s.
ISBN 80-7300-185-3.

ŠTÁL, P. *Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D.* 1. vydání. Praha: BEN, 2008. 198 s.
ISBN 978-80-7300-211-6.

ČERMÁK, J; JURKOVIČ, K. *Návrh a konstrukce nízkofrekvenčních tranzistorových zesilovačů.* 2. vydání.
Praha : SNTL, 1974. 322 s.

BUDÍNSKÝ, J. *Nízkofrekvenční tranzistorové zesilovače.* 3. vydání. Praha : SNTL, 1964. 270 s.

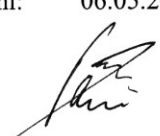
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Dr.Ing. Libor Gajdošík**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011




prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě

Podpis

Rád bych poděkoval Dr. Ing. Liborovi Gajdošíkovi a Ing. Zdeňkovi Tesařovi za rady, připomínky a odborné vedení při vypracování mé bakalářské práce.

Abstrakt

V první části mé práce se zabývám přehledem základních principů nízkofrekvenčních zesilovačů, jako jsou základní parametry (napěťové zesílení, proudové zesílení, výkonové zesílení, vstupní impedance, výstupní impedance a dynamický rozsah), základní zapojení (SE, SC a SB), pracovní třídy (A, B, AB a D), rozdělení zesilovačů na napěťové a výkonové, druhy vazeb (přímá, kapacitní a induktivní), druhy zátěže (odporová a induktivní) a metody řízení pracovního bodu (kompresor dynamiky a koncové zesilovače se samočinným nastavením pracovního bodu v závislosti na buzení).

V druhé části jsem navrhl zesilovač s kompresorem dynamiky a pomocí RC stavebnice, nepájivého pole a programu Multisim 9 jsem ověřil jeho funkčnost a proměřil jeho vlastnosti. Proměřil jsem závislost výstupního napětí na vstupním a z naměřených hodnot jsem vypočetl dynamický rozsah.

V poslední části jsem navrhl zesilovač pracující ve třídě A, u kterého jsem proměřil a vypočetl stejné parametry jako u kompresoru dynamiky. Na závěr jsem naměřené parametry obou zesilovačů porovnal.

Klíčová slova

Analogový nízkofrekvenční zesilovač; kompresor dynamiky; pracovní bod; zesílení; dynamický rozsah; amplitudová frekvenční charakteristika; účinnost

Abstract

The first section of the dissertation gives an overview of principles of audio amplifiers, such as basic parameters (voltage gain, current gain, power gain, input impedance, output impedance, and dynamic range), basic integration (SE, SC, and SB), amplifier classes (A, B, AB and D), division of amplifiers into voltage and power amplifiers, types of couplings (direct, capacitive, and inductive), types of loads (resistive and inductive), and methods of operating point control (dynamics compressor and output amplifiers with self-alignment of an operating point depending upon excitation).

In the second part, an amplifier with a dynamics compressor was designed; its functionality was verified with aid of RC construction, breadboard and Multisim 9 programme, and its features were measured. The dependence of output voltage on input voltage was measured and the measurement was used to calculate the dynamic range.

The last section proposes an amplifier operating in the A class; same parameters as for dynamics compressor were measured and calculated. Then, measured parameters of both amplifiers were compared.

Key words

Low frequency amplifier; dynamics compressor; operating point; gain; dynamic range; amplitude frequency response; effectivity

Seznam použitých zkratk a symbolů

A_i – proudové zesílení [-]

A_P – výkonové zesílení [-]

A_u – napěťové zesílení [-]

C_{Vx} – kapacita vazebního kondenzátoru číslo x [F]

C_x – kapacita kondenzátoru číslo x [F]

D – dynamický rozsah [-]

f – frekvence [Hz]

f_d – dolní mezní kmitočet [Hz]

g – strmost [A/V]

h_{21e} – proudový zesilovací činitel [-]

i_1 – okamžitý vstupní proud [A]

i_{2K} – okamžitý výstupní proud nakrátko [A]

i_B – okamžitý proud báze [A]

I_B – proud báze [A]

I_{Bp} – proud báze v pracovním bodě [A]

I_C – kolektorový proud [A]

I_{Cp} – kolektorový proud v pracovním bodě [A]

I_E – emitorový proud [A]

i_F – střídavý proud diody [A]

I_{FSS} – usměrněný řídicí proud diody [A]

m – konstanta, která závisí na technologii výroby PN přechodu

P_{SS} – výkon dodávaný do koncového stupně [W]

P_Z – výkon dodávaný do zátěže [W]

r_{BE} – odpor mezi bází a emitorem [Ω]

r_{CE} – odpor mezi kolektorem a emitorem [Ω]
 r_F – odpor diody [Ω]
 r_{vst} – vstupní odpor [Ω]
 $r_{výst}$ – výstupní odpor [Ω]
 R_B – odpor rezistoru báze [Ω]
 R_C – odpor kolektorového rezistoru [Ω]
 R_D – odpor útlumového článku [Ω]
 R_{celk} – celkový výstupní odpor [Ω]
 R_E – odpor emitorového rezistoru [Ω]
 R_g – vnitřní odpor [Ω]
 R_{nab} – odpor nabíjecí [Ω]
 R_{vyb} – odpor vybíjecí [Ω]
 R_x – odpor rezistoru číslo x [Ω]
 R_Z – odpor zátěže [Ω]
 T – perioda [s]
 u_1 – okamžité vstupní napětí [V]
 u_{1pp} – rozkmit vstupního napětí [V]
 u_{1k} – vstupní napětí kompresoru [V]
 u_{20} – okamžité výstupní napětí naprázdno [V]
 u_{2pp} – rozkmit výstupního napětí [V]
 u_{REG} – napětí na kondenzátoru C_5 [V]
 U_{1KPP} – maximální rozkmit napětí na vstupu kompresoru [V]
 U_C – maximální napětí na kondenzátoru C_5 [V]
 U_{CC} – napájecí napětí [V]
 U_{CEp} – napětí mezi kolektorem a emitorem v pracovním bodě [V]

U_{EA} – Earlyho napětí [V]

U_T – teplotní napětí [V]

Z_{vst} – vstupní impedance [Ω]

$Z_{výst}$ – výstupní impedance [Ω]

η – účinnost [-]

τ – časová konstanta [ms]

D_x – dioda číslo x

ID_x – ideální dioda číslo x

nf – nízkofrekvenční

obr. x: – obrázek číslo x

P – pracovní bod

SB – zapojení se společnou bází

SC – zapojení se společným kolektorem

SE – zapojení se společným emitorem

T_{rx} – transformátor číslo x

T_x – tranzistor číslo x

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Základní parametry zesilovačů	2
3. Základní zapojení jednostupňových zesilovačů s bipolárními tranzistory.....	3
3.1. Zapojení se společným emitorem.....	3
3.2. Zapojení se společným kolektorem.....	4
3.3. Zapojení se společnou bází	5
3.4. Porovnání a shrnutí vlastností jednotlivých zapojení.....	6
4. Třídy zesilovačů.....	7
4.1. Analogové třídy zesilovačů.....	7
4.1.1. Třída A	8
4.1.2. Třída B	9
4.1.3. Třída AB	10
4.2. Třídy spínaných zesilovačů.....	11
4.2.1. Třída D	11
5. Rozdělení zesilovačů na napěťové a výkonové	12
5.1. Napěťové zesilovače	12
5.2. Výkonové zesilovače	12
6. Druhy zátěže	12
6.1. Induktivní zátěž.....	12
6.2. Odporová zátěž	12
7. Druhy vazeb	13
7.1. Střídavé vazby.....	13
7.1.1. Kapacitní vazba (RC).....	13
7.1.2. Induktivní vazba (transformátorová).....	14
7.2. Stejnoseměrné vazby	15
7.2.1. Přímá vazba.....	15
8. Řízení pracovního bodu v závislosti na velikosti budícího signálu	16

8.1.	Koncové zesilovače se samočinným nastavením pracovního bodu v závislosti na buzení (s „klouzajícím předpětím“)	16
8.2.	Kompresor dynamiky	17
9.	Návrh zesilovače s kompresorem dynamiky	18
10.	Ověření vlastností zesilovače s kompresorem dynamiky	24
10.1.	Ověření pomocí RC stavebnice	27
10.2.	Ověření pomocí programu Multisim 9	30
10.3.	Ověření pomocí nepájivého pole	34
11.	Návrh zesilovače pracujícího ve třídě A	37
12.	Ověření vlastností zesilovače pracujícího ve třídě A	41
12.1.	Ověření pomocí RC stavebnice	41
12.2.	Ověření pomocí programu Multisim 9	44
13.	Závěr	47
	Seznam použité literatury	48
	Seznam příloh	49

1. Úvod

Zesilovač je elektronické zařízení, které má za úkol odevzdat do spotřebiče větší výkon signálu, než je výkon dodávaný do zesilovače ze zdroje. Zdrojem signálu může být například mikrofon, který převádí akustický hlasový projev na elektrický signál, který je dále potřeba zesílit.

Pokud mluvíme o analogovém zesilovači, tak to znamená, že je zesilovač složen z diskrétních součástí, které nelze dále dělit bez porušení jejich vlastností. Diskrétní součástky jsou například rezistory, kondenzátory, cívky, tranzistory atd.

Každý zesilovač je navržen tak, aby zesiloval signál v určitém kmitočtovém pásmu, u nízkofrekvenčních zesilovačů je toto pásmo v rozmezí od 1Hz do desítek kHz.

Zesilovače se využívají téměř ve všech elektronických zařízeních, se kterými se můžeme setkat v běžném životě. Přestože jsou v poslední době analogové zesilovače nahrazovány integrovanými obvody, které mají lepší technické parametry, větší spolehlivost, menší rozměry, nižší energetickou spotřebu a také pořizovací cena je nižší, tak se stále vyskytují aplikace, kde se bez analogových zesilovačů neobejdeme.

2. Základní parametry zesilovačů

Napět'ové zesílení: je to poměr napětí výstupního k napětí vstupnímu

$$A_u = \frac{U_2}{U_1} [-; V, V] \quad (1)$$

Proudové zesílení: je to poměr výstupního proudu k proudu vstupnímu

$$A_i = \frac{I_2}{I_1} [-; A, A] \quad (2)$$

Výkonové zesílení: je to poměr výstupního výkonu signálu k výkonu vstupního signálu

$$A_P = \frac{P_2}{P_1} [-; W, W] \quad (3)$$

Vstupní impedance: určuje velikost zatížení předchozího obvodu zesilovače, je dána poměrem vstupního napětí a proudu

$$Z_{vst} = \frac{U_1}{I_1} [\Omega; V, A] \quad (4)$$

Výstupní impedance: je dána poměrem výstupního napětí a proudu

$$Z_{výst} = \frac{U_2}{I_2} [\Omega; V, A] \quad (5)$$

Dynamický rozsah: určuje převýšení maximální úrovně vstupního signálu, nad jeho minimální úrovní, při které nedojde k nedovolenému zkreslení výstupního signálu

$$D = \frac{U_{1MAX}}{U_{1MIN}} [-; V, V] \quad (6)$$

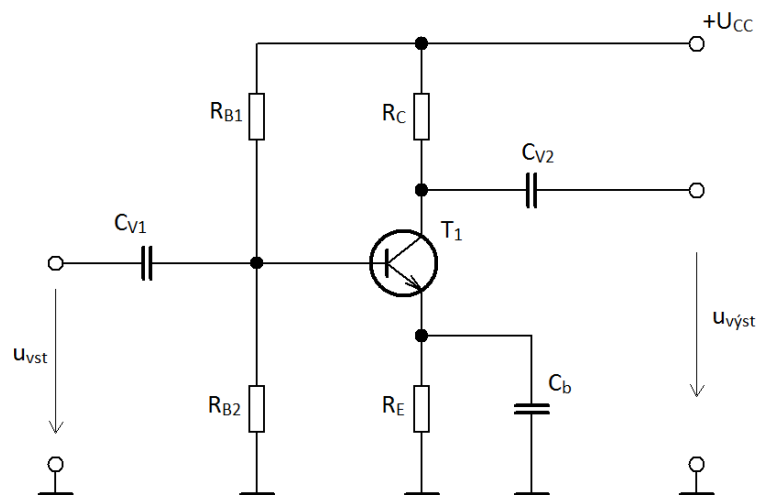
Při zpracování této kapitoly jsem čerpal z literatury [1].

3. Základní zapojení jednostupňových zesilovačů s bipolárními tranzistory

Mezi základní zapojení jednostupňových zesilovačů s bipolárním tranzistorem patří:

- Zapojení se společným emitorem (SE)
- Zapojení se společným kolektorem (SC)
- Zapojení se společnou bází (SB)

3.1. Zapojení se společným emitorem



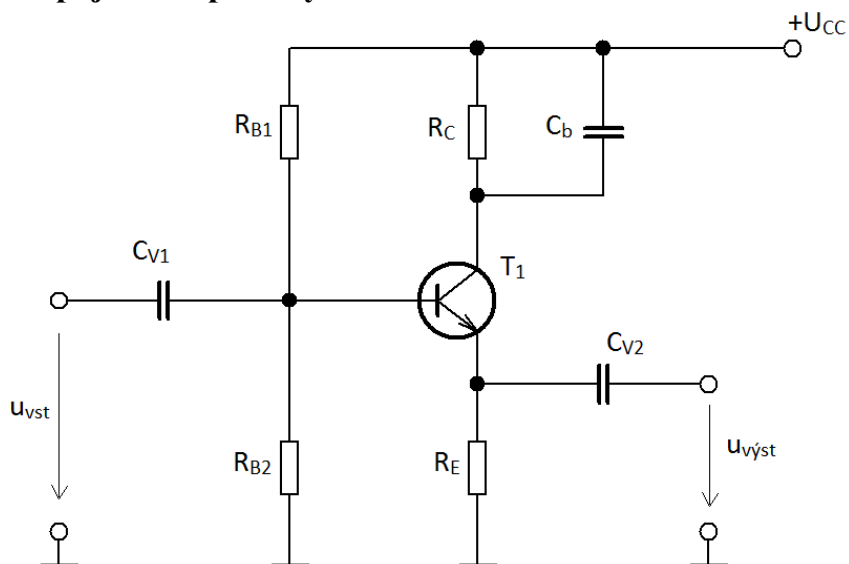
Obr. 1: Základní zapojení se společným emitorem

Vlastnosti zapojení:

- Velké výkonové zesílení, $A_p \gg 1$
- Proudové zesílení větší jak 1, $A_i > 1$
- Napěťové zesílení může dosahovat vysokých hodnot při velkých zatěžovacích odporech, $A_u \gg 1$ při $R_Z \gg 1$
- Výstupní napětí je fázově posunuto o 180° proti napětí vstupnímu
- Velká vstupní impedance, $Z_{vst} \sim 10\Omega$
- Nízká výstupní impedance, $Z_{výst} \sim 10k\Omega$

- Vhodné zapojení pro kaskádní zesilovací stupně s přímou vazbou nebo vazbou RC, díky velkému výkonovému zesílení

