


Měření šumu nízkofrekvenčních tranzistorů

Martin Moštěk

Bakalářská práce
2021

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin Moštěk**
Osobní číslo: **A17061**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Měření šumu bipolárních tranzistorů**
Téma práce anglicky: **The Measurement of the Noise of Bipolar Junction Transistors**

Zásady pro vypracování

1. Nastudujte si problematiku šumu bipolárních tranzistorů.
2. Seznamte se s vektorovým obvodovým analyzátozem Bode 100.
3. Navrhněte přípravek pro měření šumu tranzistorů při různých nastaveních jejich pracovního bodu.
4. Ověřte funkčnost přípravku v praxi pomocí vektorového obvodového analyzátoru Bode 100.
5. Zhodnotte dosažené výsledky.

Forma zpracování bakalářské práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady*. 3., rozš. vyd. Praha: Grada Publishing, 2005. ISBN 978-80-247-1241-3.
2. ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN – technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
3. BARTUŠEK, Karel. *Měření v elektrotechnice*. 2., přeprac. a dopl. vyd. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-8021441606.
4. SELF, Douglas. *Small signal audio design*. Second edition. New York: Focal Press, Taylor & Franics Group, 2015. ISBN 978-0415709736.
5. MOTCHENBACHER, C. D., J. A. CONNELLY a C. D. MOTCHENBACHER. *Low-noise electronic system design*. New York: Wiley, c1993. ISBN 978-0471577423.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Pospíšilík, Ph.D.**
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2021**

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D. v.r.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 15. ledna 2021

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 13.5.2021

Martin Moštěk, v.r.
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Cílem této práce je navrhnout přípravek pro měření šumu nízkofrekvenčních bipolárních tranzistorů a následně ověřit jeho funkčnost pomocí programu Bode 100.

Výrobek je rozdělen do dvou částí a to základní desky a modulů. Základní deska obsahuje napájecí část přípravku a operační zesilovač s výstupem na konektor BNC pro měření hodnot pomocí programu Bode 100 a konektor Jack k poslechu daného šumu. Moduly obsahují tranzistorový zesilovač a patici, která umožňuje snadnou výměnu tranzistorů.

Klíčová slova: Deska plošných spojů, DPS, Nízkofrekvenční tranzistor, Nízkofrekvenční BJT, Šum, Měření šumu

ABSTRACT

The goal of this thesis is to design a device for measurement of noise in low-noise BJT and verify its functionality with program Bode 100.

The device contains two parts, motherboard and modules. Motherboard contains power supply and amplifier with BNC output for measurement in program Bode 100 and jack connector for listening of the noise. Modules contain transistor amplifier with a socket for easy exchange of transistors.

Keywords: keywords: Printed circuit board, PCB, Low-noise transistor, Low-noise BJT, Noise, Noise measurment

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce, panu Ing. Martinu Pospíšilíkovi, Ph.D., za trpělivost a odborné rady při návrhu zařízení a vypracování práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

| | | |
|------------|--|-----------|
| I | TEORETICKÁ ČÁST | 10 |
| 1 | TRANZISTORY | 11 |
| 1.1 | OBEČNÁ CHARAKTERIZACE | 11 |
| 1.2 | ROZDĚLENÍ TRANZISTORŮ | 11 |
| 2 | OPERAČNÍ ZESILOVAČE | 14 |
| 2.1 | INVERTUJÍCÍ ZAPOJENÍ | 14 |
| 2.2 | NEINVERTUJÍCÍ ZAPOJENÍ | 15 |
| 2.3 | SLEDOVAČ NAPĚTÍ | 15 |
| 2.4 | DIFERENČNÍ ZESILOVAČ | 16 |
| 2.5 | SUMAČNÍ ZESILOVAČ | 17 |
| 2.6 | KOMPARÁTOR | 17 |
| 3 | ŠUM | 18 |
| 3.1 | DEFINICE ŠUMU | 18 |
| 3.2 | BARVY ŠUMU | 18 |
| 3.3 | JOHNSONŮV (TEPELNÝ) ŠUM | 20 |
| 3.4 | VÝSTŘELOVÝ ŠUM | 21 |
| 3.5 | BLIKAVÝ ŠUM | 21 |
| II | PRAKTICKÁ ČÁST | 22 |
| 4 | MODULY | 23 |
| 4.1 | VÝPOČET HODNOT MODULU | 24 |
| 4.2 | REALIZACE MODULŮ | 33 |
| 5 | ZÁKLADNÍ DESKA | 35 |
| 5.1 | POŽADAVKY NA ZÁKLADNÍ DESKU | 35 |
| 5.2 | SCHÉMA ZÁKLADNÍ DESKY | 36 |
| 5.3 | DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ ZÁKLADNÍ DESKY | 39 |
| 6 | MĚŘENÍ DAT | 40 |
| 6.1 | OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI | 40 |
| 6.2 | MĚŘENÍ VEKTOROVÝM ANALYZÁTOREM BODE 100 | 41 |
| | ZÁVĚR | 43 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 44 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 45 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 46 |
| | SEZNAM TABULEK | 47 |

| | |
|---------------------------|-----------|
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 48 |
|---------------------------|-----------|

ÚVOD

Tématem této bakalářské práce je návrh a realizace přípravku pro měření šumu nízkofrekvenčních tranzistorů. Tento prostředek je určen pro měření v rozsahu 40 Hz až 10 kHz a to pro devět různých nastavení pracovního bodu tranzistoru. Pro zjednodušení a přesnost nastavení pracovního bodu bude vyrobeno devět modulů pro hodnoty napětí 5 V, 10 V, 15 V a pro hodnoty proudu 200 μA , 500 μA a 1000 μA .

Práce je rozdělena na tři části a to na část teoretickou, na část praktickou a na část závěrečnou pro shrnutí dosažených výsledků.

V první, teoretické části, je rozebrán princip bipolárních tranzistorů a příčiny vzniku šumu v bipolárních tranzistorech.

Ve druhé, praktické části, jsou provedeny návrhy, realizace jednotlivých částí přípravku, provedeny podrobné výpočty pracovních bodů. Dále zde jsou zahrnuty výsledky provedených měření a poznatky k funkčnosti přípravku.

Třetí částí je závěr, který shrnuje všechny dosažené výsledky a poznatky dosažené v této práci.

Výsledkem této bakalářské práce je přípravek, který umožní snadné měření šumu nízkofrekvenčních tranzistorů s možností poslechu za pomoci sluchátek. Dále také vyhodnocení naměřených dat a porovnání měřených tranzistorů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TRANZISTORY

1.1 Obecná charakterizace

Tranzistory jsou polovodičové součástky, které se skládají z (alespoň) dvou PN přechodů. Zjednodušeně se dají nazvat spojením dvou polovodičových diod v jedné součástce, avšak takové zapojení nedokáže většinu funkcí tranzistoru zastoupit.

Základní vlastností tranzistorů je jejich schopnost pracovat jako vodič nebo izolant a to za pomoci malého napětí. Vlastnost přechodu mezi těmito stavy umožňuje tranzistoru pracovat jako spínač, nebo jako zesilovač.

1.2 Rozdělení tranzistorů

Dle způsobu činnosti lze tranzistory rozdělit na:

Bipolární (BJT) - s injekcí - využívající jak majoritní, tak minoritní nosiče náboje

Unipolární – řízené polem - využívající pouze majoritní nosiče náboje

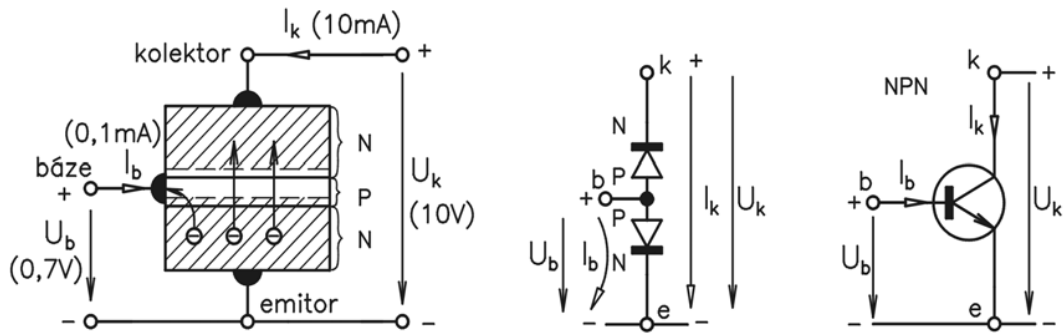
IGBT (Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem) - kombinace unipolárního a bipolárního tranzistoru

1.2.1 Bipolární tranzistory

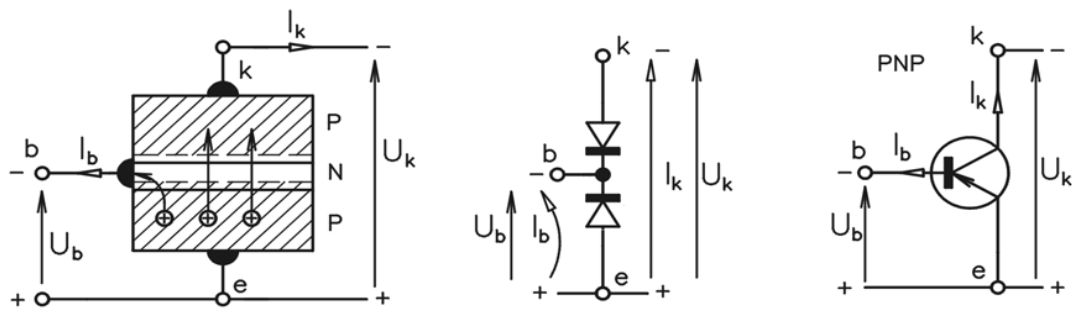
Pojem bipolární znamená, že na přenosu náboje tranzistorem se podílí majoritní, ale i minoritní nosiče náboje (elektrony i díry).

BJT se skládají ze tří elektrod, báze (B), kolektor (C) a emitor (E). Bipolární tranzistory pracují na principu vstřikování minoritních nosičů do báze. Jsou to zařízení ovládané proudem, kdy aplikace malého proudu na bázi způsobí tok většího proudu kolektorem. Jejich funkce je založena na principu spojení dvou PN přechodů, díky čemuž vznikají dvě možnosti

zapojení: NPN (obr.1) a PNP (obr.2). Tato zapojení jsou si rovna, jediným rozdílem je polarita napájecího napětí a směr toku proudu.