3.2. Zapojení se společným kolektorem

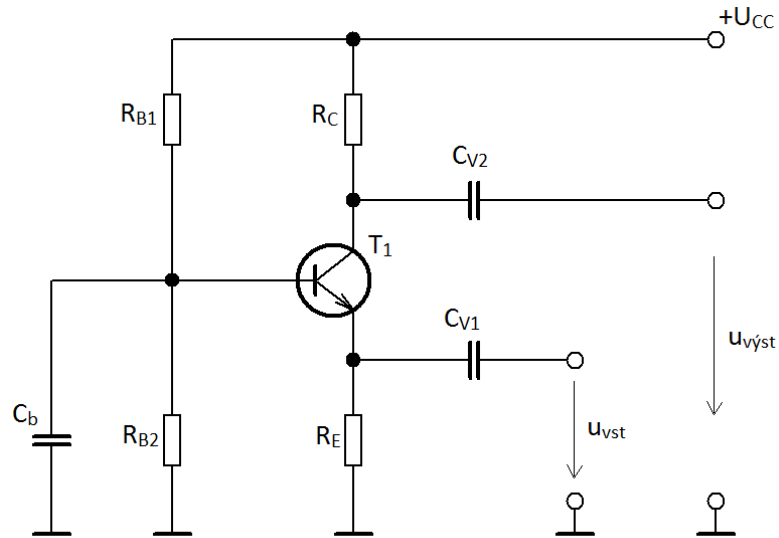


Obr. 2: Základní zapojení se společným kolektorem

Vlastnosti zapojení:

- Poměrně malé výkonové zesílení, $A_p > 1$
- Proudové zesílení větší jak 1, $A_i > 1$
- Napěťové zesílení menší jak 1, $A_u < 1$
- Výstupní napětí je ve fázi s napětím vstupním
- Velká vstupní impedance, $Z_{vst} \sim 100k\Omega$
- Nízká výstupní impedance, $Z_{výst} \sim 100\Omega$
- Zapojení se používá, pokud požadujeme velkou vstupní impedanci nebo malou výstupní (emitorový sledovač)

3.3. Zapojení se společnou bází



Obr. 3: Základní zapojení se společnou bází

Vlastnosti zapojení:

- Malé výkonové zesílení, $A_p > 1$
- Proudové zesílení menší jak 1, $A_i < 1$
- Napěťové zesílení může dosahovat vysokých hodnot při velkých zatěžovacích odporech, $A_u \gg 1$ při $R_Z \gg 1$
- Výstupní napětí je ve fázi se vstupním
- Velmi malá vstupní impedance, $Z_{vst} \sim 10\Omega$
- Velmi velká výstupní impedance, $Z_{výst} \sim 100k\Omega$
- Vzhledem k velmi rozdílným vstupním a výstupním impedancím dosáhneme většího zesílení jen při transformátorové vazbě ve vstupním a výstupním obvodu

3.4. Porovnání a shrnutí vlastností jednotlivých zapojení

Porovnání jednotlivých zapojení

Zapojení se společným emitorem (SE).

Má nejméně stabilní výkonové zesílení A_p , které je závislé na změnách proudového zesilovacího činitele h_{21e} , přesto je výkonové zesílení u tohoto zapojení největší. Díky této vlastnosti se ho využívá nejvíce. Proudové zesílení A_i je mnohem větší jak 1, napěťové zesílení A_u je také mnohem větší jak 1 a výstupní napětí je fázově posunuto o 180° oproti vstupnímu. Vstupní impedance Z_{vst} je řádově jednotky kiloohmů a zvětšuje se při zmenšování zatěžovacího odporu R_z . Výstupní impedance $Z_{výst}$ se řádově pohybuje v desítkách kiloohmů a zvětšuje se při zmenšování vnitřního odporu R_g .

Zapojení se společným kolektorem (SC).

Má poměrně stabilní výkonové zesílení A_p , které nezávisí na změnách proudového zesilovacího činitele h_{21e} , ale je u tohoto zapojení nejmenší. Proudové zesílení A_i je přibližně stejné jako u zapojení SE. Napěťové zesílení A_u je menší jak 1 a výstupní napětí je ve fázi se vstupním. Vstupní impedance Z_{vst} je o několik řádů větší, než u zapojení SE a SB a při zmenšování zatěžovacího odporu R_z klesá. Výstupní impedance $Z_{výst}$ je u tohoto zapojení nejmenší ze všech.

Zapojení se společnou bází (SB).

Má nestabilnější výkonové zesílení A_p , které nezávisí na změnách parametrů tranzistoru a jejich rozptylu. Proudové zesílení A_i je vždy menší jak 1. Napěťové zesílení A_u je přibližně stejně velké (jako u zapojení SE) a výstupní napětí je ve fázi se vstupním. Vstupní impedance Z_{vst} je velmi malá (řádu desítek až stovek ohmů) a klesá při zmenšování zatěžovacího odporu R_z , naproti tomu výstupní impedance $Z_{výst}$ je velmi velká (řádově stovky kiloohmů až jednotky megaohmů). Jelikož jsou vstupní a výstupní impedance velice rozdílné je potřeba k dosažení většího zesílení použít ve vstupním a výstupním obvodu transformátorovou vazbu.

Shrnutí

Z rozboru jednotlivých zapojení vyplývá, že zapojení se společným emitorem má největší výkonové zesílení a střední vstupní a výstupní impedance oproti tomu zapojení se společnou bází má menší výkonové zesílení, malou vstupní a velkou výstupní impedanci. Zapojení se společným kolektorem má nejmenší výkonové zesílení, největší vstupní a nejmenší výstupní impedanci. Proudové i napěťové zesílení má pouze zapojení se společným emitorem, jelikož zapojení se společným kolektorem má napěťové zesílení menší jak 1 a zapojení se společnou bází má proudové zesílení menší jak 1. To je způsobeno vnitřní zpětnou vazbou tranzistoru. Zatímco zapojení se společným emitorem pracuje jako zesilovač s kladnou zpětnou vazbou, tak zapojení se společným kolektorem a zapojení se společnou bází pracují jako zesilovače se zápornou zpětnou vazbou.

Při zpracování této kapitoly jsem čerpal z literatury [1], [4], [5].

4. Třídy zesilovačů

Třídy zesilovačů porovnáváme pomocí nejdůležitějšího parametru **účinnosti**. Účinnost zesilovače udává míru schopnosti převést vstupní výkon (výkon dodávaný zdrojem) na výstupní výkon (výkon dodávaný do zátěže). V ideálním případě může dosáhnout účinnost hodnoty 1, ale to v praxi není možné.

$$\eta = \frac{P_Z}{P_{SS}} \quad [-; W, W] \quad (7)$$

Vyjádření účinnosti v procentech

$$\eta = \frac{P_Z}{P_{SS}} \times 100 \quad [%; W, W] \quad (8)$$

P_Z – výkon signálu dodávaný do zátěže

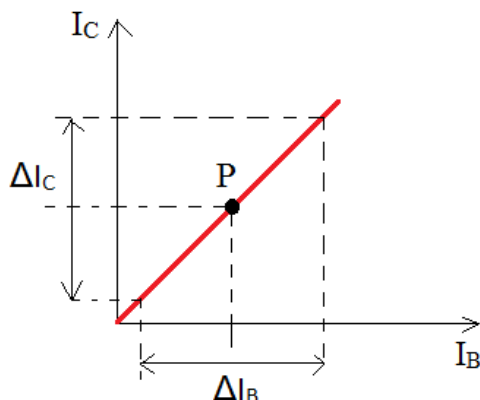
P_{SS} – stejnosměrný signál dodávaný do koncového stupně

4.1. Analogové třídy zesilovačů

Analogové třídy zesilovačů (A, B a AB) se liší v umístění klidového pracovního bodu v soustavě charakteristik.

4.1.1. Třída A

U zesilovačů třídy A je klidový pracovní bod umístěn ve středu lineární části dynamické převodní charakteristiky. Třídou A využíváme jak u zesilovačů se společným emitorem, tak u zesilovačů se společným kolektorem.



Obr. 4: Pracovní bod u zesilovače třídy A

- Výstupní kolektorový proud I_{CP} prochází tranzistorem po celou dobu periody budícího signálu přivedeného do báze.
- Úhel otevření je 2π .
- Malá účinnost (<50%) , což je právě způsobeno průchodem velkého kolektorového proudu, reálně se účinnost pohybuje kolem hranice 20%. Účinnost lze zvýšit transformátorovou vazbou, přesto se toho na nízkých kmitočtech moc často nevyužívá, protože transformátor nemá při stejnosměrném proudu v primáru dobré vlastnosti.
- Zesilovače třídy A se vyznačují malým zkreslením, jsou jednoduché a spolehlivé.
- Využívají se v nízkovýkonových koncových stupních (řádově stovky miliwattů).

Výhody:

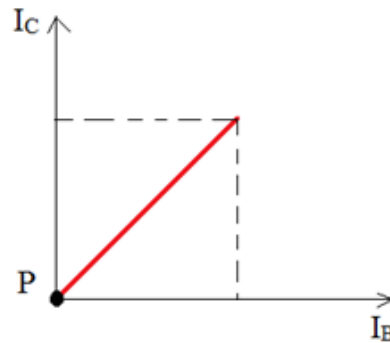
- malé zkreslení i při největším rozkmitu signálu a jednoduchost zapojení

Nevýhody:

- tranzistorem protéká kolektorový proud, i když není přítomen signál, ztrátový výkon je největší právě tam, kde je volen pracovní bod třídy A tedy ve středu charakteristiky

4.1.2. Třída B

U zesilovačů třídy B je klidový pracovní bod nastaven do bodu zániku kolektorového proudu. Z toho vyplývá, že je tranzistor v době, kdy není přítomen signál, uzavřen a tedy jím neteče žádný proud.



Obr. 5: Pracovní bod u zesilovače třídy B

- Jelikož tranzistorem protéká proud po dobu $T/2$ je úhel otevření π .
- Účinnost u zesilovače třídy B je ($\eta > 50\%$), až 78,5%, toto zvýšení oproti zesilovači třídy A je způsobeno právě tím, že když nepřivádíme signál, tak tranzistorem neteče proud.
- U zesilovačů třídy B je mnohem větší zkreslení jak u třídy A.
- Nejčastěji se využívají v koncových výkonových stupních nf zesilovačů.

Výhody:

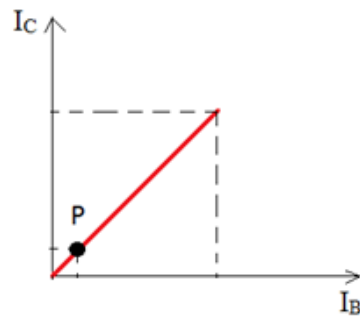
- velká účinnost díky tomu, že je tranzistor otevřen pouze při přítomnosti signálu

Nevýhody:

- pro zesílení celého signálu je potřeba zvlášť zesílit zápornou a kladnou část signálu, další nevýhodou je velké harmonické zkreslení v oblasti malých signálů

4.1.3. Třída AB

Zesilovače třídy AB jsou kompromisem mezi třídou A a třídou B, jelikož zesilovače třídy A mají malou účinnost a zesilovače třídy B mají v oblasti malých signálů velké zkreslení, tak se pracovní bod u této třídy volí nad bodem zániku kolektorového proudu.



Obr. 6: Pracovní bod u zesilovače třídy AB

- Jelikož tranzistorem protéká malý proud, i když nepřivádíme signál je úhel otevření větší než π a menší než 2π .

- Účinnost u této třídy je nižší jako u třídy B, ale díky malému zkreslení se této třídě dává často přednost před třídou B.

Výhody:

- velké snížení nelineárního zkreslení oproti třídě B

Nevýhody:

- menší účinnost jak u třídy B, pro zesílení celého signálu je opět potřeba jako u třídy B zesílit zvlášť kladnou a zápornou půlvlnu

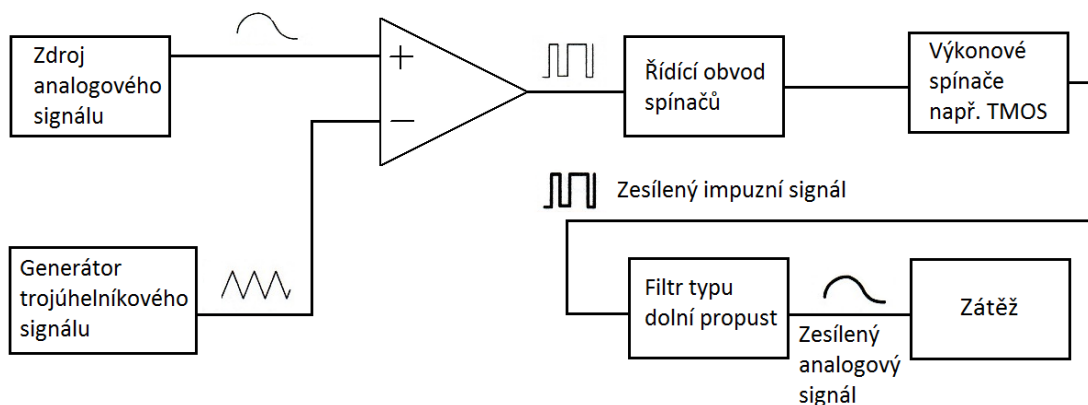
4.2. Třídy spínaných zesilovačů

Třídy spínaných zesilovačů (D, I, T, E, F) zpracovávají analogové signály jejich přeměnou na obdélníkové signály proměnné šířky impulzu.

4.2.1. Třída D

Zesilovače třídy D převádějí analogový signál na šířkově modulované impulzy, které jsou zpracovávány impulzními výkonovými zesilovači.

Princip: Analogový signál je porovnáván s trojúhelníkovým pomocí analogového komparátoru a v závislosti zda je analogový signál větší nebo menší jako trojúhelníkový je na výstupu komparátoru nízká nebo vysoká úroveň. Tímto způsobem vznikají pravoúhlé impulzy o proměnné šířce úměrné velikosti analogového signálu.



Obr. 7: Blokové schéma zesilovače pracujícího ve třídě D

Při zpracování této kapitoly jsem čerpal z literatury [1], [2], [4].

5. Rozdělení zesilovačů na napět'ové a výkonové

5.1. Napět'ové zesilovače

Jsou to zesilovače malých výkonů, které se vyznačují velkým napět'ovým zesílením, malým zkreslením a nízkým vlastním šumem. Používají se jako měřicí zesilovače nebo předzesilovače.

5.2. Výkonové zesilovače

Zesilují vyšší úrovně signálu, u těchto zesilovačů je kladen důraz na velký výstupní výkon, malé zkreslení zesíleného signálu a velkou účinnost. Využívají celou pracovní oblast charakteristik aktivního prvku díky velkému rozkmitu napětí a proudu. Využívají se zejména jako koncové stupně audiozesilovačů, výstupní výkonové vysokofrekvenční anténní zesilovače.

Při zpracování této kapitoly jsem čerpal z literatury [1].

6. Druhy zátěže

6.1. Induktivní zátěž

Pokud máme, jako zátěž kolektoru připojenou cívku musíme počítat s tím, že cívka není ideální, takže se nám projevují i parazitní kapacita a ztrátový odpor. Zátěž se potom chová jako rezonanční obvod, což nám ovlivňuje zesílení. To bude největší při rezonanční frekvenci, kdy se zátěž chová jen jako činný odpor. Pokud bude frekvence vyšší jako frekvence rezonanční, bude mít zátěž kapacitní charakter, naopak pokud bude frekvence nižší, bude charakter zátěže induktivní. Výhodou induktivní zátěže je, že můžeme využít rozkmit výstupního napětí až do výše napájecího napětí. Nevýhodou je, že při nízkých kmitočtech musí mít cívka (nebo transformátor) velké rozměry, proto se v dnešní době moc nevyužívá.

6.2. Odporová zátěž

U odporové zátěže nemůžeme využít rozkmit výstupního napětí až do výše napájecího, tento rozkmit zde musí být omezen. Je zde nutné zabránit otevření kolektorového přechodu (tím vyloučíme stav saturace). Pokud bychom neomezili rozkmit napětí docházelo by v obvodu

k setrvačným dějům (zpoždění otevírání a uzavírání tranzistoru). Výhodou oproti induktivní zátěži je, že nejsou kladeny vysoké podmínky na velikost a výrobu. Nevýhodou zde je, že nemůžeme využít rozkmit výstupního napětí až do výše napájecího napětí jako je u induktivní zátěže.

Při zpracování této kapitoly jsem čerpal z literatury [1], [4].

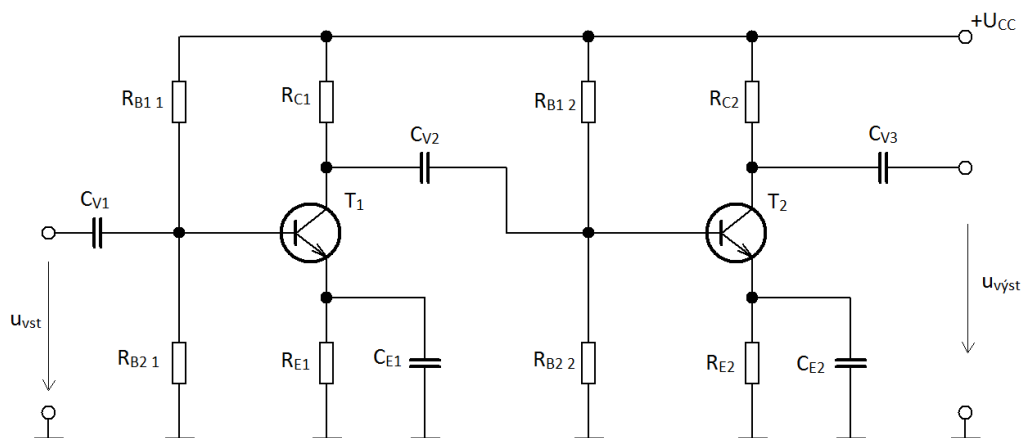
7. Druhy vazeb

Pokud nám nestačí signál upravený (zesílený) pomocí jednostupňového zesilovače je možné použít kaskádního řazení více zesilovacích stupňů. Tyto stupně se však mohou vzájemně negativně ovlivňovat a proto je potřeba mezi zesilovači použít vhodnou vazbu, která nám jednotlivé stupně oddělí. Rozlišujeme dva základní druhy vazeb (střídavé a stejnosměrné).

7.1. Střídavé vazby

7.1.1. Kapacitní vazba (RC)

Tato vazba odděluje jednotlivé stupně pomocí kondenzátorů, a jelikož kondenzátory propouštějí jen střídavé signály, slouží ke galvanickému oddělení jednotlivých stupňů zesilovače. Díky tomuto galvanickému oddělení můžeme nezávisle nastavovat klidové pracovní body jednotlivých tranzistorů.



Obr. 8: Příklad zapojení s RC vazbou

Výhody:

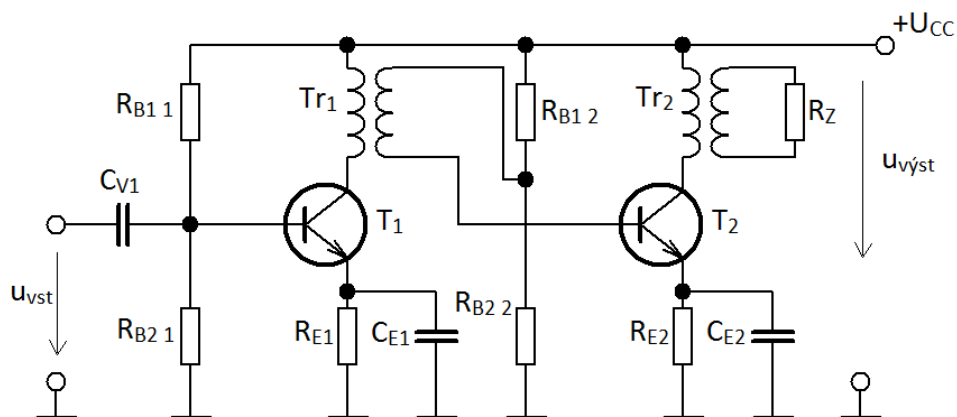
- galvanické oddělení jednotlivých stupňů
- drifty, které vznikají v jednotlivých stupních, neovlivňují ostatní stupně

Nevýhody:

- jelikož kondenzátory nepropouští stejnosměrný signál, je možné zesilovat pouze signál střídavý
- vazební kondenzátory mají vliv dolní mezní kmitočet

7.1.2. Induktivní vazba (transformátorová)

U této vazby slouží k oddělení jednotlivých stupňů transformátor, nebo induktivně vázaný rezonanční LC obvod. Induktivní vazba se využívá především u vysokofrekvenčních zesilovačů, protože u nízkofrekvenčních jsou nutné velké rozměry cívek a z toho pak pramení vysoké náklady.



Obr. 9: Příklad zapojení s transformátorovou vazbou

Výhody:

- galvanické oddělení jednotlivých stupňů
- možnost impedančního přizpůsobení jednotlivých stupňů
- lze získat souměrná napětí

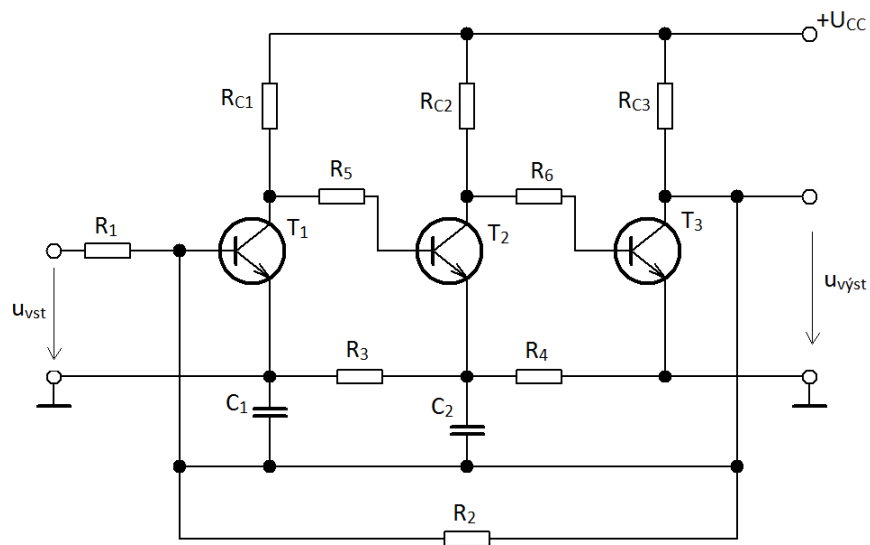
Nevýhody:

- vysoké náklady na výrobu pro nízkofrekvenční zesilovače
- velké rozměry cívek u nízkofrekvenčních zesilovačů

7.2. Stejnosemřné vazby

7.2.1. Přímá vazba

Tato vazba odděluje jednotlivé stupně pomocí rezistoru, může se používat jak pro stejnosměrné signály tak pro střídavé. Přímá vazba neodděluje stupně galvanicky, takže vznik napět'ového driftu v jednom stupni značně ovlivní pracovní body všech stupňů.



Obr. 10: Příklad zapojení s přímou vazbou

Výhody:

- použití jak pro střídavé signály tak pro stejnosměrné

Nevýhody:

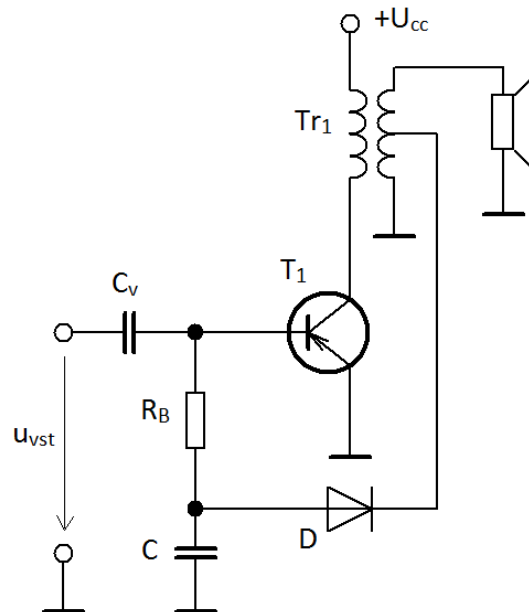
- není zde galvanické oddělení stupňů, takže se jednotlivé stupně mohou ovlivňovat

Při zpracování této kapitoly jsem čerpal z literatury [1], [4].

8. Řízení pracovního bodu v závislosti na velikosti budícího signálu

8.1. Koncové zesilovače se samočinným nastavením pracovního bodu v závislosti na buzení (s „klouzajícím předpětím“)

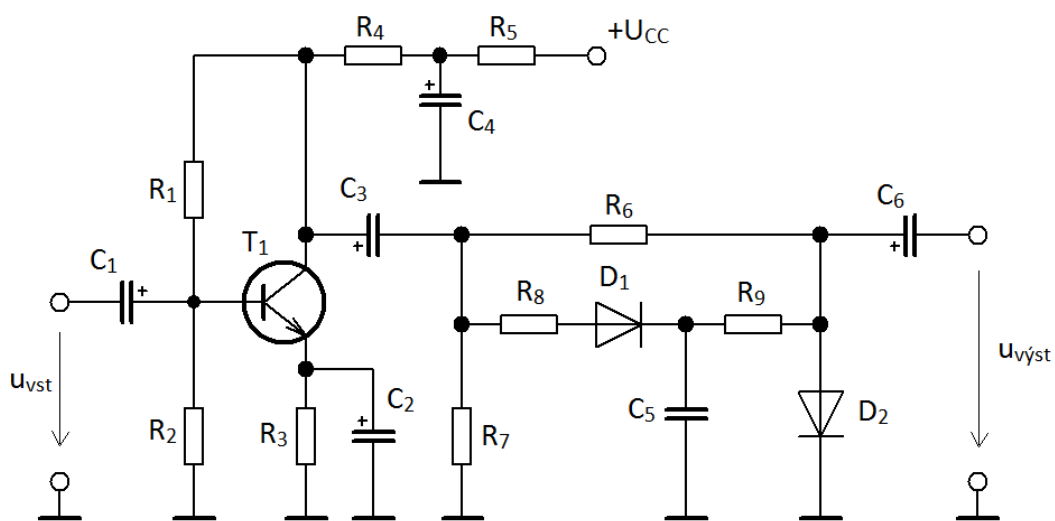
Výhodou těchto zesilovačů je, že u nich můžeme zvýšit výstupní výkon oproti zesilovačům se stabilním pracovním bodem. Tohoto zvýšení docílíme, pokud se bude samočinně měnit velikost stejnosměrného proudu I_C podle amplitudy výstupního signálu. Klidový pracovní bod se potom pohybuje po zatěžovací přímce podle amplitudy výstupního signálu. Stejnosměrný příkon stoupá úměrně k výstupnímu výkonu, a pokud není tranzistor plně vybuzen, je u tohoto zesilovače účinnost větší než u běžného zesilovače. Pokud je tranzistor plně vybuzen, je účinnost srovnatelná s účinností běžného zesilovače a ztrátový příkon je v tomto případě maximální. To je podstatný rozdíl proti zesilovači se stabilním pracovním bodem, kde je příkon maximální, když není na vstup zesilovače přiveden signál. U zesilovače se samočinným nastavením klidového pracovního bodu může být při stejném výstupním výkonu ztrátový příkon poloviční, nebo při stejném ztrátovém příkonu výstupní výkon dvojnásobný.



Obr. 11: Základní zapojení zesilovače se samočinným nastavením pracovního bodu v závislosti na amplitudě výstupního signálu

8.2. Kompresor dynamiky

Hlavním úkolem kompresoru je zmenšit dynamický rozsah vstupních signálů, tak aby i nejmenší signál byl nad úrovní hluků prostředí. Kompresor také zmenšuje kolísání úrovně vstupního signálu. Zjednodušeně se dá říci, že kompresor dynamiky udržuje výstupní napětí téměř konstantní bez ohledu na změny vstupního napětí. Největší využití má v elektroakustice, kde se používá například k vyrovnaní hlasitosti, hovoří-li osoba do mikrofону z různé vzdálenosti.



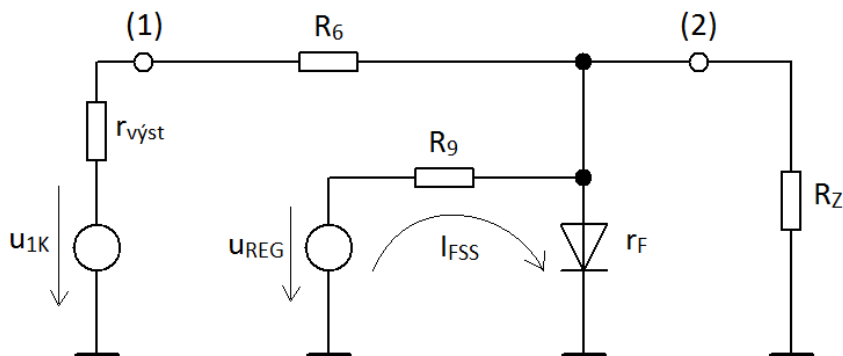
Obr. 12: Schéma zapojení kompresoru dynamiky

Při zpracování této kapitoly jsem čerpal z literatury [3], [4].

9. Návrh zesilovače s kompresorem dynamiky

Pro návrh zesilovače s kompresorem dynamiky jsem si vybral zapojení na obr. 12. Jako první se navrhuje část s kompresorem dynamiky, ta se skládá z usměrňovače s filtračním kondenzátorem a z útlumového článku, k této části se nakonec navrhne vhodný zesilovač pracující ve třídě A.