Obrázek 1 Schéma zapojení, bipolárního tranzistoru NPN, jeho struktura a vnitřní zapojení [2]

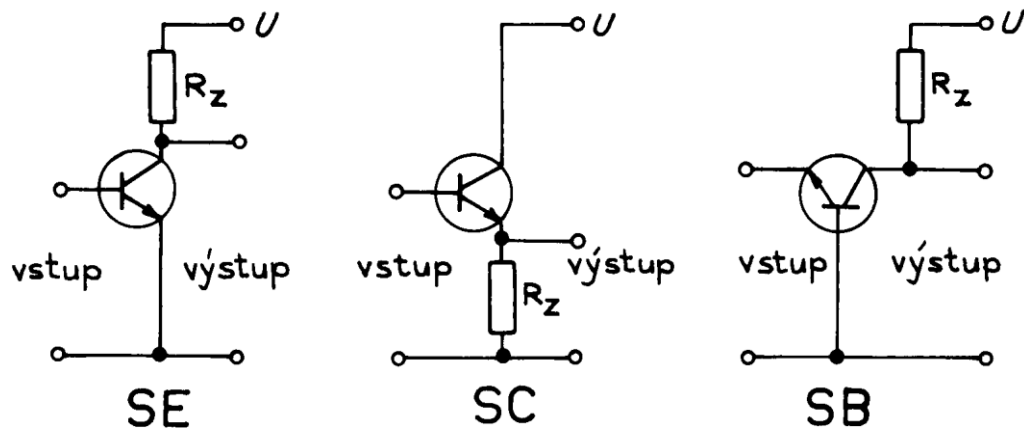


Obrázek 2 Schéma zapojení, bipolárního tranzistoru PNP, jeho struktura a vnitřní zapojení [2]

Podle počtu elektrod je tranzistor trojpólem. V aplikacích je však vždy jedna z elektrod určena jak pro vstup, tak pro výstup, takže lze tranzistor uvažovat jako čtyřpól. [4]

Dle toho, která z elektrod je využita pro vstup i výstup, vznikají tři možné zapojení:

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



Obrázek 3 Základní zapojení tranzistorů [4]

Jedním z nejzákladnějších parametrů bipolárních tranzistorů jsou proudové zesilovací činitele α a β . Proudový zesilovací činitel α se využívá pro zapojení SB, činitel β se využívá pro zapojení SE a SC. Velikost těchto činitelů je závislá na nastavení pracovního bodu tranzistoru.

Bipolárním tranzistorem protékají tři různé proudy:

I_E – proud protékající emitorem

I_C – proud protékající kolektorem

I_B – proud protékající bází

Činitel α je definován jako:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad (1)$$

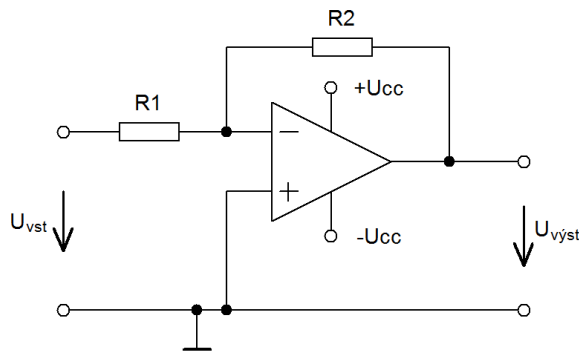
Činitel β je definován jako:

$$\beta = \frac{I_E}{I_B} \quad (2)$$

2 OPERAČNÍ ZESILOVAČE

Operační zesilovače jsou polovodičové součástky, jejichž vlastnosti se blíží vlastnostem ideálního zesilovače. Těchto hodnot však dosáhnout nelze.

2.1 Invertující zapojení



Obrázek 4 Operační zesilovač, invertující zapojení

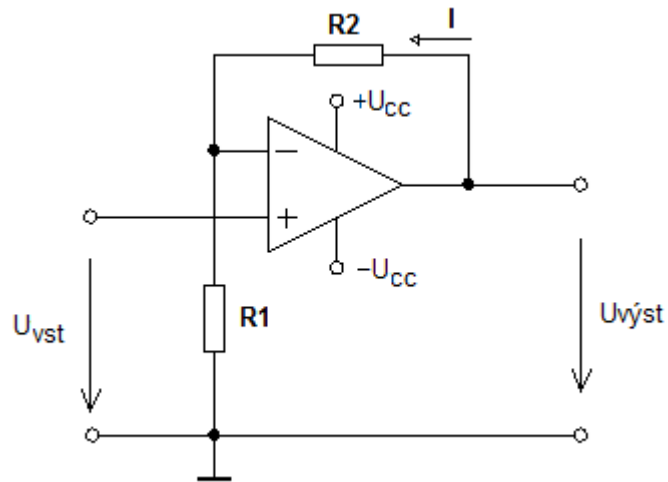
Operační zesilovače mají velmi velké napěťové zesílení A_U . V běžných praktických aplikacích se však požadují daleko nižší hodnoty. Omezení napěťového zesílení operačního zesilovače je realizováno pomocí zpětnovazebního rezistoru R_2 .

Vstupní impedance zesilovače je dána vstupním odporem R_1

Vstupní napětí je přivedeno přes rezistor R_1 na invertující vstup operačního zesilovače. Ten toto napětí zesílí a na jeho výstupu se tedy objeví zesílené vstupní napětí, avšak s opačnou polaritou. Toto výstupní napětí je přes rezistor R_2 rovněž přivedeno na invertující vstup operačního zesilovače, a protože má opačnou polaritu, zmenšuje napětí na invertujícím vstupu.

$$A_U = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

2.2 Neinvertující zapojení

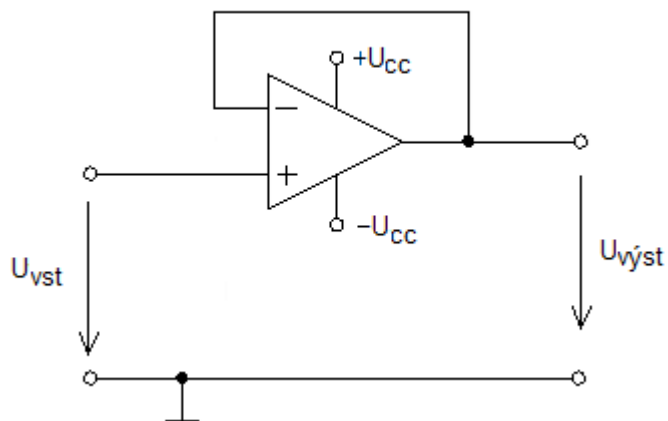


Obrázek 5 Operační zesilovač, neinvertující zapojení

Neinvertující zesilovač zesiluje vstupní napětí. Oproti invertujícímu zesilovači, který má vstupní impedanci danou velikostí odporu R_1 , se u tohoto zapojení vstupní impedance blíží nekonečnu a nezávisí na hodnotách odporů R_1 a R_2 .

$$A_U = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

2.3 Sledovač napětí

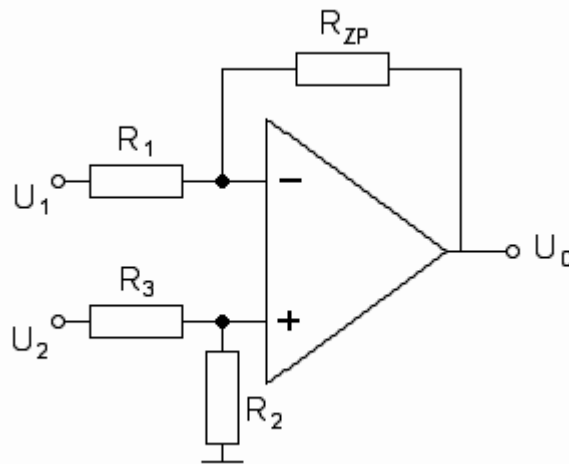


Obrázek 6 Operační zesilovač, napět'ový sledovač

$$U_{vyst} = U_{vst}$$

Napětí na vstupu sleduje napětí na výstupu, odtud název napěťový sledovač. Protože toto zapojení má vysoký vstupní odpor a malý výstupní odpor, nazývá se někdy impedanční převodník. Používá se na převod napětí ze zdroje s vysokým vnitřním odporem na malou výstupní impedanci.

2.4 Diferenční zesilovač

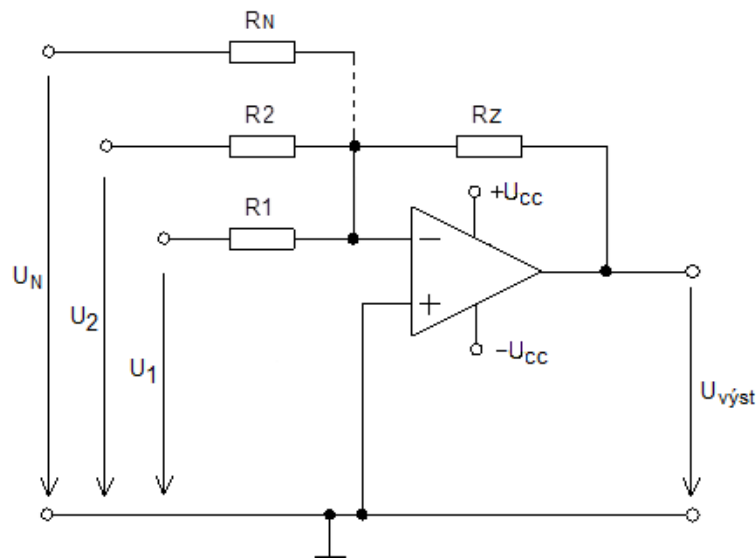


Obrázek 7 Operační zesilovač, diferenční zesilovač

Toto zapojení se používá pro sledování dvou signálů s velmi málo odlišnými hodnotami napětí. Výstupní napětí je úměrné rozdílu napětí na vstupech. Aby diferenční zesilovač skutečně zesiloval pouze rozdílové napětí, musí být dvojice odporů R_2 a R_3 ve stejném poměru jako R_{zp} a R_1 pak:

$$U_0 = \frac{R_{zp}}{R_1} (U_2 - U_1) \quad (5)$$

2.5 Sumační zesilovač

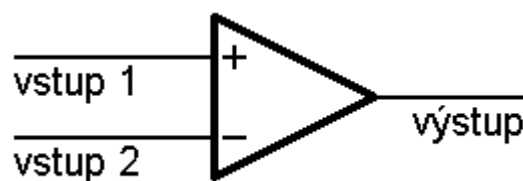


Obrázek 8 Operační zesilovač, sumační zesilovač

Sumační zapojení operačního zesilovače sčítá napětí na jednotlivých vstupech.

$$U_{výst} = -R_z \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_N}{R_N} \right) \quad (6)$$

2.6 Komparátor



Obrázek 9 Operační zesilovač zapojen jako komparátor

Komparátor porovnává přivedená napětí na invertující a neinvertující vstup. Je-li vyšší napětí na ne-invertujícím vstupu, pak na výstupu bude kladné saturační napětí. Bude-li vyšší napětí na invertujícím vstupu, bude na výstupu záporné saturační napětí.

3 ŠUM

3.1 Definice šumu

Obecně může být šum definován jako jakékoliv nežádoucí rušení, které zhoršuje nebo narušuje vlastnosti užitečného signálu. Slovo šum používáme jako název náhodných, nebo samovolných zdrojů šumu, které jsou způsobeny fyzickými vlastnostmi zařízení a materiálů využitých v elektronickém zařízení. [5] Příkladem takového šumu je šum tepelný, který se vyskytne v jakémkoli vodiči, jehož teplota je vyšší, než absolutní nula. Takovýto šum nelze zcela předpovídat nebo odstranit, lze jím pouze manipulovat a minimalizovat jeho působení.

Maximální hodnota, kterou je systém schopen změřit je dána použitým obvodem, avšak minimální měřitelná hodnota je dána šumem.