Zvolené parametry: $A_U = 70$
 $h_{21e} = 125$
 $f_d = 50\text{Hz}$
 $I_{Cp} = 0,25\text{mA}$
 $I_{Bp} = 2\mu\text{A}$
 $U_{cc} = +10\text{V}$
 $U_{cep} = 6,7\text{V}$
 $R_Z = 50\text{k}\Omega$
 $U_{RC} = 3\text{V}$
 $U_{2KPP} = 200\text{mV}$
 $m = 1$
 $I_{R1} = I_{R2} = 0,09\text{mA}$



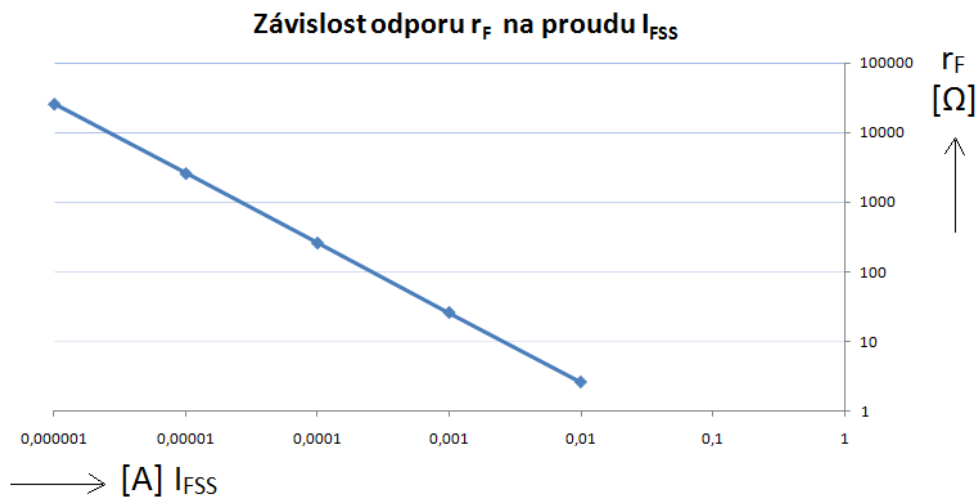
Obr. 13: Zjednodušený model kompresoru pro určení I_{FSS}

$$U_T = \frac{k \times T}{q}$$

$$U_T = \frac{1,38 \times 10^{-23} \times (273 + 25)}{1,6 \times 10^{-19}} = 26\text{mV}$$

$$R_Z \gg r_{Fmax}$$

$$r_F = \frac{m \times U_T}{I_{FSS}}$$



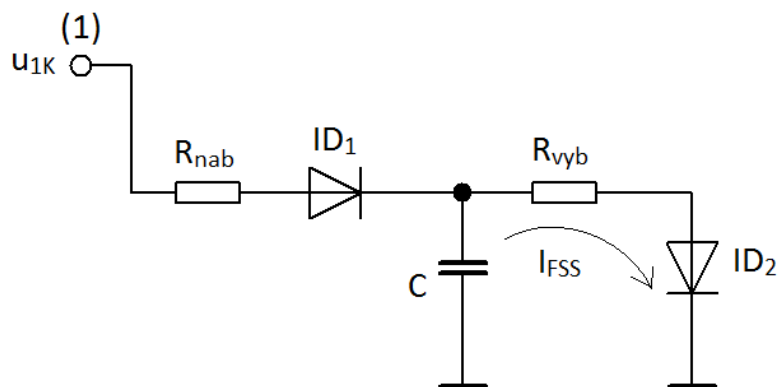
Obr. 14: Závislost odporu r_F na proudu I_{FSS}

Volíme $I_{FSS} = 26\mu A$

$I_{FSS} = 26\mu A \rightarrow r_F = 1k\Omega$

$i_F \approx (0,1 \div 0,3) \times I_{FSS}$

$i_F = 0,2 \times I_{FSS} \approx 5\mu A$

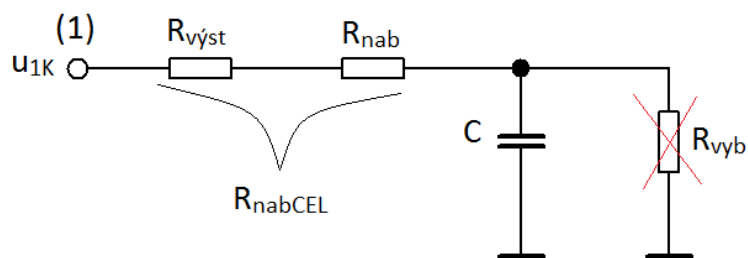


Obr. 15: Schéma pro určení časových konstant

Podle doporučení z literatury [6] jsem zvolil příslušné hodnoty časových konstant.

$\tau_{nab} \approx 7ms$

$\tau_{vyb} \approx 100ms$



Obr. 16: Schéma pro určení nabíjecího odporu

$R_{vyst} + R_{nab} \ll R_{vyb} \rightarrow R_{vyb}$ můžeme zanedbat

$$R_{vyst} = \frac{r_{vystT} \times R_{vstK}}{r_{vystT} + R_{vstK}}$$

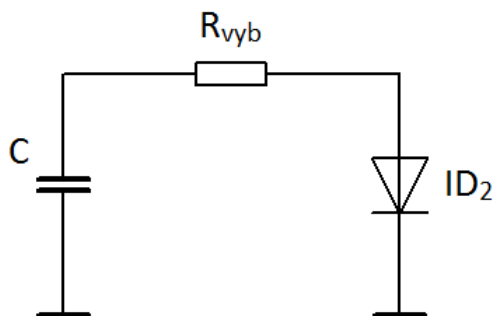
$$R_{vyst} = \frac{7000 \times 4700}{7000 + 4700} = 2,8k\Omega$$

$$R_{nab} = \frac{\tau_{nab}}{C} - R_{vyst}$$

$$R_{nab} = \frac{7 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-6}} - 2,8 \times 10^3 = 700\Omega$$

$$R_{nab} = (300 \div 700)\Omega$$

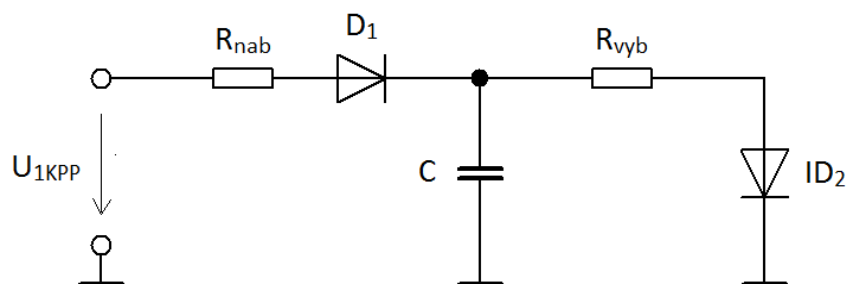
R_{nab} – volíme 470Ω



Obr. 17: Schéma pro určení vybíjecího odporu

$$R_{vyb} = \frac{\tau_{vyb}}{C}$$

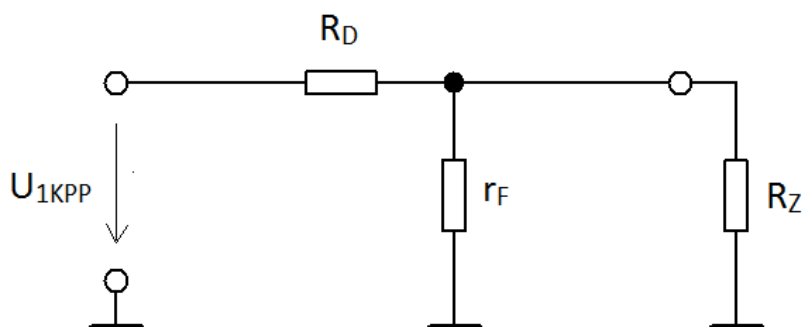
$$R_{vyb} = \frac{100 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-6}} = 50k\Omega \text{ volíme } 47k\Omega$$



Obr. 18: Schéma pro určení rozkmitu U_{1KPP}

$$U_C = R_{vyb} \times I_{FSS} = 47 \times 10^3 \times 26 \times 10^{-6} = 1,2V$$

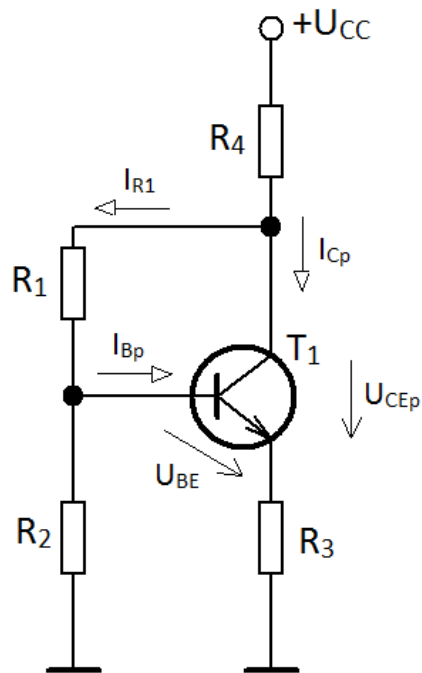
$$\frac{U_{1KPP}}{2} = U_C + U_{F1} = 1,4V \rightarrow U_{1KPP} = 2,8V$$



Obr. 19: Schéma pro stanovení odporu R_D

$$R_D = \frac{U_{1KPP} - U_{2KPP}}{i_F}$$

$$R_D = \frac{2,8 - 0,2}{5 \times 10^{-6}} = 520k\Omega \text{ po odzkoušení jsem zvolil hodnotu } 330k\Omega$$



Obr. 20: Stejnsměrný model pro nastavení pracovního bodu

$$I_E \approx I_{Cp}$$

$$R_3 = \frac{U_{CC} - U_{R4} - U_{CEp}}{I_{Cp}}$$

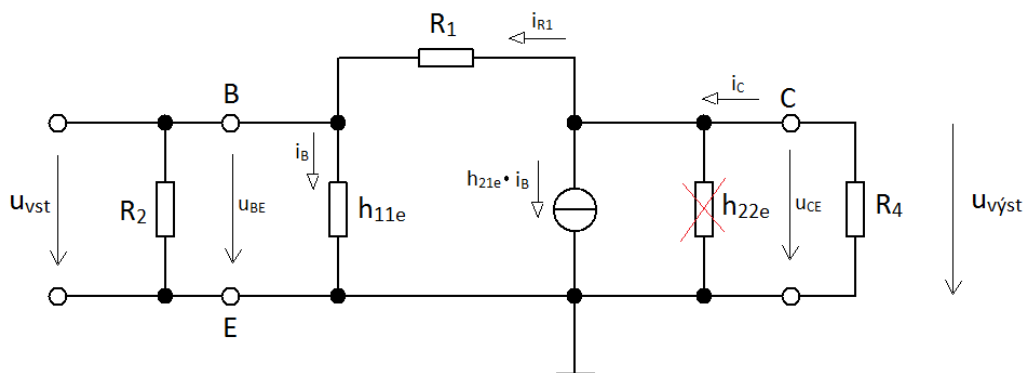
$$R_3 = \frac{10 - 3 - 6,7}{0,25 \times 10^{-3}} = 1,2k\Omega$$

$$R_1 = \frac{U_{CC} - U_{R4} - U_{BE}}{I_{R1}}$$

$$R_1 = \frac{10 - 3 - 0,7}{90 \times 10^{-6}} = 70k\Omega \text{ volíme } 68k\Omega$$

$$R_2 = \frac{U_{BE} + U_{R3}}{I_{R1}} = \frac{0,7 + 0,3}{90 \times 10^{-6}} = 11k\Omega \text{ volíme } 10k\Omega$$

$$R_4 = \frac{U_{R4}}{I_{Cp} + I_{R1}} = \frac{3}{0,25 \times 10^{-3} + 90 \times 10^{-6}} = 8,5k\Omega \text{ volíme } 8,2k\Omega$$



Obr. 21: Střídavý model RS

$$h_{21e} \approx h_{21E}$$

$$g = \frac{I_{Cp}}{m \times U_T} = \frac{0,25 \times 10^{-3}}{25 \times 10^{-3}} = 0,01 \text{ A/V}$$

$$h_{11e} = \frac{h_{21e}}{g} = \frac{125}{0,01} = 12,5 \text{ k}\Omega$$

$$h_{22e} = \frac{U_{EA}}{I_{Cp}} = \frac{90}{0,25 \times 10^{-3}} = 300 \text{ k}\Omega$$

$$r_{výst} \approx R_4 \rightarrow r_{výst} \approx 7 \text{ k}\Omega$$

$$r_{vst} \approx 800 \Omega \quad \text{odsimulováno v programu SNAP}$$

Vazební kondenzátory volíme v rozmezí $(10 \div 100) \mu\text{F}$, aby byl dolní mezní kmitočet pod hranicí hovorového pásma.

Soupis součástek podle označení na obr. 12

Tabulka 1

R ₁ (R _{B1})	68kΩ
R ₂ (R _{B2})	10kΩ
R ₃ (R _E)	1,2kΩ
R ₄ (R _C)	8,2kΩ
R ₅ tvoří s C ₄ filtr napájení	Volíme 470Ω
R ₆ (R _D)	330kΩ
R ₇ (R _{vstK})	4,7kΩ
R ₈ (R _{nab})	470Ω
R ₉ (R _{vzb})	47kΩ
C ₁ elektrolyt	10μF
C ₂ elektrolyt	100μF
C ₃ elektrolyt	100μF
C ₄ elektrolyt	Volíme 100μF
C ₅ filtrační kondenzátor	2μF
C ₆ elektrolyt	10μF
D ₁ (Schottkyho dioda)	BAT48
D ₂ (Schottkyho dioda)	BAT48
T ₁	BC547A

10. Ověření vlastností zesilovače s kompresorem dynamiky

Jak jsem již uvedl v teoretické části, kompresor dynamiky má tři základní vlastnosti:

- Výstupní signál je téměř konstantní bez ohledu na změny vstupního.
- Zmenšuje kolísání úrovně signálu.
- Zmenšuje dynamický rozsah vstupního signálu tak, aby i nejmenší signál byl nad úrovní hluku prostředí.

Jeho hlavní využití je v elektroakustice, kde se používá například v mikrofonech k vyrovnávání hlasitosti, hovoří-li osoba do mikrofonu z různé vzdálenosti. Dále se také využívá v nahrávacích studiích při zpracování zvuku, nebo v telefonních přístrojích atd.

V praktických aplikacích se však nevyužívá kompresor samostatně, ale v kombinaci s tzv. expandorem.

V každém prostředí je přenos rušen přítomností cizích rušivých hluků. Tyto hluky mohou být způsobeny (přeslechy, síťovým bručením, tepelným šumem nebo kvantizačním zkreslením). Úroveň těchto hluků omezuje nejnižší úroveň signálu, který může být s požadovaným odstupem

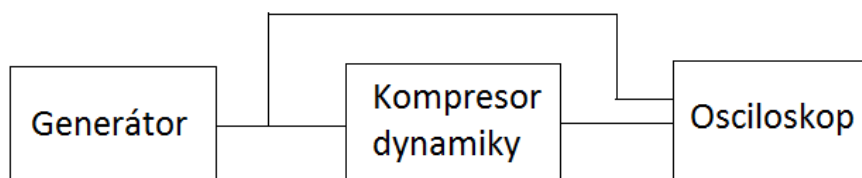
přenesen. V těchto případech se k takovému nekvalitnímu přenosovému prostředí připojí na vstup kompresor a na výstup expandor.

Jelikož obě tyto zařízení k sobě z hlediska činnosti patří, bývají označovány souhrnně jako kompondor.

Hlavním úkolem expandoru je vrátit signálu původní dynamický rozsah (který mění kompresor) a současně zmenšit úroveň hluků.

Pro ověření vlastností kompresoru jsem si vybral zapojení na obr. 12, které jsem navrhnul a postupně zapojil pomocí RC stavebnice, pomocí nepájivého pole a nakonec ještě odsimuloval v programu Multisim 9. V poslední části jsem si navrhl jednoduchý zesilovač pracující ve třídě A, který jsem také proměřil a porovnal jeho vlastnosti se zesilovačem s kompresorem dynamiky.

Schéma zapojení:



Obr. 22: Blokové schéma pro měření kompresoru dynamiky

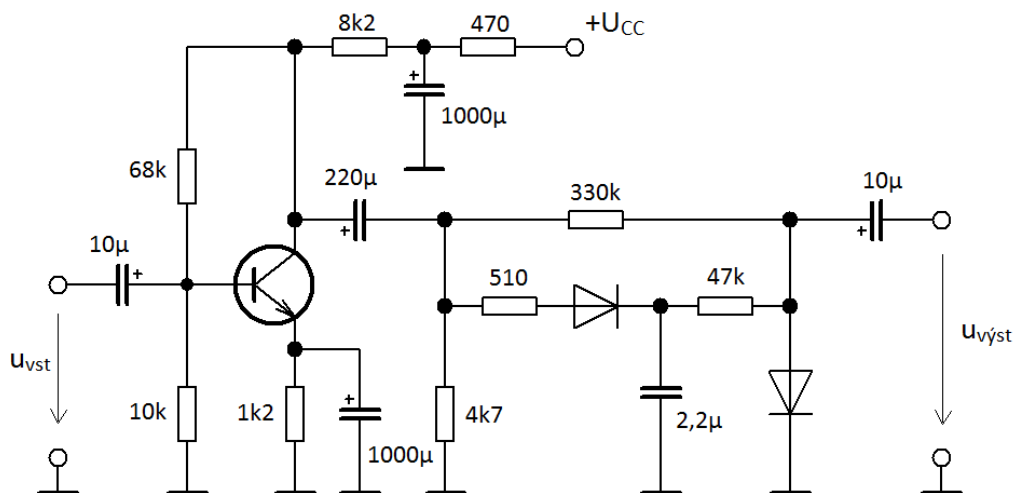
Použité přístroje:

- Osciloskop – Tektronix TDS 2002B
- Generátor – GoldStar FG-2002C
- Zdroj – BK 127

Postup měření:

K ověření vlastností jsem si proměřil závislost výstupního napětí na vstupním a amplitudovou frekvenční charakteristiku. Závislost výstupního napětí na vstupním jsem měřil u každého zapojení pro tři frekvence z hovorového pásma. Zvolil jsem dvě krajní frekvence 300Hz a 3400Hz a jednu frekvenci ze středu pásma 1500Hz. Pro patřičnou frekvenci jsem nastavoval rozkmit vstupního napětí a odečítal rozkmit výstupního napětí. Rozkmit vstupního napětí jsem zvyšoval, tak dlouho dokud nezačal být výstupní signál zkreslený. Tento postup jsem opakoval pro všechny frekvence a všechny zapojení. Měření amplitudové frekvenční charakteristiky jsem provedl tak, že jsem si nastavil konstantní rozkmit vstupního napětí (30mV) a pro patřičné frekvence z tabulky jsem odečítal hodnoty rozkmitu výstupního napětí. Z hodnot výstupního a vstupního rozkmitu napětí jsem poté vypočítal zesílení.

10.1. Ověření pomocí RC stavebnice



Obr. 23: Zapojení kompresoru dynamiky s hodnotami součástek pro RC stavebnici

Seznam součástek podle označení na obr. 12

Tabulka 2

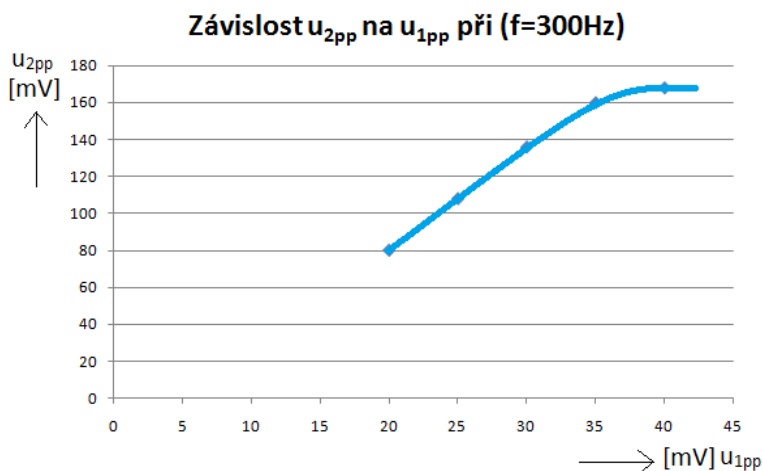
R ₁	68kΩ
R ₂	10kΩ
R ₃	1,2kΩ
R ₄	8,2kΩ
R ₅	470Ω
R ₆	330kΩ
R ₇	4,7kΩ
R ₈	510Ω
R ₉	47kΩ
C ₁ elektrolyt	10µF
C ₂ elektrolyt	1000µF
C ₃ elektrolyt	220µF
C ₄ elektrolyt	1000µF
C ₅	2,2µF
C ₆ elektrolyt	10µF
D ₁	BAT48
D ₂	BAT48
T ₁	BC546A

Tabulky a grafy pro závislost výstupního napětí na vstupním

Tabulka 3

Naměřené hodnoty (RC stavebnice)	
f = 300Hz	
u_{1pp} [mV]	u_{2pp} [mV]
20	80
25	108
30	136
35	160
40	168

$$D = \frac{u_{1ppMAX}}{u_{1ppMIN}} = \frac{40}{20} = 2$$

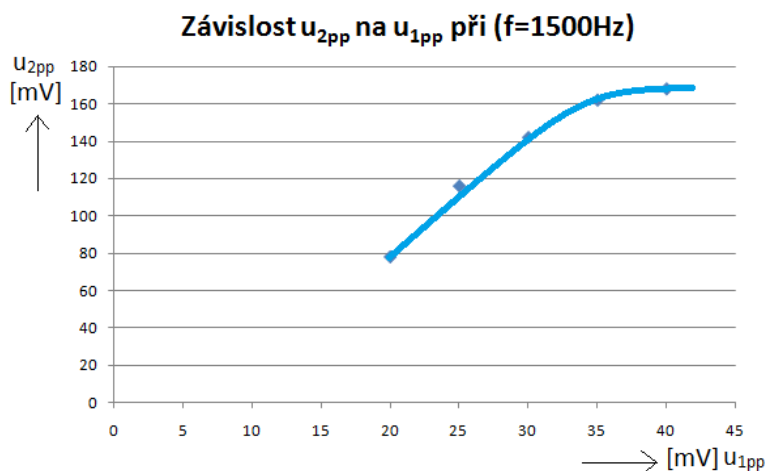


Obr. 24: Závislost rozkmitu výstupního napětí na rozkmitu vstupního napětí (300Hz)

Tabulka 4

Naměřené hodnoty (RC stavebnice)	
f = 1500Hz	
u_{1pp} [mV]	u_{2pp} [mV]
20	78
25	116
30	142
35	162
40	168

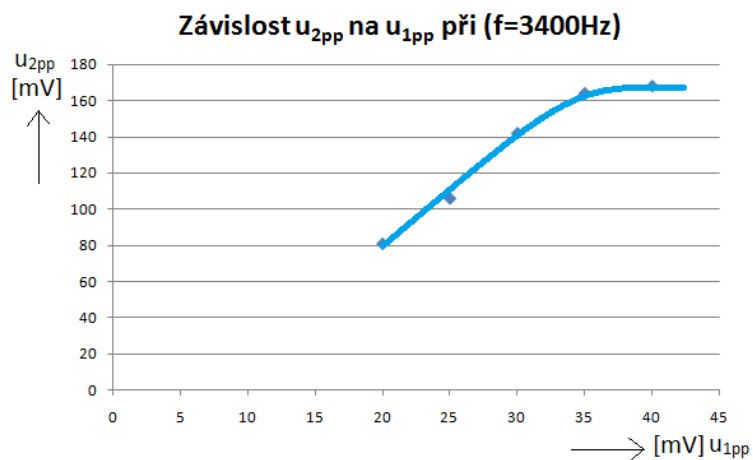
$$D = \frac{u_{1ppMAX}}{u_{1ppMIN}} = \frac{40}{20} = 2$$



Obr. 25: Závislost rozkmitu výstupního napětí na rozkmitu vstupního napětí (1500Hz)

Tabulka 5

Naměřené hodnoty (RC stavebnice)	
f = 3400Hz	
u_{1pp} [mV]	u_{2pp} [mV]
20	81
25	106
30	142
35	164
40	168



$$D = \frac{u_{1ppMAX}}{u_{1ppMIN}} = \frac{40}{20} = 2$$

Obr. 26: Závislost rozkmitu výstupního napětí na rozkmitu vstupního napětí (3400Hz)

Tabulka a graf pro amplitudovou frekvenční charakteristiku

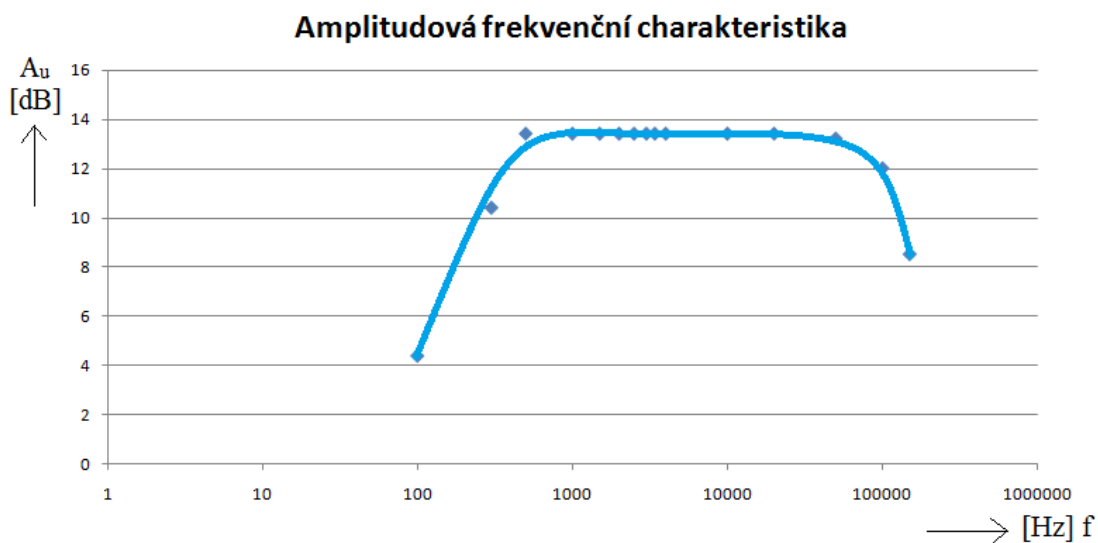
Tabulka 6

Naměřené hodnoty pro hovorové pásmo								
$u_{1pp} = 30 \text{ mV}$								
f[kHz]	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,4
u_{2pp} [mV]	100	140	140	140	140	140	140	140
A_u [dB]	10,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4

Příklad výpočtu:

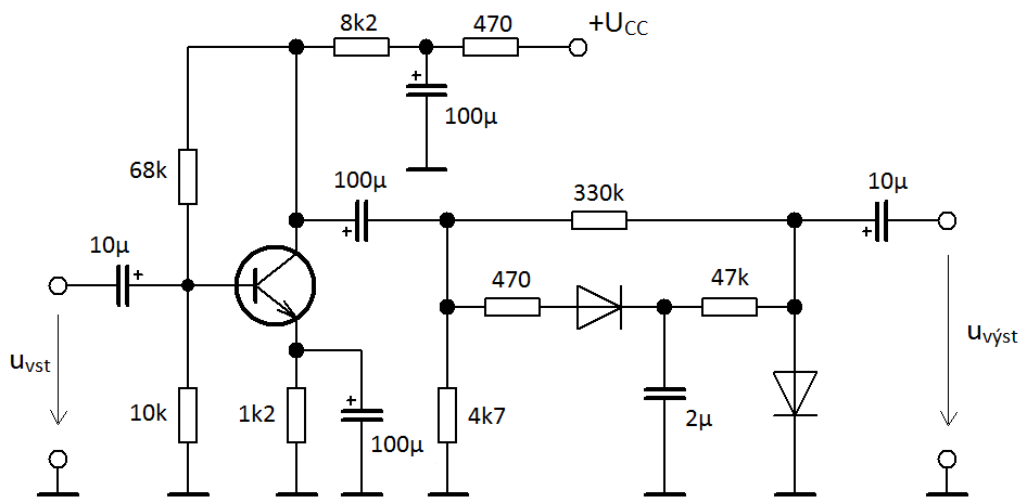
$$A_u = 20 \log \frac{u_2}{u_1}$$

$$A_u = 20 \log \frac{100}{30} = 10,4 \text{ dB}$$



Obr. 27: Amplitudová frekvenční charakteristika

10.2. Ověření pomocí programu Multisim 9



Obr. 28: Zapojení kompresoru dynamiky s hodnotami součástek pro Multisim 9

Seznam součástek podle označení na obr. 12

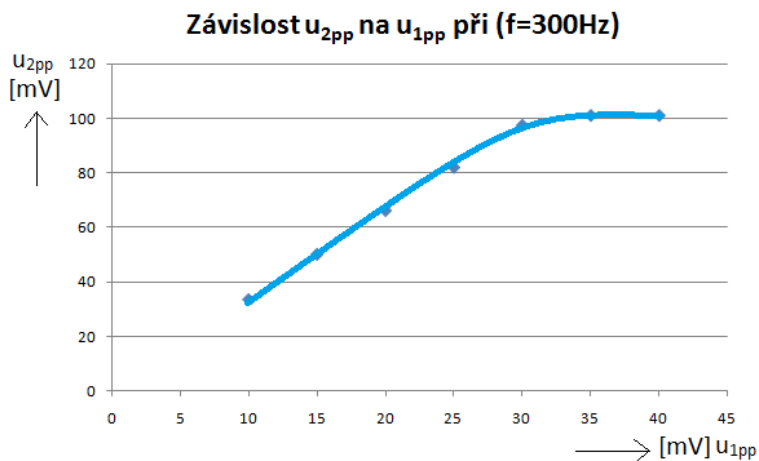
Tabulka 7

R ₁	68kΩ
R ₂	10kΩ
R ₃	1,2kΩ
R ₄	8,2kΩ
R ₅	470Ω
R ₆	330kΩ
R ₇	4,7kΩ
R ₈	470Ω
R ₉	47kΩ
C ₁ elektrolyt	10μF
C ₂ elektrolyt	100μF
C ₃ elektrolyt	100μF
C ₄ elektrolyt	100μF
C ₅	2μF
C ₆ elektrolyt	10μF
D ₁	BAT54
D ₂	BAT54
T ₁	BC547A