Šum také působí problémy v digitálních, ovládacích a počítačových systémech. Příklad takového rušení může být systém, který se spouští při určité hodnotě amplitudy. Přidá-li se do takového systému přítomnost náhodných skoků šumu, může dojít k aktivaci i pro hodnoty menší, než žádané. [5]

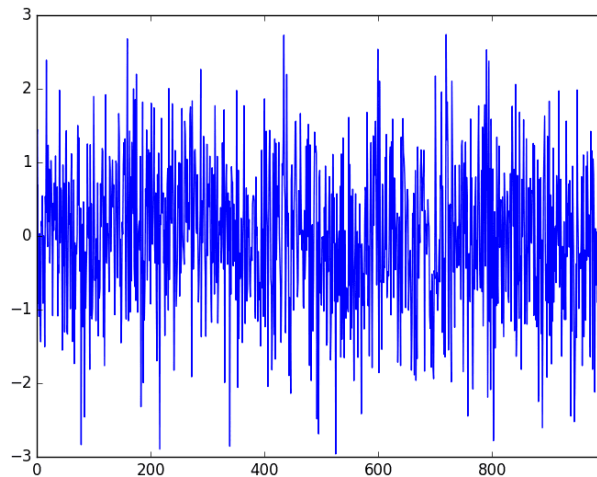
3.2 Barvy šumu

Šumům, jejichž rozdělení pravděpodobnosti není Gaussovské, byly přiděleny barvy spektra. Tyto barvy vyjadřují přibližné analogie mezi jejich frekvenčním spektrem a spektrem viditelného světla. Například červený šum bude mít větší podíl nízkofrekvenční složky než šum bílý.

3.2.1 Bílý šum

Bílý šum je náhodný signál s konstantní výkonovou spektrální hustotou. Stejně široká frekvenční pásma mají tedy stejnou energii. Díky těmto vlastnostem lze například prohlásit, že rozsah frekvence 100 Hz až 200 Hz bude obsahovat stejné množství energie, jako rozsah frekvence 1100 Hz až 1200 Hz. [5,6]

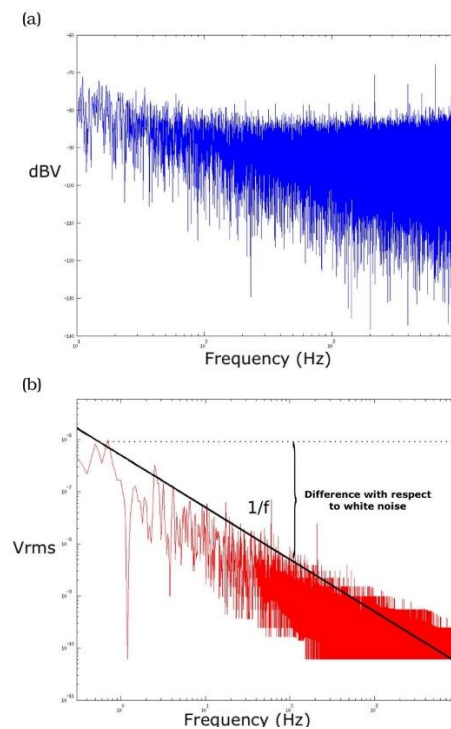
Bílý šum dostal své jméno jako analogii k bílému světlu, jsou v něm totiž zastoupeny všechny frekvence.



Obrázek 10 Ukázka bílého šumu

3.2.2 Růžový šum

Růžový šum, také známý jako „ $1/f$ šum“ je náhodný signál jehož výkonová frekvenční hustota je přímo úměrná převrácené hodnotě frekvence. Tedy při zdvojnásobení frekvence klesne energie o 3 dB. [6] Energie je stejná ve všech stejně širokých pásmech v logaritmických souřadnicích, např. ve všech oktávách. To odpovídá logaritmickému charakteru lidského vnímání. Růžovým šumem se proto často testují zvukové systémy, aby se zjistilo, zda mají v celém rozsahu požadovaný přenos.



Obrázek 11 Porovnání mezi bílým a růžovým šumem

3.2.3 Červený (hnědý) šum

Hnědý šum je podobný růžovému šumu, ale s výkonovou frekvenční hustotou sniženou o 6 dB na oktávu se zvyšující se frekvencí (hustota je úměrná $1/f^2$). [6] Může být generován algoritmem, který simuluje Brownův pohyb, nebo integrováním bílého šumu. Hnědý šum není pojmenován podle výkonového spektra které naznačuje hnědá barva, ale podle zkomolení z Brownova pohybu. Je také znám jako „náhodná procházka“. [6]

3.2.4 Modrý (azurový) šum

Výkonová frekvenční hustota modrého šumu se zvyšuje o 3 dB na oktávu se zvyšující se frekvencí (hustota je úměrná f) do konečného frekvenčního rozsahu. V počítačové grafice je termín „modrý šum“ někdy užívaný volněji jako jakýkoliv šum s minimální nízkou frekvencí bez výkyvů výkonu.

Zajímavostí je fakt, že světlocitlivé buňky uvnitř sítnice savců jsou uspořádány do vzoru připomínající modrý šum. [6]

3.2.5 Fialový šum

Výkonová frekvenční hustota purpurového šumu se zvyšuje o 6 dB na oktávu s rostoucí frekvencí (hustota úměrná f^2) do konečného rozsahu frekvencí. Je také znám jako odlišený bílý šum. [6]

3.3 Johnsonův (tepelný) šum

Tepelný šum je způsoben náhodnými, tepelně vybuzenými vibracemi náboje. Tento pohyb je podobný Brownovu pohybu. Je produkován všemi odpory, jejichž teplota je vyšší, než absolutní nula.

Střední kvadratické napětí (RMS) tepelného šumu je dáno vztahem:

$$\bar{u}_s = \sqrt{4kTfR} \quad (7)$$

Kde k je boltzmannova konstanta, T je absolutní teplota ($^{\circ}\text{K}$), f je šířka kmitočtového pásma a R je odpor v Ω .

Tepelný šum může teoreticky dosahovat nekonečných hodnot. [6] V reálném světě je však limitován parazitní kapacitou, která odpor zkratuje. [5,6,8]

3.4 Výstřelový šum

V tranzistorech, diodách a elektronkách se vyskytuje takzvaný výstřelový šum. Proud protékající těmito zařízeními není ‚hladký‘ a nepřetržitý. Jedná se totiž o sumu pulzů proudu, které jsou způsobeny proudem nosičů nesoucí elektrický náboj - například silikonová dioda, kde elektrony a díry překračují potenciálovou bariéru. [6] Každý elektron a každá díra nese náboj q , který v okamžiku doputování na anodu, respektive katodu, způsobí impulz proudu. Střední kvadratický proud výstřelového šumu je dán vztahem:

$$\bar{i}_s = \sqrt{2qIf} \quad (8)$$

kde q je náboj elektronu ($1.602 * 10^{-19}C$), I je střední hodnota proudu a f je šířka kmitočtového pásma.

Se zvětšujícím se proudem výstřelový šum narůstá. Roste však pomaleji neboť závisí na odmocnině stejnosměrného proudu, tudíž se procentuální fluktuaace proudu snižují. Nejvíce šumí malé proudy. [6]

3.5 Blikavý šum

Blikavým šumem nazýváme šum, který se objevuje při nízkých frekvencích jestliže polovodičem prochází proud. Je velmi málo závislý na teplotě a je úměrný proudu procházejícím polovodičem. [9] Jeho příčinou je nerovnoměrná generace a rekombinace nosičů proudu a velmi záleží na povrchových vlastnostech polovodiče.[5,6,9] Pomalé povrchové stavy působí jako pasti pro nosiče a výměnou mezi vodivostním pásmem a těmito pastmi může nastat fluktuaace proudu polovodiče.[9] Blikavý šum byl naměřen na hodnotách až $6 * 10^{-5}$ Hz.[5]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

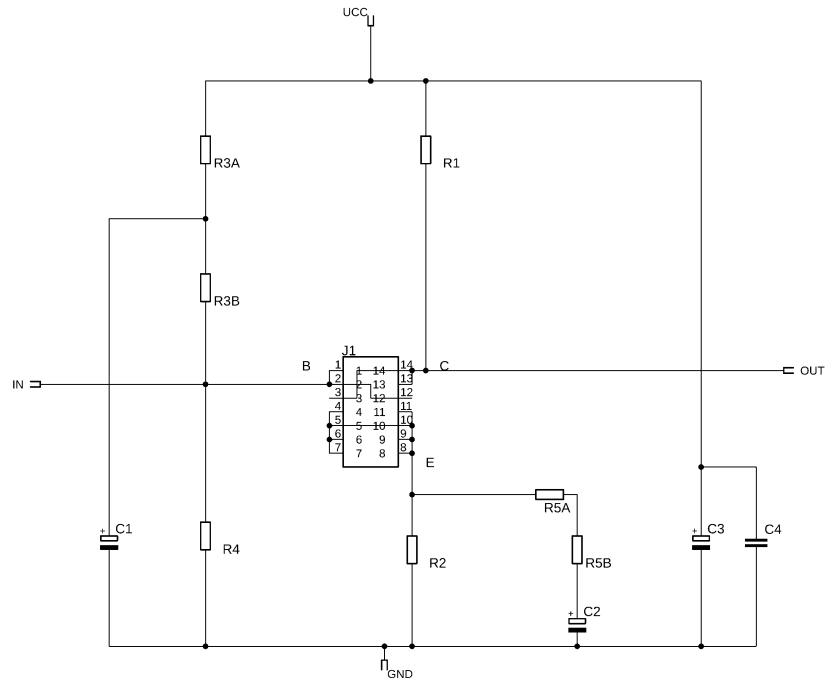
4 MODULY

Cílem této části práce je navržení a realizace modulové části. Jednotlivé moduly budou tranzistorové zesilovače s různými nastaveními pracovního bodu. Kvůli potřebě rychlé výměny tranzistorů bude namísto samotného tranzistoru použita patice DIP14. Piny patice budou spojeny tak, aby bylo možno zapojit tranzistory s pořadím elektrod CBE a BCE. Modulová část se bude skládat z celkem devíti modulů. A to:

1. $U_{CE} = 5 \text{ V}$, $I_C = 200 \text{ } \mu\text{A}$
2. $U_{CE} = 5 \text{ V}$, $I_C = 500 \text{ } \mu\text{A}$
3. $U_{CE} = 5 \text{ V}$, $I_C = 1000 \text{ } \mu\text{A}$
4. $U_{CE} = 10 \text{ V}$, $I_C = 200 \text{ } \mu\text{A}$
5. $U_{CE} = 10 \text{ V}$, $I_C = 500 \text{ } \mu\text{A}$
6. $U_{CE} = 10 \text{ V}$, $I_C = 1000 \text{ } \mu\text{A}$
7. $U_{CE} = 15 \text{ V}$, $I_C = 200 \text{ } \mu\text{A}$
8. $U_{CE} = 15 \text{ V}$, $I_C = 500 \text{ } \mu\text{A}$
9. $U_{CE} = 15 \text{ V}$, $I_C = 1000 \text{ } \mu\text{A}$

Různé velikosti U_{CE} si vynutí tři různá kladná napájecí napětí. Realizace těchto odlišných napětí se bude realizovat tak, že na základní desce budou tři odpovídající piny a příslušný modul bude využívat pouze potřebný pin.

1. $U_{CC} = 12 \text{ V}$, pro $U_{CE} = 5 \text{ V}$
2. $U_{CC} = 22 \text{ V}$, pro $U_{CE} = 10 \text{ V}$
3. $U_{CC} = 32 \text{ V}$, pro $U_{CE} = 15 \text{ V}$



Obrázek 12 Schéma zapojení modulu

4.1 Výpočet hodnot modulu

Blokovací kondenzátor C_1 omezuje rušení z napájecí větve - volíme hodnotu $47 \mu\text{F}$. Tato hodnota bude stejná pro všechny moduly.

Volíme hodnotu $R_{3A} = \frac{1}{10} R_3$.

Postup: vypočítáme hodnotu rezistoru R_3 a dále budeme uvažovat:

$$R_{3A} = 0.1 R_3$$

$$R_{3B} = 0.9 R_3$$

Blokovací kondenzátor C_3 bude mít hodnotu $100 \mu\text{F}$, kondenzátor C_4 bude 33nF keramika.

Člen $R_5 C_2$ upravuje zesílení tak aby platilo $A \approx 100$

4.1.1 Výpočet pracovního bodu

Modul 1: $U_{CE} = 5 \text{ V}$, $I_C = 200 \mu\text{A}$, $U_{CC} = 12 \text{ V}$

1. Napětí U_{CC} si rozvrhneme tak aby platilo:

$$U_{R1} = 5 \text{ V}, U_{CE} = 5 \text{ V}, U_{R2} = 2 \text{ V}$$

2. Provedeme výpočet hodnot rezistorů R_1 a R_2 :

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_C} = \frac{5}{2 * 10^{-4}} = 25 \text{ k}\Omega \quad (9)$$

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{I_C} = \frac{2}{2 * 10^{-4}} = 10 \text{ k}\Omega \quad (10)$$

3. Uvažujeme hodnotu napětí $U_{BE} = 0.65 \text{ V}$. Pak na bázi tranzistoru musí být hodnota napětí $U_B = U_{R2} + U_{BE} = 2 + 0.65 = 2.65 \text{ V}$

4. Dělič napětí R_3/R_4 vypočítáme pro $U_B = 2.65 \text{ V}$. Musíme si však dát pozor, neboť do báze odtéká proud I_B , který je závislý na typu tranzistoru. Dělič tedy musí být dostatečně tvrdý, aby nebyl odběrem proudu příliš ovlivněn. Volíme tedy vnitřní odpor děliče roven $10 \text{ k}\Omega \rightarrow R_3 || R_4 = 10 \text{ k}\Omega$

Dostaneme soustavu dvou rovnic:

$$\frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = 10^4 \quad (117)$$

$$U_B = U_{CC} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (12)$$

Nejprve si vyjádříme R_3 z rovnice 8:

$$U_B = U_{CC} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad /* (R_3 + R_4)$$

$$U_B(R_3 + R_4) = U_{CC}R_4$$

$$U_B R_3 + U_B R_4 = U_{CC}R_4$$

$$U_B R_3 = R_4(U_{CC} - U_B)$$

$$R_3 = R_4 \frac{(U_{CC} - U_B)}{U_B}$$

Dosadíme:

$$R_3 = R_4 \frac{(12 - 2.65)}{2.65}$$

$$R_3 = 3.53 R_4$$

Nyní dosadíme do rovnice 7

$$\frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = 10^4$$

$$\frac{1}{\frac{1}{3.53R_4} + \frac{1}{R_4}} = 10^4 \quad / * \left(\frac{1}{3.53R_4} + \frac{1}{R_4} \right)$$

$$1 = \frac{10^4}{3.53R_4} + \frac{10^4}{R_4}$$

$$1 = \frac{10^4}{3.53R_4} + \frac{10^4}{R_4} \quad / * R_4$$

$$R_4 = \frac{10^4}{3.53} + 10^4 = 2832 + 10000 = 12832 \Omega$$

Dopočítáme R_3

$$R_3 = 3.53 R_4 = 3.53 * 12832 = 45297 \Omega$$

Kontrola:

$$\frac{1}{\frac{1}{45297} + \frac{1}{12832}} = 9999.33 \Omega$$

5. Nyní rozdělíme odpory R_{3A} a R_{3B} :

$$R_{3A} = 0.1 R_3 = 4529.7 \Omega$$

$$R_{3B} = 0.9 R_3 = 40767.3 \Omega$$

Volíme odpory z řady E24:

$$R_{3A} \rightarrow 3300 \Omega$$

$$R_{3B} \rightarrow 43000 \Omega$$

6. Nyní budeme počítat zesílení:

pro zesílení platí:

$$A \approx \frac{R_1}{R_2 || R_5}$$

Abychom se vyhnuli příliš velkému vlivu zesilovacího činitele h_{FE} , volíme zesílení

$$A = 100$$

$$100 = \frac{R_1}{R_2 || R_5} \rightarrow R_1 = 100(R_2 || R_5)$$

Dopočítáme pro R_5

$$\frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5}} = \frac{R_1}{100} = 250$$

$$1 = 250 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} \right) = 250 \left(\frac{1}{10^4} + \frac{1}{R_5} \right)$$

$$R_5 = 0.025R_5 + 250$$

$$0.975 R_5 = 250$$

$$R_5 = 256 \Omega$$

7. Kondenzátor C_2 zajišťuje, že se R_5 uplatní pouze pro šumový signál. Volíme dolní mezní kmitočet $f_m = 10$ Hz. Zjednodušeně lze uvažovat, že kapacita C_2 musí být alespoň tak veliká, aby platilo:

$$X_C(f_m) \leq R_5$$

$$\frac{1}{2\pi f_m C} \leq R_5$$

Dosadíme pro f_m a R_5 :

$$\frac{1}{2\pi 10 C_2} \leq 256 \quad /* C_2$$

$$\frac{1}{2\pi 10} \leq 256 C_2 \quad /: 256$$

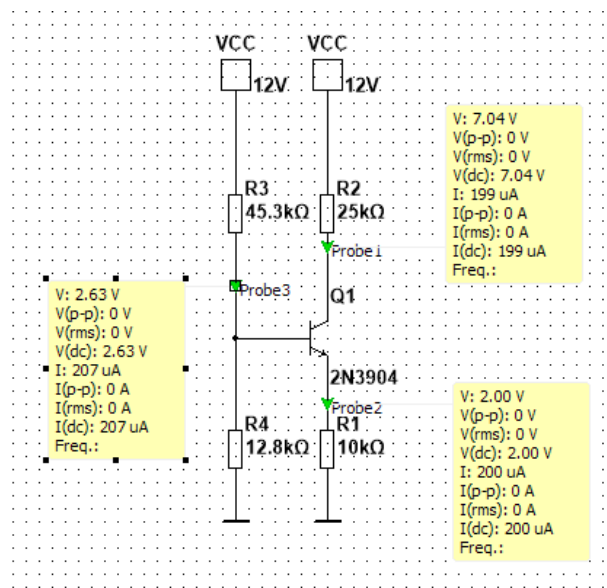
$$C_2 \geq \frac{1}{2\pi * 10 * 256}$$

$$C_2 \geq 62.2 \mu F$$

Volíme $C_2 = 100 \mu F$

Tabulka 1 Vypočítané hodnoty jednotlivých modulů

| U_{CE} [V] | I_c [μ A] | R1 [k Ω] | R2 [k Ω] | R3a [k Ω] | R3b [k Ω] | R4 [k Ω] | R5 [Ω] | C2 [μ F] |
|--------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|---------------|
| 5 | 200 | 25 | 10 | 33 | 42 | 13 | 256 | 100 |
| 5 | 500 | 10 | 4.7 | 3.3 | 42 | 13 | 100 | 220 |
| 5 | 1000 | 5.6 | 2.2 | 3.3 | 42 | 13 | 21 | 470 |
| 10 | 200 | 56 | 10 | 8.2 | 75 | 11 | 365 | 100 |
| 10 | 500 | 22 | 4.7 | 8.2 | 75 | 11 | 145 | 220 |
| 10 | 1000 | 10 | 2.2 | 8.2 | 75 | 11 | 21 | 470 |
| 15 | 200 | 75 | 10 | 9.1 | 100 | 11 | 635 | 47 |
| 15 | 500 | 33 | 4.7 | 9.1 | 100 | 11 | 145 | 100 |
| 15 | 1000 | 15 | 2.2 | 9.1 | 100 | 11 | 21 | 220 |



Obrázek 13 Simulační kontrola vypočítaných hodnot modulu

4.1.2 Simulace pracovního bodu modulu

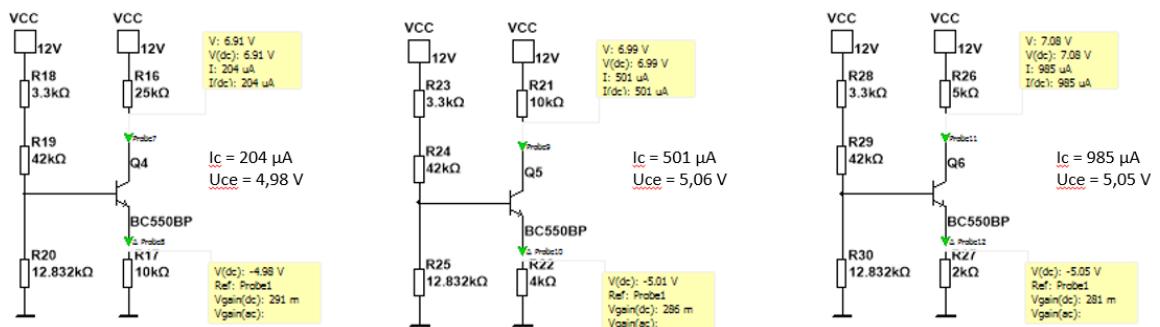
Simulace pracovního bodu proběhla v SW Multisim.

Vzhledem k tomu, že nastavení pracovního bodu závisí na h_{FE} charakteristikách tranzistoru, použitá výpočetní metoda není příliš přesná. Z tohoto důvodu byly simulace provedeny vždy pro dva typy tranzistorů

- 2N3904 jako zástupce low-cost série s malým zesilovacím činitelem
- BC550B jako zástupce nízkošumových tranzistorů s větším zesilovacím činitelem

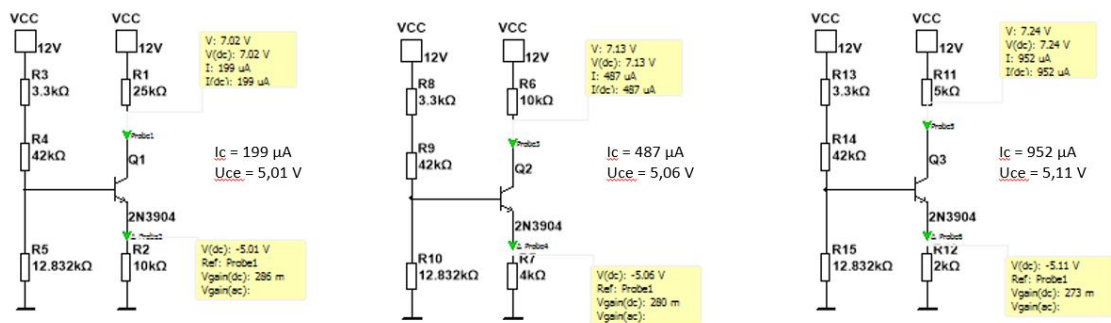
Teoreticky by mělo platit, že čím větší zesilovací činitel - tím menší proud do báze a tedy tím menší ovlivnění děliče R_3/R_4 , které zavádí R_2 .