Tabulky a grafy pro závislost výstupního napětí na vstupním

Tabulka 8

Naměřené hodnoty (Multisim 9)	
f = 300Hz	
u _{1pp} [mV]	u _{2pp} [mV]
10	33,7
15	50,3
20	66,3
25	82,1
30	97,5
35	101,1
40	101,1



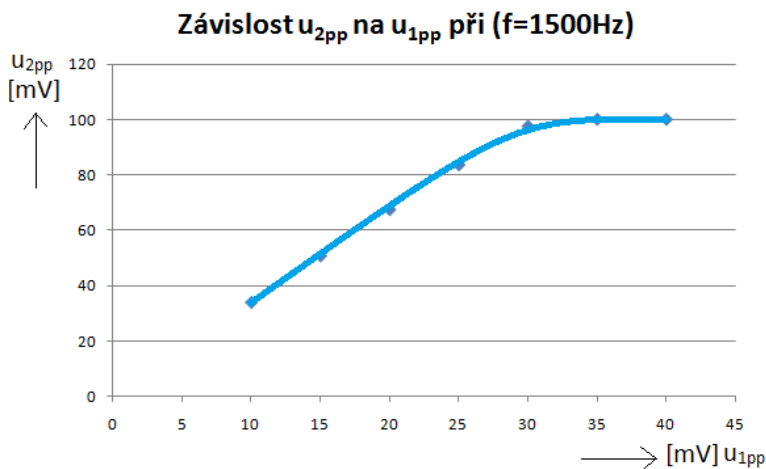
Obr. 29: Závislost rozkmitu výstupního napětí na rozkmitu vstupního napětí (300Hz)

$$D = \frac{u_{1ppMAX}}{u_{1ppMIN}} = \frac{40}{10} = 4$$

Tabulka 9

Naměřené hodnoty (Multisim 9)	
f = 1500Hz	
u_{1pp} [mV]	u_{2pp} [mV]
10	33,8
15	50,6
20	67,4
25	83,6
30	97,6
35	100,1
40	100,1

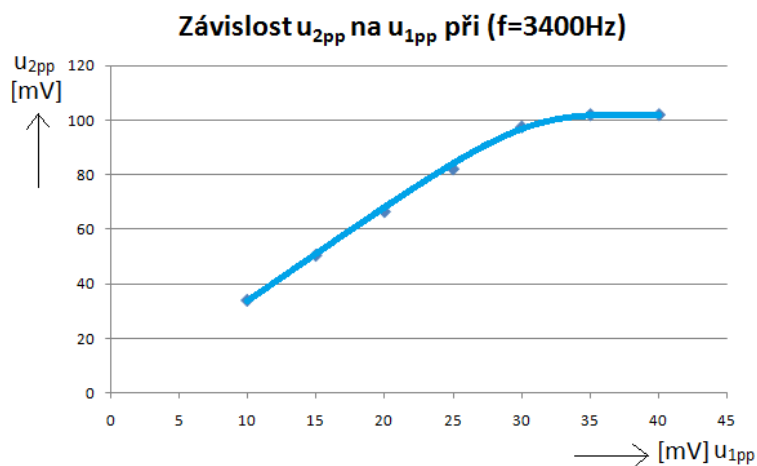
$$D = \frac{u_{1ppMAX}}{u_{1ppMIN}} = \frac{40}{10} = 4$$



Obr. 30: Závislost rozkmitu výstupního napětí na rozkmitu vstupního napětí (1500Hz)

Tabulka 10

Naměřené hodnoty (Multisim 9)	
f = 3400Hz	
u_{1pp} [mV]	u_{2pp} [mV]
10	33,8
15	50,4
20	66,5
25	82,2
30	97,7
35	102,2
40	102,2



Obr. 31: Závislost rozkmitu výstupního napětí na rozkmitu vstupního napětí (3400Hz)

$$D = \frac{u_{1ppMAX}}{u_{1ppMIN}} = \frac{40}{10} = 4$$

Tabulka a graf pro amplitudovou frekvenční charakteristiku

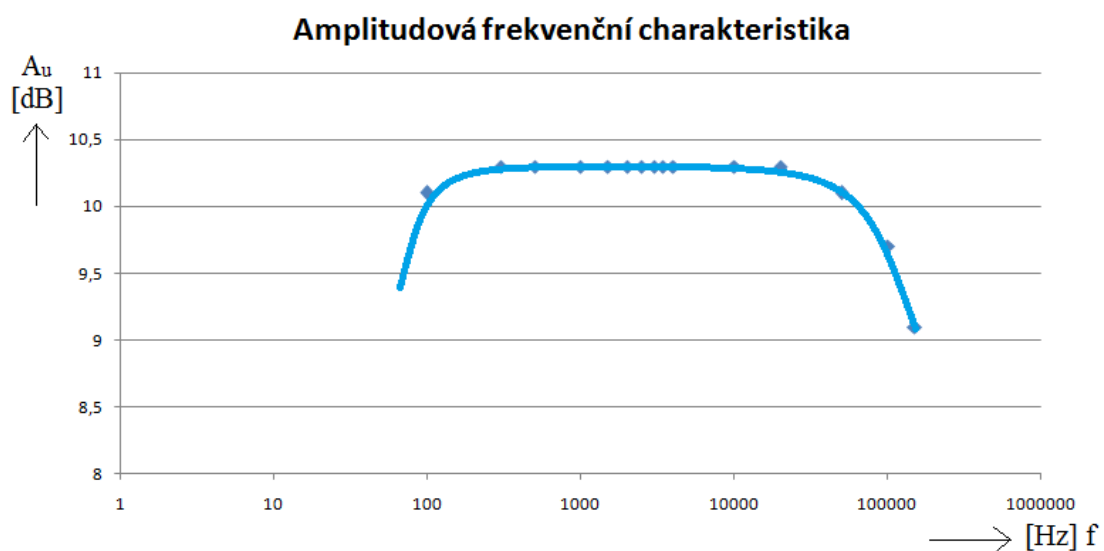
Tabulka 11

Naměřené hodnoty pro hovorové pásmo								
$u_{1pp} = 30 \text{ mV}$								
f[kHz]	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,4
u_{2pp} [mV]	97,4	97,7	97,6	97,6	97,6	97,6	97,6	97,6
A_u [dB]	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3

Příklad výpočtu:

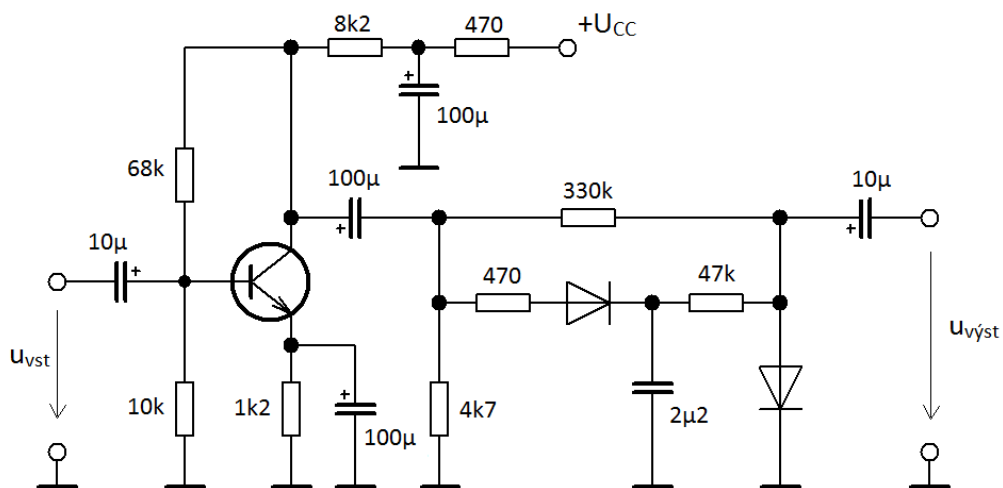
$$A_u = 20 \log \frac{u_2}{u_1}$$

$$A_u = 20 \log \frac{97,4}{30} = 10,3 \text{ dB}$$



Obr. 32: Amplitudová frekvenční charakteristika

10.3. Ověření pomocí nepájivého pole



Obr. 33: Zapojení kompresoru dynamiky s hodnotami součástek pro nepájivé pole

Seznam součástek podle označení na obr. 12

Tabulka 12

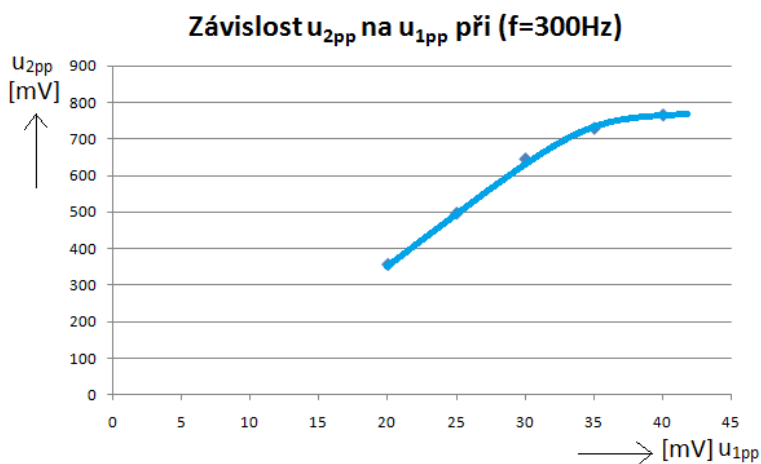
R ₁	68kΩ
R ₂	10kΩ
R ₃	1,2kΩ
R ₄	8,2kΩ
R ₅	470Ω
R ₆	330kΩ
R ₇	4,7kΩ
R ₈	470Ω
R ₉	47kΩ
C ₁ elektrolyt	10µF
C ₂ elektrolyt	100µF
C ₃ elektrolyt	100µF
C ₄ elektrolyt	100µF
C ₅	2,2 µF
C ₆ elektrolyt	10µF
D ₁	BAT48
D ₂	BAT48
T ₁	106NU70

Tabulky a grafy pro závislost výstupního napětí na vstupním

Tabulka 13

Naměřené hodnoty (Nepájivé pole)	
f = 300Hz	
u_{1pp} [mV]	u_{2pp} [mV]
20	356
25	496
30	644
35	728
40	764

$$D = \frac{u_{1ppMAX}}{u_{1ppMIN}} = \frac{40}{20} = 2$$

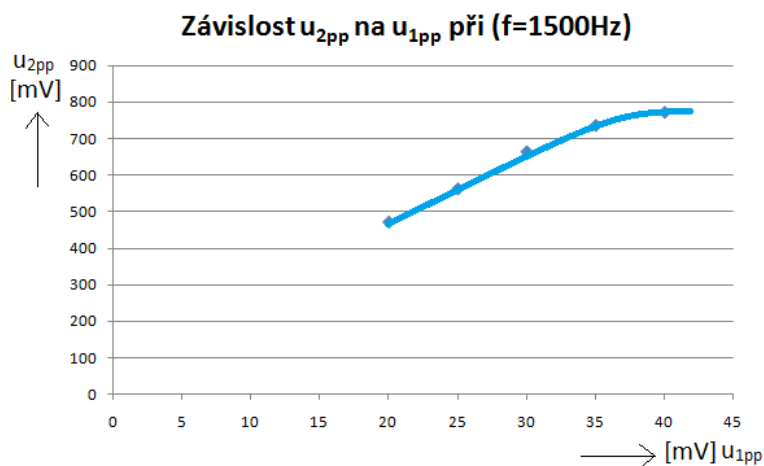


Obr. 34: Závislost rozkmitu výstupního napětí na rozkmitu vstupního napětí (300Hz)

Tabulka 14

Naměřené hodnoty (Nepájivé pole)	
f = 1500Hz	
u_{1pp} [mV]	u_{2pp} [mV]
20	471
25	562
30	664
35	736
40	772

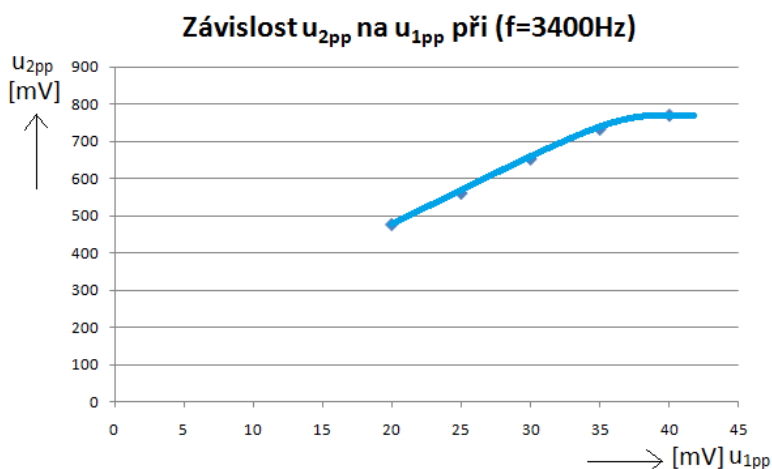
$$D = \frac{u_{1ppMAX}}{u_{1ppMIN}} = \frac{40}{20} = 2$$



Obr. 35: Závislost rozkmitu výstupního napětí na rozkmitu vstupního napětí (1500Hz)

Tabulka 15

Naměřené hodnoty (Nepájivé pole)	
f = 3400Hz	
u _{1pp}	u _{2pp}
[mV]	[mV]
20	476
25	560
30	652
35	732
40	769



$$D = \frac{u_{1ppMAX}}{u_{1ppMIN}} = \frac{40}{20} = 2$$

Obr. 36: Závislost rozkmitu výstupního napětí na rozkmitu vstupního napětí (3400Hz)

Tabulka a graf pro amplitudovou frekvenční charakteristiku

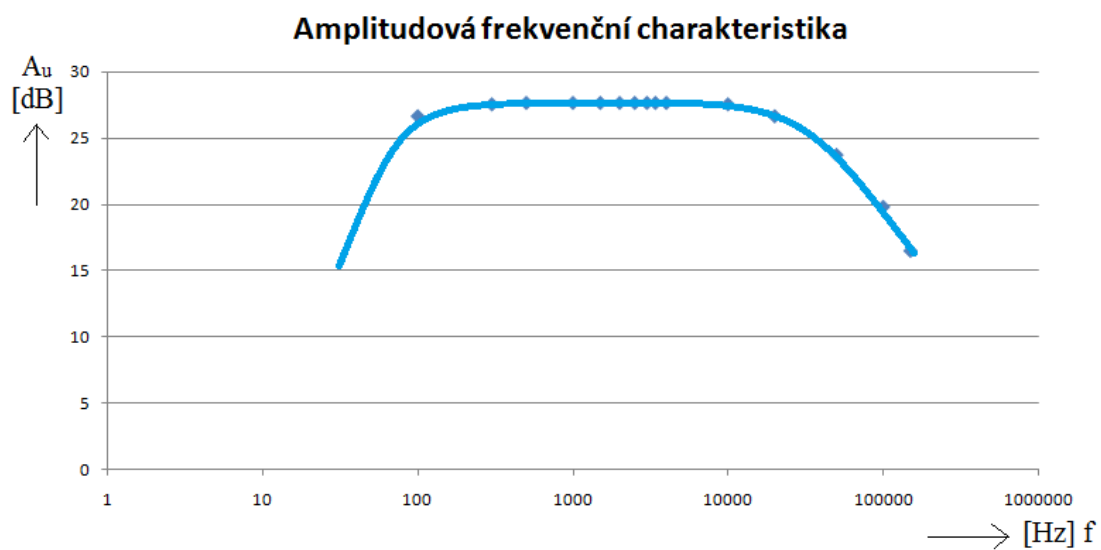
Tabulka 16

Naměřené hodnoty pro hovorové pásmo								
u _{1pp} = 30 mV								
f [kHz]	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,4
u _{2pp} [mV]	704	712	712	712	712	712	712	712
A _u [dB]	27,5	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6