Číslování součástek je pro každou simulaci jiné, to však vychází z vlastností simulačního SW.



Obrázek 14 Simulace pracovního bodu, řešení pro 5 V, tranzistor 2N3904

Horní sonda ukazuje především proud I_C , spodní pak napětí U_{CE} . Obrácená polarita U_{CE} je dána umístěním sondy. Chyba vůči vypočítaným hodnotám nepřesahuje 5%, což je přijatelné.



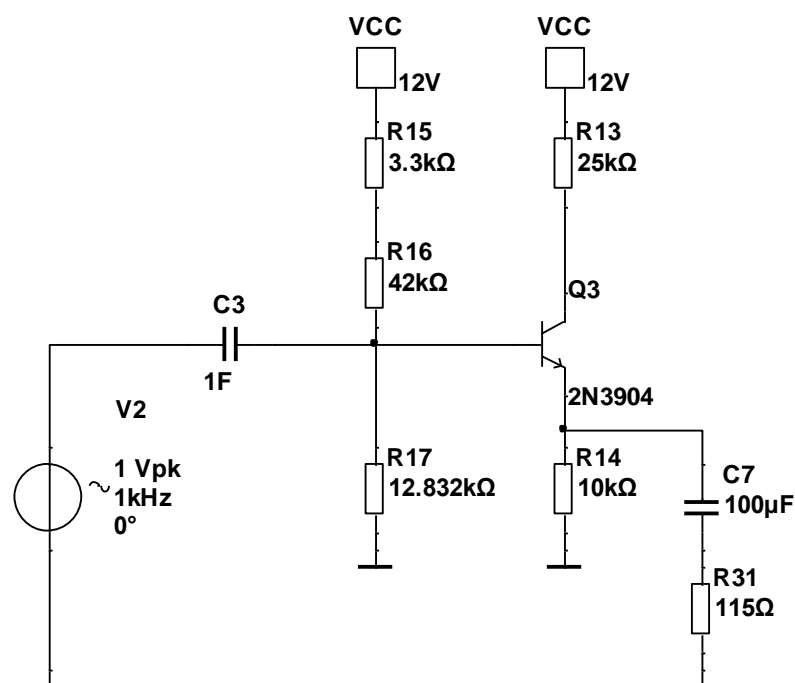
Obrázek 15 Simulace pracovního bodu, řešení pro 5 V, tranzistor BC550B

Horní sonda ukazuje především proud I_C , spodní pak napětí U_{CE} . Obrácená polarita U_{CE} je dána umístěním sondy. Chyba vůči vypočítaným hodnotám nepřesahuje 5%, což je přijatelné.

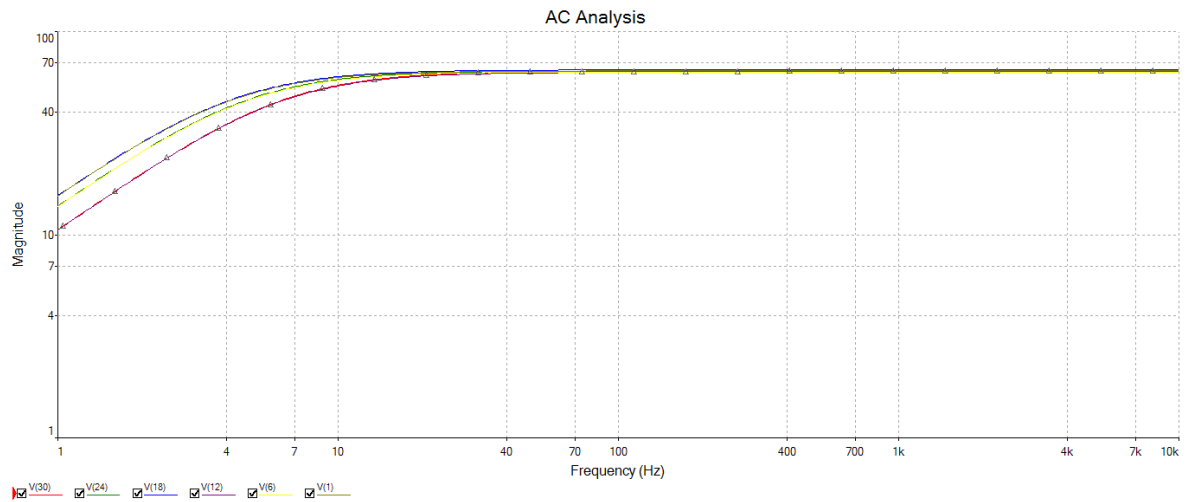
V souladu s teorií se ukazuje, že tranzistor s větším zesilovacím činitelem způsobuje menší chybu, neboť dělič R_3/R_4 je zatížen menším proudem do báze.

Simulace pro $U_{CE} = 10\text{ V}$, 15 V viz. Přílohy 1-4

4.1.3 Simulace zesílení


 Obrázek 16 Schéma simulace zesílení pro $U_{CE} = 5\text{ V}$

Zesílení bylo simulováno dle schématu v obrázku 8. Virtuální vazební kondenzátor 1 F galvanicky odděluje zdroj. Výstup je snímám na kolektoru tranzistoru.



Obrázek 17 Simulace zesílení pro $U_{CE} = 5\text{ V}$

| Tranzistor | R_5 [Ω] | C [μF] | Zesílení | Odchylka v dB | Nový R [Ω] | Nový C [μF] | Výsledné zesílení | Odchylka v dB |
|------------|--------------------|---------------------|----------|---------------|---------------------|--------------------------|-------------------|---------------|
| 2N3904 | 256 | 100 | 64,04 | -3,87 dB | 115 | 100 | 98,99 | -0,09 dB |
| | 103 | 220 | 63,29 | -3,97 dB | 44 | 220 | 99,30 | -0,06 dB |
| | 51 | 330 | 63,01 | -4,01 dB | 21 | 470 | 99,60 | -0,03 dB |
| BC550 | 256 | 100 | 64,72 | -3,78 dB | 115 | 100 | 100,09 | +0,01 dB |
| | 103 | 220 | 63,95 | -3,88 dB | 44 | 220 | 100,80 | +0,07 dB |
| | 51 | 330 | 63,67 | -3,92 dB | 21 | 470 | 101,06 | +0,09 dB |

Tabulka 2 Zesílení a nové hodnoty rezistoru R_5 pro $U_{CE} = 5\text{ V}$

Vysvětlivky k tabulce 2:

Použitý vzorec pro zesílení $A = \frac{R_2}{R_1}$ je pouze přibližný pro ideální tranzistor. Reálně má tranzistor konečné zesílení a konečný odpor báze, který se řadí do série s odporem R_5 . Hodnoty odporu R_5 byly upraveny dle výsledku simulace tak, aby se výsledné zesílení

rovnalo 100. Odchylka v dB je počítána vůči napěťovému zisku 40 dB, což odpovídá zesílení 100x.

Z hodnot v tabulce 2 vyplývá, že pro větší zesilovací činitel, při stejné volbě součástek, je výsledné zesílení větší.

Z tabulek pro zesílení 10 V a 15 V, viz přílohy 7 a 8, lze vidět, že pro vyšší U_{CE} klesá chyba vypočítaného zesílení. Klesá totiž vliv vnitřních odporů rezistoru, respektive jejich poměr k vnějším odporům začíná být více zanedbatelný. Lze tedy říci, že při vyšším U_{CE} dosahujeme většího zesílení a nižšího zkreslení, proto uvažujeme i pro hodnotu $U_{CE} = 15$ V. V tomto případě by se mělo ukázat, že pro takto nastavený pracovní bod bude šum větší.

4.1.4 Simulace šumu rezistorů

| Noise Analysis | | |
|----------------|-------------------|-------------|
| 1 | onoise_total_rr1 | 11.68245 p |
| 2 | onoise_total_rr2 | 58.45407 p |
| 3 | onoise_total_rr3 | 0.00000 |
| 4 | onoise_total_rr4 | 0.00000 |
| 5 | onoise_total_rr5 | 0.00000 |
| 6 | onoise_total_rr34 | 920.28570 p |
| 7 | onoise_total | 1.13935 n |
| 8 | onoise_total_qq1 | 0.00000 |

Obrázek 18 Simulace Johnsonova šumu pro $U_{CE} = 15$ V, $I_C = 200$ μ A, pásmo 10 Hz – 10 kHz

| Noise Analysis | | |
|----------------|-------------------|-------------|
| 1 | onoise_total | 311.16963 p |
| 2 | onoise_total_rr13 | 3.87206 p |
| 3 | inoise_total_rr13 | 0.00000 |
| 4 | onoise_total_rr14 | 2.08882 p |
| 5 | onoise_total_rr15 | 0.00000 |
| 6 | onoise_total_rr16 | 0.00000 |
| 7 | onoise_total_rr17 | 0.00000 |
| 8 | onoise_total_rr31 | 181.32394 p |

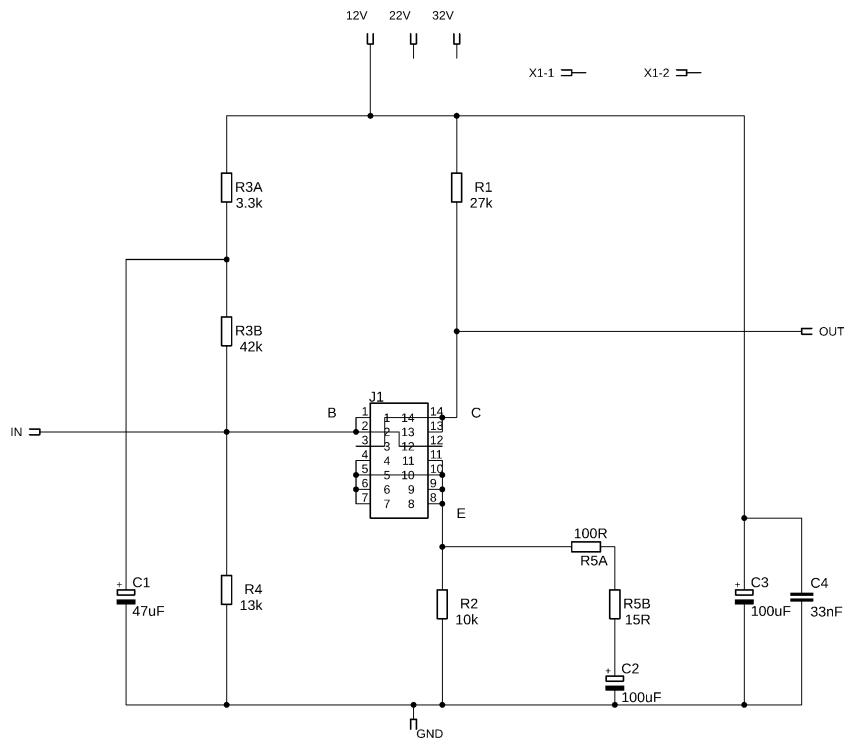
Obrázek 19 Simulace Johnsonova šumu pro $U_{CE} = 5$ V, $I_C = 200$ μ A, , pásmo 10 Hz – 10 kHz

Všechny rezistory generují Johnsonův tepelný šum a dále pak aditivní šумы, které jsou způsobeny přiloženým napětím a protékajícím proudem. Simulační software uvažuje pouze Johnsonův šum. Ze vzorce $\bar{u}_s = \sqrt{4kTfR}$ by se mohlo zdát, že více problematické budou rezistory s větším odporem. Ve skutečnosti také záleží na jejich roli v elektrickém obvodu - šum, který generují, může být například zesilován. Pro výslednou hodnotu šumu také platí, že nestačí pouze sečíst hodnoty středních šumových napětí, neboť šумы nejsou korelovány.

V obrázku 10 můžeme vidět simulované hodnoty pro $U_{CE} = 15 \text{ V}$, $I_C = 200 \mu\text{A}$. Nejvíce šumu produkuje R_{34} (R_5). Odpory R_3 - R_5 se neuplatní, jsou totiž zkratovány budícím zdrojem s nulovým vnitřním odporem. Pokud bychom na vstupu zesilovače měli 1 mV , na výstupu by bylo 100 mV a šum roven odmocnině z 1.139 nV , tj. $33.7 \mu\text{V}$. Výsledný odstup signál/šum by byl přibližně 70 dB .

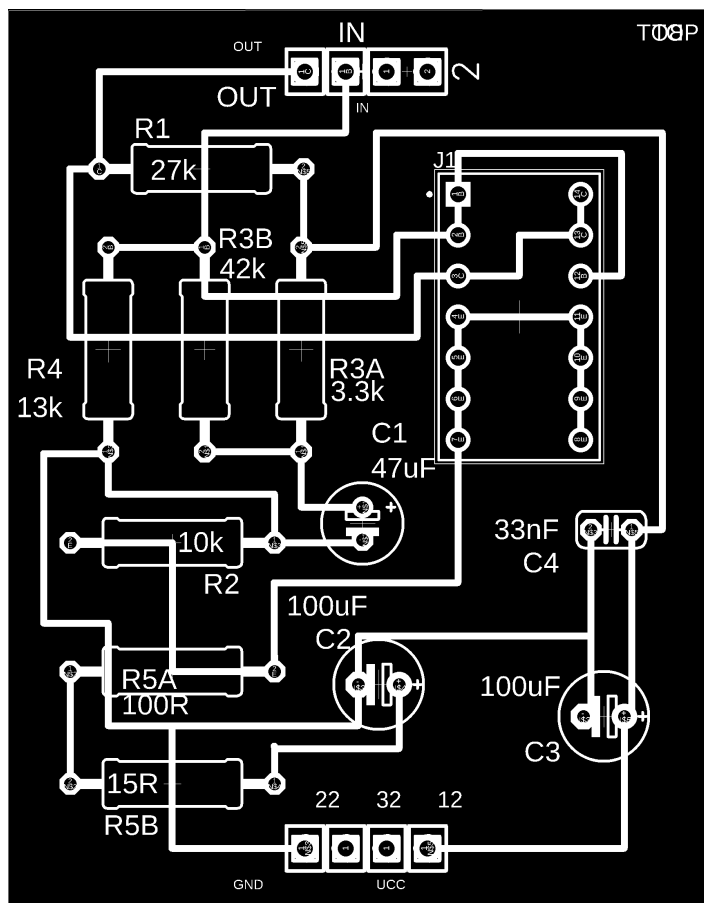
V obrázku 11 můžeme vidět simulované hodnoty pro $U_{CE} = 5 \text{ V}$, $I_C = 200 \mu\text{A}$. Snížíme-li napětí U_{CE} na $1/3$, odstup signál/šum za stejných podmínek vzroste na 75 dB

4.2 Realizace modulů



Obrázek 20 Schéma modulu pro $U_{CE} = 5 \text{ V}$, $I_C = 200 \mu\text{A}$

Na obrázku 12 lze vidět schéma modulu 1. Hodnoty rezistorů byly vypočítány v kapitole 3.1.1. Piny 12 V, 22 V a 32 V jsou přivedeny ze základní desky a slouží jako napájení. Vstup IN je přiveden ze základní desky, kde je umístěn přepínač, který umožňuje nechat vstup nezapojen, zkratovat jej a nebo zatížit odporem 600 Ω . Výstup je veden na základní desku na vstup operačního zesilovače, který dále zesiluje šumový signál. Piny X1-1 a X1-2 jsou piny podpůrné.



Obrázek 21 Pohled na plošný spoj modulu pro $U_{CE} = 5$ V, $I_C = 200 \mu\text{A}$

Na obrázku 13 je vidět zapojení patice. Je zapojena tak, že na levé straně je pořadí B-C-E a na straně pravé je pořadí C-B-E.

Zbýlá schémata a plošné spoje jsou uvedeny v přílohách 9-16.

5 ZÁKLADNÍ DESKA

5.1 Požadavky na základní desku

5.1.1 Napájení

Základní deska bude napájena napětím +32 V, -12 V. Záporné hodnoty napětí jsou určeny k symetrickému napájení operačního zesilovače. Základní deska bude poskytovat napětí o hodnotách 32 V, 22 V a 12 V určené pro napájení modulové části. Tyto napětí budou přivedeny na jednotlivé piny a modul využije vždy pouze požadovaný pin. Napětí 22 V bude realizováno pomocí stabilizátoru napětí LM317. Napětí 12 V bude realizováno pomocí stabilizátoru napětí 7912.

5.1.2 Vstupy a výstupy

Vstup do modulu je realizován pomocí pinu. Před vstupním pinem modulu bude přepínač, který umožní nechat vstup nezapojený, zkratovat vstup a nebo vstup zatížit 600 Ω .

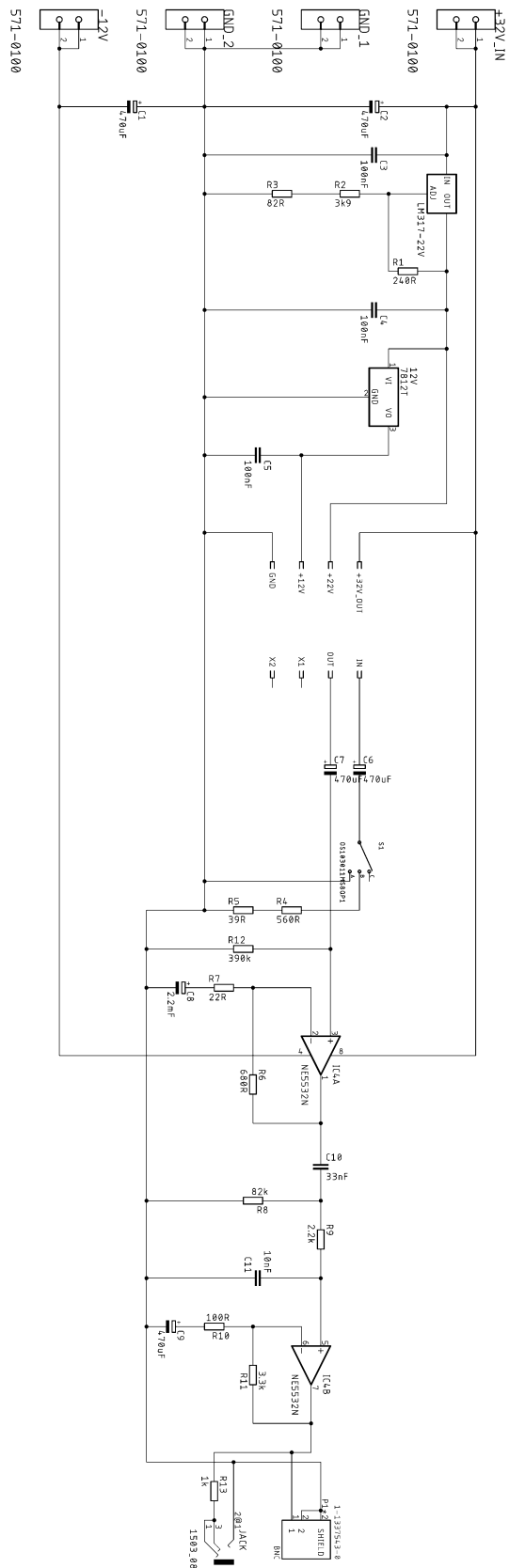
Výstup z modulů je následován navazujícím stupněm. Navazující stupeň je realizován pomocí nízkošumového operačního zesilovače NE5532.

Výstup operačního zesilovače bude vyveden na konektor BNC, pro měření pomocí vektorového analyzátoru BODE 100. Dále bude na výstupu konektor Jack, který umožní poslech výsledného šumu.

5.1.3 Operační zesilovač

Pokud je teoretický minimální šum obvodu zesilovače SE daný samotnými rezistory v desítkách μV , lze očekávat, že s měřenými rezistory bude šumové napětí na výstupu ve stovkách μV . Aby měl výstup stovky mV, musí mít následující stupeň zesílení alespoň 1000x. Jelikož je testovací přípravek zaměřen především na tranzistory použité v nízkofrekvenčních obvodech, je nutné omezit spektrum šumu vhodnými filtry.

5.2 Schéma základní desky



Obrázek 22 Schéma základní desky

5.2.1 Napájení

Základní deska je napájena napětím +32 V, které je zároveň vstupním napětím na jeden z pinů modulu. Stabilizátor LM317 má výstupní napětí 22 V. Rezistor R_1 stabilizátoru je dán výrobcem. Platí že:

$$U_{výst} = 1.25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (13)$$

tedy

$$\begin{aligned} 22 &= 1.25 \left(1 + \frac{R_2}{240} \right) \\ 22 &= 1.25 + \frac{1.25R_2}{240} \quad /* 240 \\ 5280 &= 300 + 1.25R_2 \\ R_2 &= \frac{5280 - 300}{1.25} \\ R_2 &= 3984 \Omega \end{aligned}$$

Stabilizátor 7912 je zapojen až za stabilizátorem LM317, aby nedošlo k velkému namáhání kvůli velkému rozdílu napětí na vstupu/výstupu.

5.2.2 Operační zesilovač

K realizaci byl vybrán operační zesilovač NE5532. Je to nízkošumový, snadno dostupný, zesilovač na bázi BJT. S jedním operačním zesilovačem nelze dosáhnout šířky pásma 10 kHz se zesílením 1000x, proto je zesílení rozděleno mezi 2 operační zesilovače.

5.2.3 Hodnoty zpětnovazebních rezistorů

Nejvýraznější vliv na šum obvodu má rezistor R_7 , proto je minimalizována jeho hodnota. Hodnota rezistoru zatěžovacího odporu zesilovače $R_6 = 680 \Omega$ je nejnižší možnou hodnotou.