Příklad výpočtu:

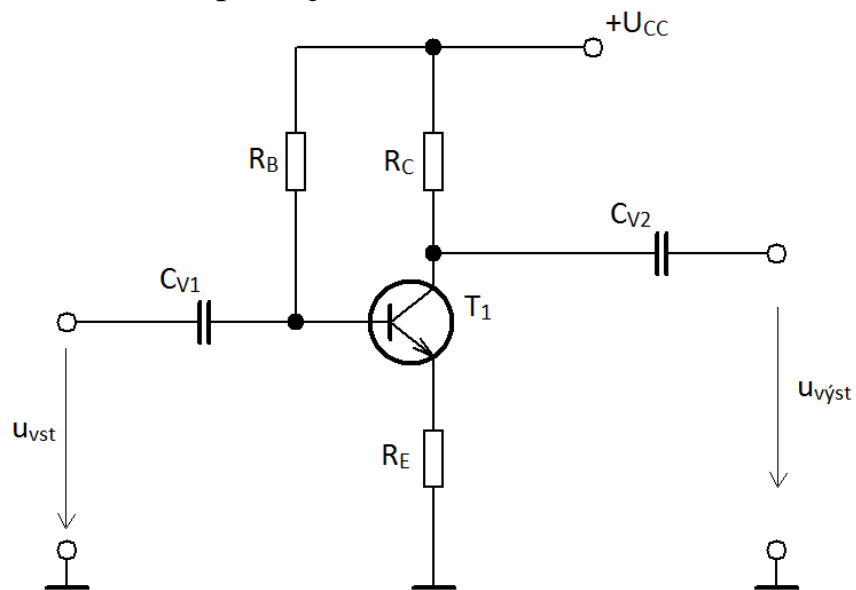
$$A_u = 20 \log \frac{u_2}{u_1}$$

$$A_u = 20 \log \frac{704}{30} = 27,5 \text{ dB}$$



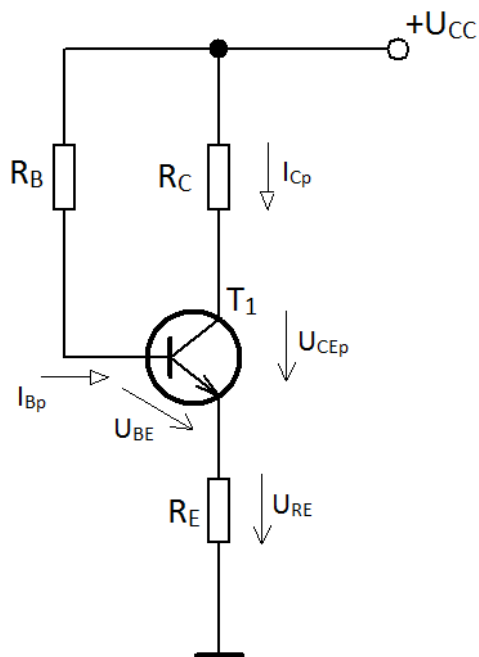
Obr. 37: Amplitudová frekvenční charakteristika

11. Návrh zesilovače pracujícího ve třídě A



Obr. 38: Schéma zesilovače

Zvolené parametry: $A_U = 10$
 $h_{21e} = 200$
 $f_d = 50\text{Hz}$
 $I_{Cp} = 1\text{mA}$
 $U_{CC} = +12\text{V}$
 $R_Z = 50\text{k}\Omega$



Obr. 39: Stejnsměrný model pro nastavení pracovního bodu

$$U_{CEp} = \frac{1}{2} \times U_{CC}$$

$$U_{CEp} = \frac{1}{2} \times 12 = 6\text{V}$$

$$A_U \approx \frac{R_C}{R_E} \Rightarrow$$

$$\frac{R_C}{R_E} = 10 \Rightarrow R_E = \frac{R_C}{10}$$

$$I_{Cp} \times (R_E + R_C) = -U_{CEp} + U_{CC}$$

$$R_E + R_C = \frac{U_{CC} - U_{CEp}}{I_{Cp}}$$

$$R_C \times \left(\frac{1}{10} + 1\right) = \frac{U_{CC} - U_{CEp}}{I_{Cp}}$$

$$R_C = \frac{12-6}{1,1 \times 10^{-3}} = 5,45 \times 10^3 \Omega \quad \text{volíme rezistor } 5k6$$

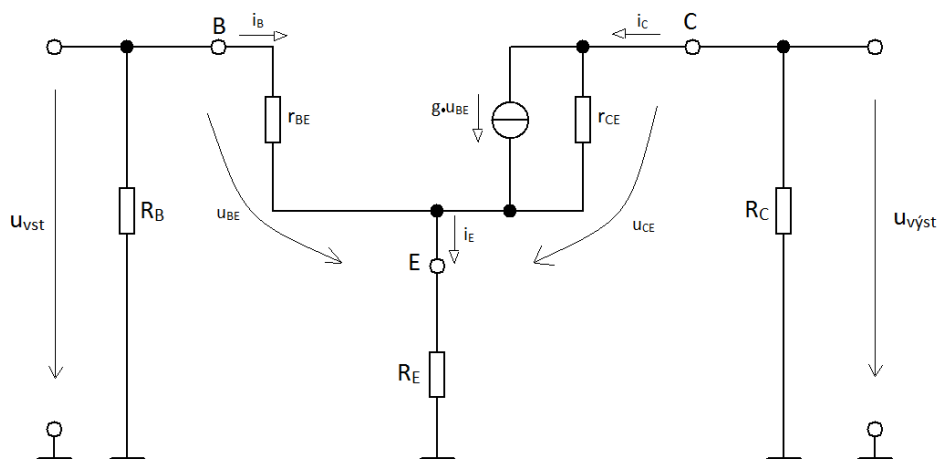
$$R_E = \frac{R_C}{10} \Rightarrow R_E = 560 \Omega$$

$$R_{celk} = \frac{R_C \times R_Z}{R_C + R_Z} \Rightarrow R_{celk} \approx R_C$$

$$I_{Bp} = \frac{I_{Cp}}{h_{21e}} \Rightarrow I_{Bp} = \frac{1 \times 10^{-3}}{200} = 5 \mu A$$

$$R_B = \frac{U_{CC} - U_{BE} - R_E \times I_E}{I_{Bp}} \quad h_{21e} \gg 1 \Rightarrow I_E \approx I_C$$

$$R_B = \frac{U_{CC} - U_{BE} - R_E \times I_{Cp}}{I_{Bp}} = \frac{12 - 0,7 - 560 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-6}} = 2,148 \times 10^6 \quad \text{volíme rezistor } 2M2$$



Obr. 40: Střídavý model RS

$$h_{21e} \approx h_{21E}$$

$$g = \frac{I_{Cp}}{m \times U_T} = \frac{1 \times 10^{-3}}{2 \times 25 \times 10^{-3}} = 0,02 \text{ A/V}$$

$$r_{BE} = \frac{h_{21e}}{g} = \frac{200}{0,02} = 10k\Omega$$

$$r_{CE} = \frac{U_{EA}}{I_{Cp}} = \frac{80}{1 \times 10^{-3}} = 80k\Omega$$

$$r_{CE} \gg R_{celk}$$

$$r_{vst} = \frac{u_1}{i_1}$$

$$r_{vst} = \frac{R_B \times r'_{vst}}{R_B + r'_{vst}}$$

$$r'_{vst} = \frac{u_1}{i_B}$$

$$r'_{vst} = r_{BE} + R_E \times h_{21e}$$

$$R_E \times h_{21e} \gg r_{BE} \Rightarrow r'_{vst} \approx R_E \times h_{21e} = 112k\Omega$$

$$R_B \gg r'_{vst} \Rightarrow r_{vst} \approx r'_{vst} = 112k\Omega$$

$$r_{výst} = \frac{u_{20}}{i_{2K}}$$

$$r'_{výst} = r_{CE} \times \left(1 + \frac{h_{21e} \times R_E}{r_{BE} + R_E}\right)$$

$$r'_{výst} \approx r_{CE} \times h_{21e}$$

$$r_{výst} = \frac{R_C \times r'_{výst}}{R_C + r'_{výst}}$$

$$r'_{výst} \gg R_C \Rightarrow r_{výst} \approx R_C$$

Stanovení kondenzátorů:

$$f_d^2 \approx f_{dcv1}^2 + f_{dcv2}^2 = 2 \times f_{dred}^2$$

$$f_{dcv1} = f_{dcv2} = f_{dred}$$

$$f_{dred}^2 = \frac{f_d^2}{2}$$

$$f_{dred} = \frac{f_d}{\sqrt{2}} = \frac{50}{\sqrt{2}} = 35Hz$$

$$f_{dcv1} = \frac{1}{2 \times \pi \times C_{V1} \times r_{vst}} \Rightarrow C_{V1} = \frac{1}{2 \times \pi \times f_{dcv1} \times r_{vst}}$$

$$C_{V1} = \frac{1}{2 \times \pi \times 35 \times 112 \times 10^3} = 40,6nF \text{ volíme kondenzátor } 47nF$$

$$f_{dcv2} = \frac{1}{2 \times \pi \times C_{V2} \times (r_{výst} + R_Z)} \Rightarrow C_{V2} = \frac{1}{2 \times \pi \times f_{dcv2} \times (r_{výst} + R_Z)}$$

$$C_{V2} = \frac{1}{2 \times \pi \times 35 \times 55,6 \times 10^3} = 81,78nF \text{ volíme kondenzátor } 82nF$$

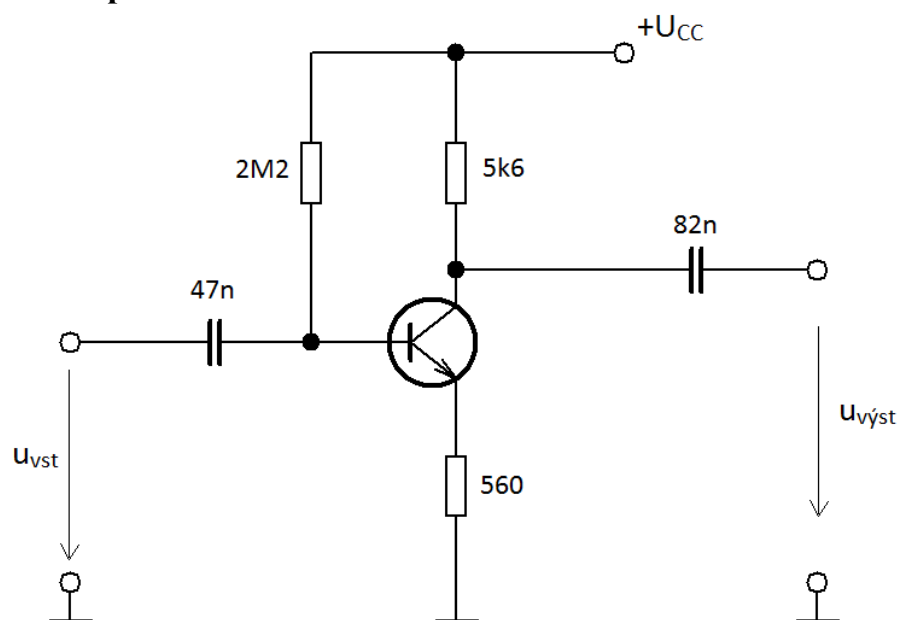
Seznam součástek podle označení na obr. 38

Tabulka 17

R_B	2,2M Ω
R_C	5,6k Ω
R_E	560 Ω
C_{V1}	47nF
C_{V2}	82nF
T_1	CB547A

12. Ověření vlastností zesilovače pracujícího ve třídě A

12.1. Ověření pomocí RC stavebnice



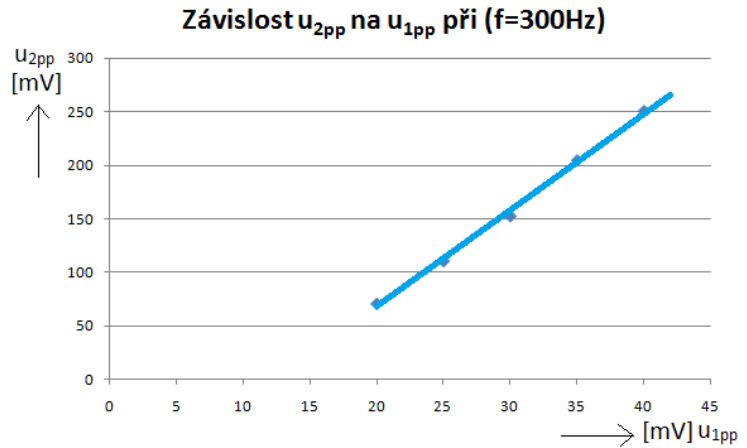
Obr. 41: Zapojení zesilovače ve třídě A se součástkami

Tabulky a grafy pro závislost výstupního napětí na vstupním

Tabulka 18

Naměřené hodnoty (RC stavebnice)	
f = 300Hz	
u_{1pp} [mV]	u_{2pp} [mV]
20	70
25	110
30	152
35	204
40	250

$$D = \frac{u_{1ppMAX}}{u_{1ppMIN}} = \frac{900}{20} = 45$$

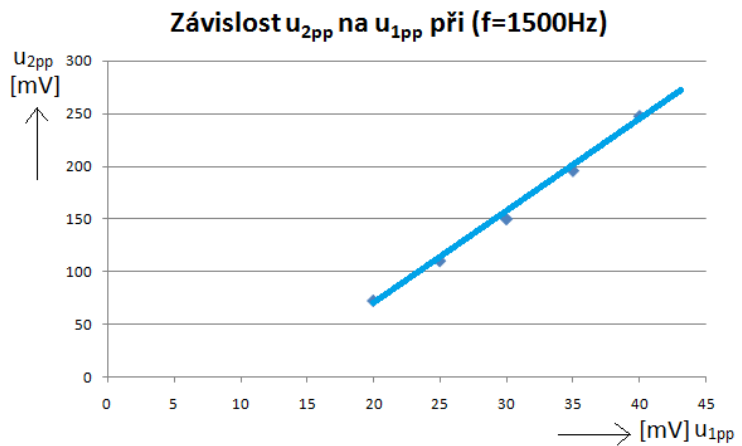


Obr. 42: Závislost rozkmitu výstupního napětí na rozkmitu vstupního napětí (300Hz)