U druhého operačního zesilovače máme signál již zesílený, takže se šum již tolik neprojeví. Hodnoty rezistorů R_{10} a R_{11} byly určeny tak, aby celkové výsledné zesílení zesilovače bylo alespoň 1000x:

$$A_1 = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{680}{22} \cong 32$$

$$A_2 = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{3300}{100} = 34$$

$$A = A_1 A_2 = 32 * 34 = 1088$$

Kondenzátory C_8 a C_9 zajišťují, že stejnosměrné zesílení je rovno jedné, abychom se vyhnuli zesilování napěťové asymetrie.

5.2.4 Hodnoty propustí

Jelikož je přípravek navrhnout k měření tranzistorů v nízkofrekvenčních obvodech, je potřeba omezit zesilované frekvenční spektrum. Vzhledem k faktu, že přípravek primárně slouží pro porovnání tranzistorů mezi sebou, nejsou hodnoty propustí úplně kritické.

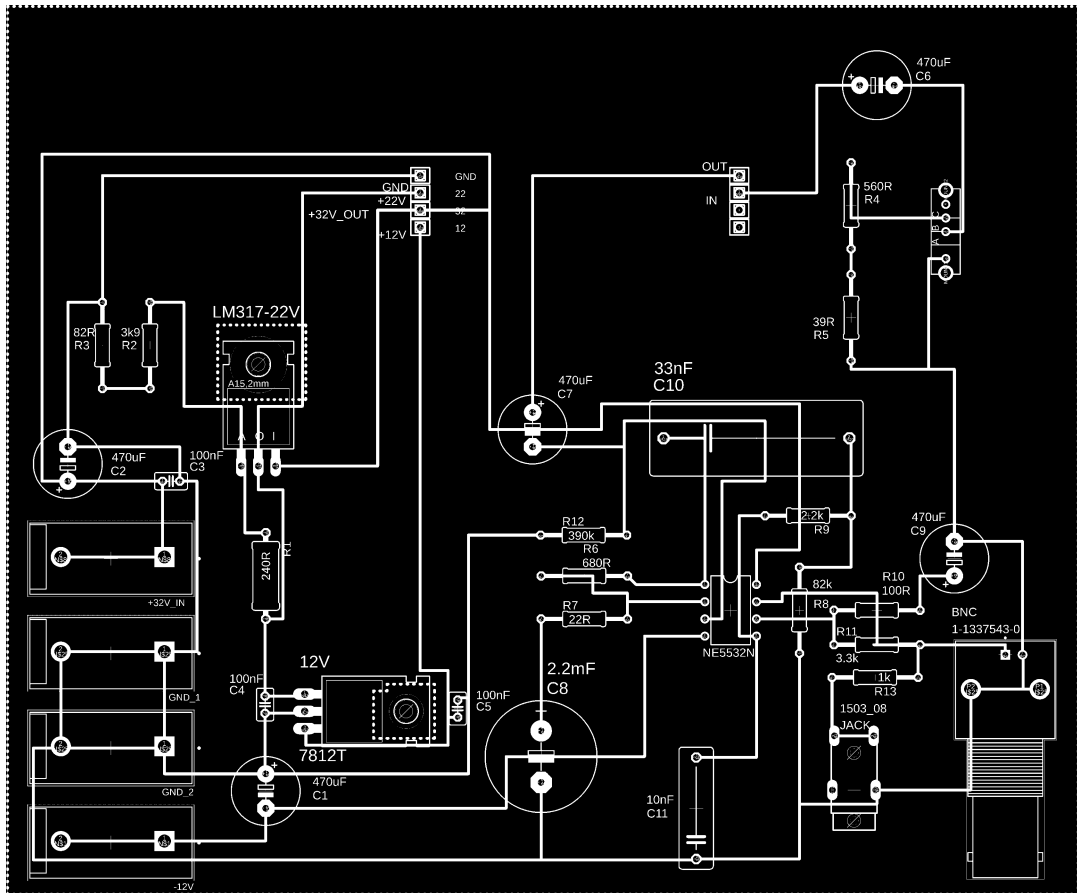
Dolní propust: Člen R_8 a C_{10} :

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi * 82000 * 33 * 10^{-9}} \cong 56 \text{ Hz}$$

Horní propust: Člen R_9 a C_{11} :

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi * 2200 * 10 * 10^{-9}} \cong 7.23 \text{ kHz}$$

5.3 Deska plošných spojů základní desky

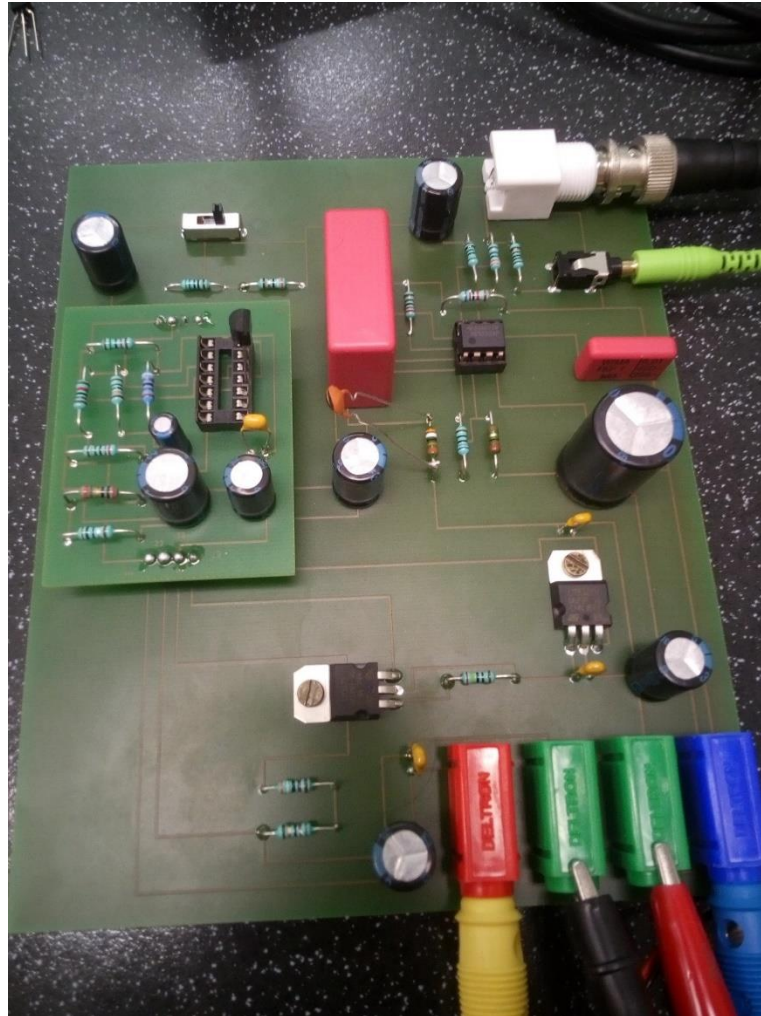


Obrázek 23 Základní deska, pohled na desku plošných spojů

V obrázku 23 můžeme vidět realizaci základní desky. V levé části se nachází napájecí část. Připojení do desky realizují čtyři konektory, které jsou určeny pro banánek 4mm. Stabilizátory napětí jsou upevněny k desce, pro lepší odvod tepla. Ve vrchní části desky jsou piny, které slouží pro připojení modulů. V pravém horním rohu se nachází přepínač vstupu modulů. V pravé dolní části se nachází patice s operačním zesilovačem NE5532 a jsou zde také umístěny konektory Jack a BNC.

6 MĚŘENÍ DAT

6.1 Ověření funkčnosti



Obrázek 24 Zapojená základní deska, měření dat

Prvním krokem při měření dat bylo ověření praktické funkčnosti přípravku.

Přípravek byl připojen na laboratorní zdroj s hodnotami napětí +32 V a -12 V. Prvním krokem při ověření funkčnosti bylo změření jednotlivých napětí základní desky.

Dalším krokem bylo připojení výstupu BNC na osciloskop. Při tomto kroku jsem narazil na problém - vstupní odpor operačního zesilovače systém rozkmital na frekvenci 250 kHz. Tento problém byl rychle odstraněn přidáním kondenzátoru 47 pF, který spolu s odporem realizoval horní propust s mezní frekvencí $f_m \approx 8.7$ kHz.

6.2 Měření vektorovým analyzátozem BODE 100

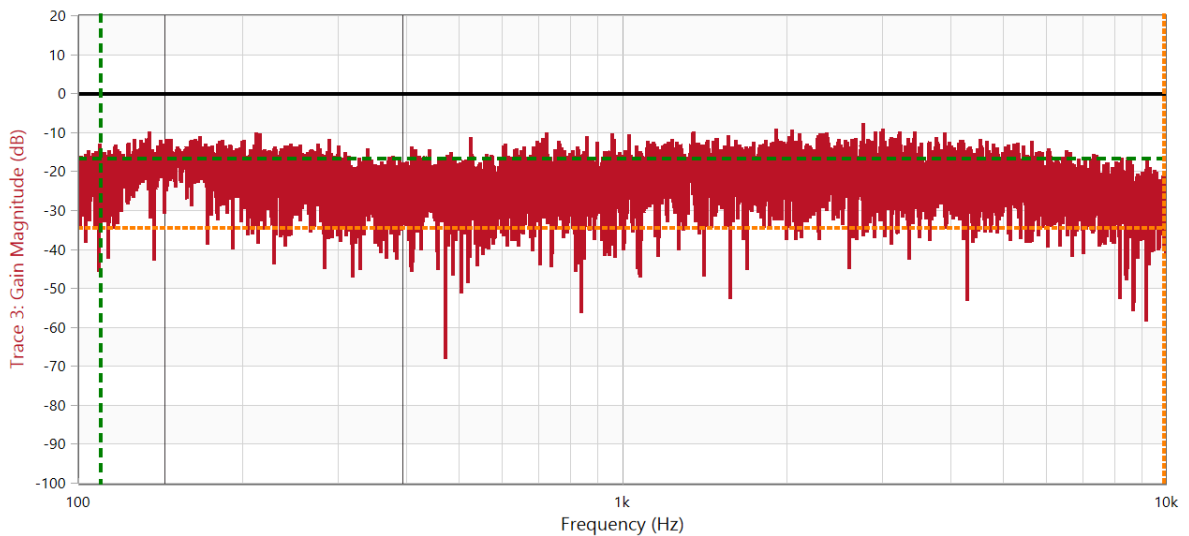


Obrázek 25 Vektorový analyzátor BODE 100

[<https://www.omicron-lab.com/shop/Bode100.html>]

Měření bylo provedeno pro 10 náhodně vybraných tranzistorů 2n3904. Pro každý tranzistor byly provedeny dvě měření, pro $U_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 200\text{ }\mu\text{A}$ a pro $U_{CE} = 15\text{ V}$, $I_C = 200\text{ }\mu\text{A}$.