Tabulka 19

Naměřené hodnoty (RC stavebnice)	
f = 1500Hz	
u_{1pp} [mV]	u_{2pp} [mV]
20	72
25	110
30	150
35	196
40	248

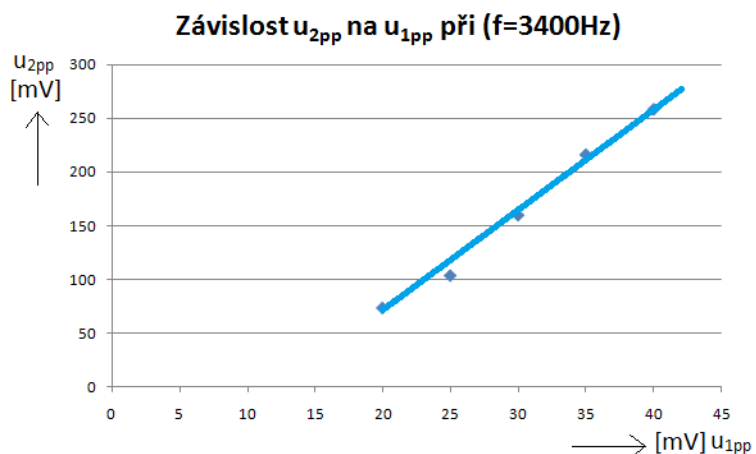
$$D = \frac{u_{1ppMAX}}{u_{1ppMIN}} = \frac{900}{20} = 45$$



Obr. 43: Závislost rozkmitu výstupního napětí na rozkmitu vstupního napětí (1500Hz)

Tabulka 20

Naměřené hodnoty (RC stavebnice)	
f = 3400Hz	
u _{1pp}	u _{2pp}
[mV]	[mV]
20	74
25	104
30	160
35	216
40	258



$$D = \frac{u_{1ppMAX}}{u_{1ppMIN}} = \frac{900}{20} = 45$$

Obr. 44: Závislost rozkmitu výstupního napětí na rozkmitu vstupního napětí (3400Hz)

Tabulka a graf pro amplitudovou frekvenční charakteristiku

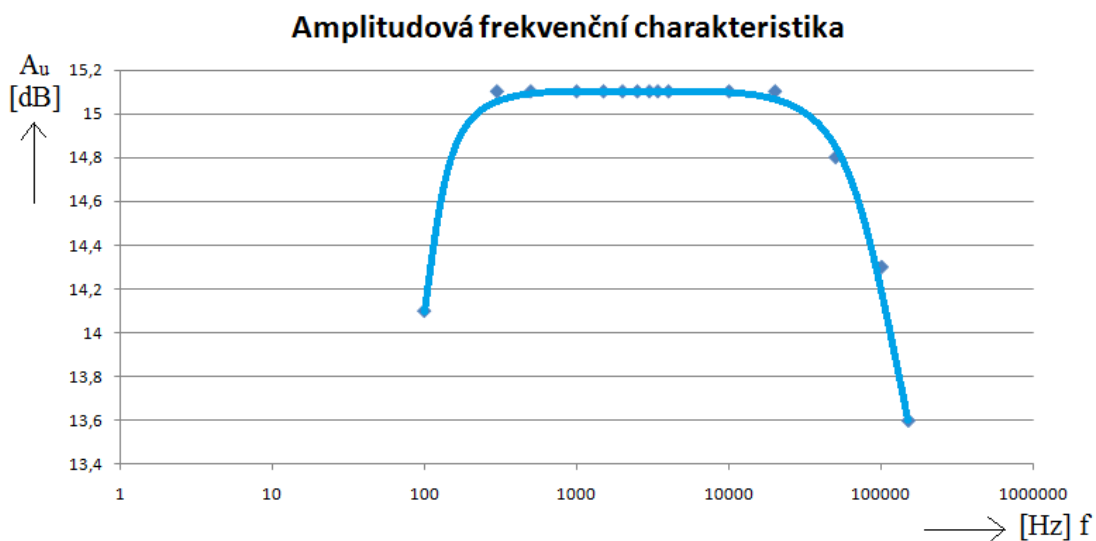
Tabulka 21

Naměřené hodnoty pro hovorové pásmo								
u _{1pp} = 30 mV								
f[kHz]	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,4
u _{2pp} [mV]	170	170	170	170	170	170	170	170
A _u [dB]	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1

Příklad výpočtu:

$$A_u = 20 \log \frac{u_2}{u_1}$$

$$A_u = 20 \log \frac{170}{30} = 15,1 \text{ dB}$$



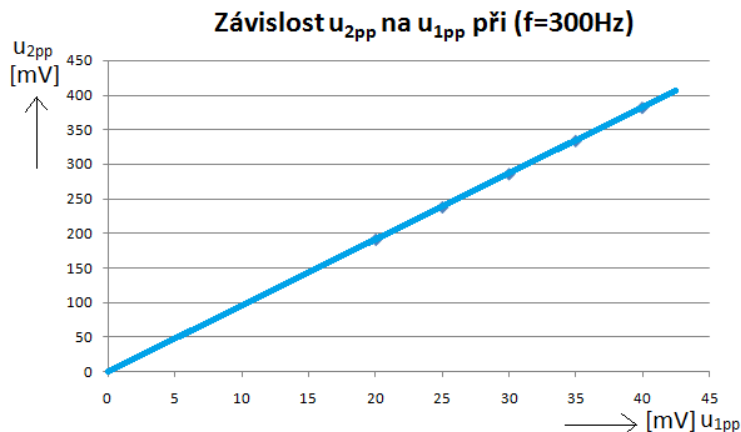
Obr. 45: Amplitudová frekvenční charakteristika

12.2. Ověření pomocí programu Multisim 9

Tabulky a grafy pro závislost výstupního napětí na vstupním

Tabulka 22

Naměřené hodnoty (Multisim 9)	
f = 300Hz	
u _{1pp} [mV]	u _{2pp} [mV]
20	191
25	238
30	286
35	334
40	382



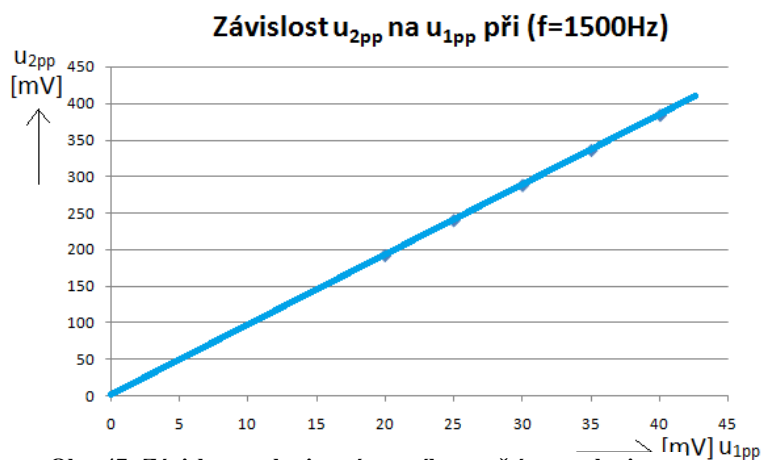
Obr. 46: Závislost rozkmitu výstupního napětí na rozkmitu vstupního napětí (300Hz)

$$D = \frac{u_{1ppMAX}}{u_{1ppMIN}} = \frac{900}{20} = 45$$

Tabulka 23

Naměřené hodnoty (Multisim 9)	
f = 1500Hz	
u_{1pp} [mV]	u_{2pp} [mV]
20	191
25	239
30	287
35	335
40	383

$$D = \frac{u_{1ppMAX}}{u_{1ppMIN}} = \frac{900}{20} = 45$$

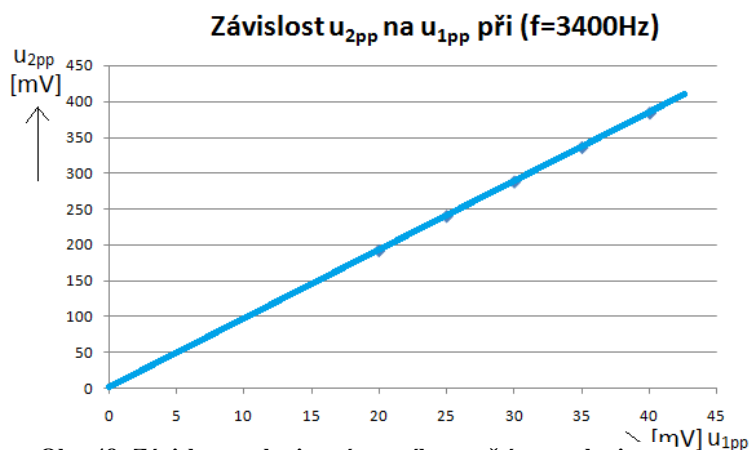


Obr. 47: Závislost rozkmitu výstupního napětí na rozkmitu vstupního napětí (1500Hz)

Tabulka 24

Naměřené hodnoty (Multisim 9)	
f = 3400Hz	
u_{1pp} [mV]	u_{2pp} [mV]
20	191
25	239
30	287
35	335
40	383

$$D = \frac{u_{1ppMAX}}{u_{1ppMIN}} = \frac{900}{20} = 45$$



Obr. 48: Závislost rozkmitu výstupního napětí na rozkmitu vstupního napětí (3400Hz)

Tabulka a graf pro amplitudovou frekvenční charakteristiku

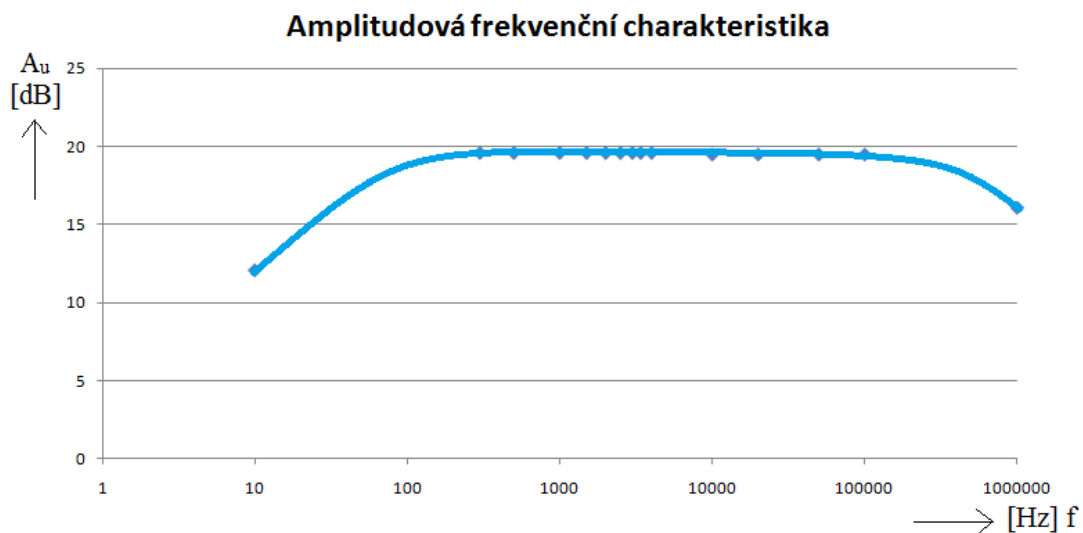
Tabulka 25

Naměřené hodnoty pro hovorové pásmo								
$u_{1pp} = 30 \text{ mV}$								
f [kHz]	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,4
u_{2pp} [mV]	286	287	287	287	287	287	287	287
A_u [dB]	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6

Příklad výpočtu:

$$A_u = 20 \log \frac{u_2}{u_1}$$

$$A_u = 20 \log \frac{286}{30} = 19,6 \text{ dB}$$



Obr. 49: Amplitudová frekvenční charakteristika

13. Závěr

Mým úkolem bylo navrhnout zesilovač s kompresorem dynamiky a měřením ověřit jeho funkčnost a vlastnosti. Tyto vlastnosti jsem poté porovnal s vlastnostmi mnou navrženého klasického zesilovače pracujícího ve třídě A. Zatímco u zesilovače ve třídě A je závislost výstupního napětí na vstupním lineárně rostoucí, což znamená, že zesilovač zesiluje lineárně, tak u kompresoru dynamiky je průběh závislosti výstupního napětí na vstupním z počátku také lineární jako u zesilovače ve třídě A, ale od určité hodnoty rozkmitu vstupního napětí (v mém případě to byla hodnota 35mV) se začne uplatňovat komprese a rozkmit výstupního napětí zůstává konstantní i při dalším zvyšování rozkmitu vstupního napětí. Dále jsem také ověřil, že kompresor dynamiky zmenšuje dynamický rozsah vstupního signálu na rozdíl od klasického zesilovače pracujícího ve třídě A. Dynamický rozsah kompresoru dynamiky se pohyboval v řádu jednotek a u zesilovače ve třídě A se pohyboval v řádu desítek až stovek. Z amplitudové frekvenční charakteristiky jsem zjistil, že zesilovač s kompresorem dynamiky má v hovorovém pásmu téměř konstantní napěťové zesílení a toto zesílení se nemění i za hranicí hovorového pásma, takže se zesilovač s kompresorem dynamiky může využívat i za tímto pásmem. Amplitudová frekvenční charakteristika zesilovače pracujícího ve třídě A byla téměř stejná jako u kompresoru dynamiky, takže v této oblasti se oba zesilovače příliš nelišily. Hlavním rozdílem tedy je dynamický rozsah vstupního signálu obou zesilovačů a to, že zesilovač ve třídě A zesiluje lineárně na rozdíl od zesilovače s kompresorem, kde se od určité hodnoty vstupního signálu uplatní komprese.

Seznam použité literatury

- [1] DOLEČEK, J. *Moderní učebnice elektroniky díl IV*. 1. vydání. Praha: BEN, 2006.
- [2] ŠTÁL, P. *Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D*. 1. vydání. Praha: BEN, 2008.
- [3] ČERMÁK, J. JURKOVIČ, K. *Návrh a konstrukce nízkofrekvenčních tranzistorových zesilovačů*. 2. vydání. Praha: SNTL, 1974.
- [4] BUDÍNSKÝ, J. *Nízkofrekvenční tranzistorové zesilovače*. 3. vydání. Praha: SNTL, 1964.
- [5] VOBECKÝ, J. ZÁHLAVA, V. *Elektronika : Součástky a obvody, principy a příklady*. 3. rozšířené vydání.
- [6] ČERMÁK, J. NAVRÁTIL, J. *Tranzistorová technika*. 1. vydání. Praha : SNTL, 1967.

Seznam příloh

Příloha č. I. – Kompletní tabulky pro amplitudové frekvenční charakteristiky

Příloha č. II. – Ukázky praktických zapojení zesilovače s kompresorem dynamiky