Měření probíhalo v pásmu 100 Hz – 10 kHz



Obrázek 26 Ukázka naměřených dat vzorek č.1, 5 V / 200 μA

Tabulka 3 Naměřené hodnoty SNR

| Vzorek | č.1 | č.2 | č.3 | č.4 | č.5 | č.6 | č.7 | č.8 | č.9 | č.10 |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| 5 V/200 μA [dB] | -20.75 | -21.01 | -20.92 | -21.02 | -21.1 | -20.98 | -20.98 | -21 | -20.93 | -20.97 |
| 15V/200 μA [dB] | -25.88 | -24.44 | -22.76 | -18.62 | -18.42 | -18.54 | -18.59 | -18.5 | -18.54 | -18.61 |

V tabulce 3 můžeme vidět naměřené hodnoty šumu jednotlivých tranzistorů. Hodnoty šumu pro $U_{CE} = 5\text{ V}$ se pohybují kolem -21 dB (89 mV) a jejich hodnoty se navzájem výrazně

neliší. Rozdíl mezi nejlepším a nejhorším naměřeným tranzistorem je -0.27 dB, což odpovídá 2.7 mV.

Hodnoty šumu pro $U_{CE} = 15$ V jsou překvapující. Rozdíl hodnot mezi nejlepším a nejhorším tranzistorem je -7.46 dB, což odpovídá napětovému rozdílu 69 mV.

Toto měření potvrdilo funkčnost přípravku. Díky jednoduchosti měření umožňuje přípravek rychle a snadno určit vhodný tranzistor s poměrově lepšími vlastnostmi k následujícímu použití jako nízkošumový zesilovač.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnutí a vytvoření přípravku pro měření nízkofrekvenčních bipolárních tranzistorů a to pro devět různých nastavení pracovního bodu.

V teoretické části byly popsány bipolární tranzistory a šum.

Na začátku praktické části jsou popsány požadavky na modulovou část . Byl zde proveden návrh pro jednotlivé hodnoty pracovních bodů, dále zde byly podrobně popsány výpočty hodnot pro první modul tranzistorového zesilovače. Byly zde provedeny simulace zapojení zesilovače, simulace zesílení zesilovače a simulace tepelného šumu modulu. V této části byla také provedena realizace modulů.

V následující části jsou popsány požadavky na navazující operační zesilovač. Byl zde proveden návrh základní desky a byly zde popsány metody napájení základní desky a modulové části. Byly zde popsány a vysvětleny hodnoty součástek použitých v navazujícím stupni. Byla zde odůvodněna volba hodnot pásmových propustí.

V závěrečné části byla provedena kontrola funkčnosti přípravku a byl zde nalezen a následně odstraněn problém, který by zamezoval funkčnosti přípravku. Jsou zde uvedeny výsledky měření tranzistorů 2n3904, jejich porovnání a vyvozené závěry.

Výsledkem této práce je kompletní teoretická i praktická realizace přípravku, který usnadní volbu při výběru tranzistorů pro aplikaci jako nízkofrekvenční zesilovač a to na základě rychlého a snadno opakovatelného měření.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Bipolar Transistor. *Electronics-tutorials* [online]. [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_1.html
- [2] Tranzistory. *Elektro ČVUT* [online]. Praha ČVUT [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: http://elektro.fs.cvut.cz/ZS/stare0304/2141015.pdf/papezova/Tranzis_slejdy.pdf
- [3] BEŠTA, M. *TRANZISTORY* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://sestopkou.eu/dilny/wp-content/uploads/2016/10/T1.5-Tranzistor.pdf>
- [4] *Elektronické součástky* [online]. VUT Brno [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/2725839-Elektronicke-soucastky.html>
- [5] C. D. MOTCHENBACHER a J. A. CONNELLY. *Low Noise Electronic System Design*. Amsterdam: John Wiley, 1993. ISBN 978-0-471-57742-3.
- [6] SELF, Douglas. *Small Signal Audio Design*. Amsterdam: Elsevier, 2010. ISBN 978-0-240-52177-0
- [7] KEIM, Robert. What Is Electrical Noise and Where Does It Come From? *Allaboutcircuits* [online]. 21.6.2018 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/electrical-noise-what-causes-noise-in-electrical-circuits/>
- [8] Resistor Capacitance. *Eepower* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-fundamentals/resistor-capacitance/#>
- [9] *Fyzika polovodičů* [online]. MASARYKOVA UNIVERZITA. Ústav fyziky kondenzovaných látek, 2013 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/95102160-Masarykova-univerzita-ustav-fyziky-kondenzovanych-latek-fyzika-polovodicu-bipolarni-tranzistor-radomir-lenhard.html>. Skripta. MASARYKOVA UNIVERZITA. Ústav fyziky kondenzovaných látek.
- [10] Operační zesilovače [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: http://uprt.vscht.cz/ucebnice/LO/download/Navod_OZ.pdf
- [11] *Operační zesilovače* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/jaro2015/F2400/um/Operacni_zesilovace.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|-------|---|
| BJT | Bipolar junction tranzistor |
| B | Báze |
| C | Kolektor |
| E | Emitor |
| I_E | Emitorový proud |
| I_C | Kolektorový proud |
| I_B | Bázový proud |
| SNR | Signal to noise ratio – odstup signál/šum |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obrázek 1 Schéma zapojení, bipolárního tranzistoru NPN, jeho struktura a vnitřní zapojení [2]..... | 12 |
| Obrázek 2 Schéma zapojení, bipolárního tranzistoru PNP, jeho struktura a vnitřní zapojení [2]..... | 12 |
| Obrázek 3 Základní zapojení tranzistorů [4] | 13 |
| Obrázek 4 Operační zesilovač, invertující zapojení | 14 |
| Obrázek 5 Operační zesilovač, neinvertující zapojení..... | 15 |
| Obrázek 6 Operační zesilovač, napěťový sledovač | 15 |
| Obrázek 7 Operační zesilovač, diferenční zesilovač | 16 |
| Obrázek 8 Operační zesilovač, sumační zesilovač | 17 |
| Obrázek 9 Operační zesilovač zapojen jako komparátor..... | 17 |
| Obrázek 10 Ukázka bílého šumu | 19 |
| Obrázek 11 Porovnání mezi bílým a růžovým šumem..... | 19 |
| Obrázek 12 Schéma zapojení modulu | 24 |
| Obrázek 13 Simulační kontrola vypočítaných hodnot modulu | 28 |
| Obrázek 14 Simulace pracovního bodu, řešení pro 5 V, tranzistor 2N3904 | 29 |
| Obrázek 15 Simulace pracovního bodu, řešení pro 5 V, tranzistor BC550B | 30 |
| Obrázek 16 Schéma simulace zesílení pro $U_{CE} = 5\text{ V}$ | 30 |
| Obrázek 17 Simulace zesílení pro $U_{CE} = 5\text{ V}$ | 31 |
| Obrázek 18 Simulace Johnsonova šumu pro $U_{CE} = 15\text{ V}$, $I_C = 200\text{ }\mu\text{A}$, pásmo 10 Hz – 10 kHz..... | 32 |
| Obrázek 19 Simulace Johnsonova šumu pro $U_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 200\text{ }\mu\text{A}$, , pásmo 10 Hz – 10 kHz..... | 32 |
| Obrázek 20 Schéma modulu pro $U_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 200\text{ }\mu\text{A}$ | 33 |
| Obrázek 21 Pohled na plošný spoj modulu pro $U_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 200\text{ }\mu\text{A}$ | 34 |
| Obrázek 22 Schéma základní desky | 36 |
| Obrázek 23 Základní deska, pohled na desku plošných spojů | 39 |
| Obrázek 24 Zapojená základní deska, měření dat | 40 |
| Obrázek 25 Vektorový analyzátor BODE 100 | 41 |
| Obrázek 26 Ukázka naměřených dat vzorek č.1, 5 V / 200 μA | 41 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tabulka 1 Vypočítané hodnoty jednotlivých modulů..... | 28 |
| Tabulka 2 Zesílení a nové hodnoty rezistoru R5 pro $U_{CE} = 5\text{ V}$ | 31 |
| Tabulka 3 Naměřené hodnoty SNR | 41 |

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Simulace pracovního bodu tranzistoru pro $U_{CE} = 10 \text{ V}$, tranzistor 2N3904

Příloha P II: Simulace pracovního bodu tranzistorů $U_{CE} = 10 \text{ V}$, tranzistor BC550

Příloha P III: Simulace pracovního bodu tranzistorů $U_{CE} = 15 \text{ V}$, tranzistor 2N3904

Příloha P IV: Simulace pracovního bodu tranzistorů $U_{CE} = 15 \text{ V}$, tranzistor BC550

Příloha P V: Simulace zesílení tranzistorů $U_{CE} = 10 \text{ V}$

Příloha P VI: Simulace zesílení tranzistorů $U_{CE} = 15 \text{ V}$

Příloha P VII: Tabulky simulovaných hodnot $U_{CE} = 10 \text{ V}$

Příloha P VIII: Tabulky simulovaných hodnot $U_{CE} = 15 \text{ V}$

Příloha P IX: Schéma a plošný spoj pro $U_{CE} = 5 \text{ V}$, $I_C = 500 \mu\text{A}$

Příloha P X: Schéma a plošný spoj pro $U_{CE} = 5 \text{ V}$, $I_C = 1000 \mu\text{A}$

Příloha P XI: Schéma a plošný spoj pro $U_{CE} = 10 \text{ V}$, $I_C = 200 \mu\text{A}$

Příloha P XII: Schéma a plošný spoj pro $U_{CE} = 10 \text{ V}$, $I_C = 500 \mu\text{A}$

Příloha P XIII: Schéma a plošný spoj pro $U_{CE} = 10 \text{ V}$, $I_C = 1000 \mu\text{A}$

Příloha P XIV: Schéma a plošný spoj pro $U_{CE} = 15 \text{ V}$, $I_C = 200 \mu\text{A}$

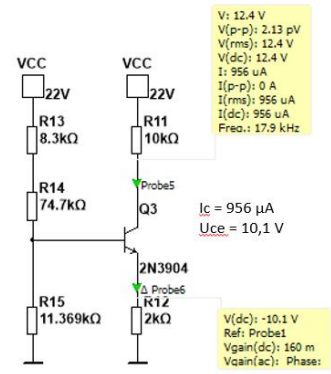
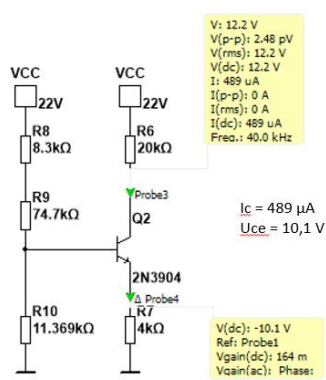
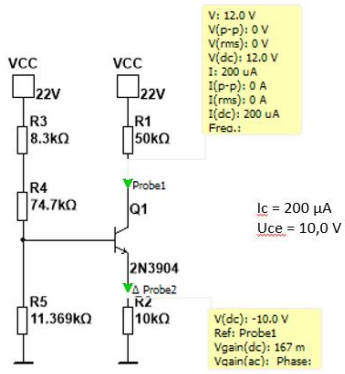
Příloha P XV: Schéma a plošný spoj pro $U_{CE} = 15 \text{ V}$, $I_C = 500 \mu\text{A}$

Příloha P XVI: Schéma a plošný spoj pro $U_{CE} = 15 \text{ V}$, $I_C = 1000 \mu\text{A}$

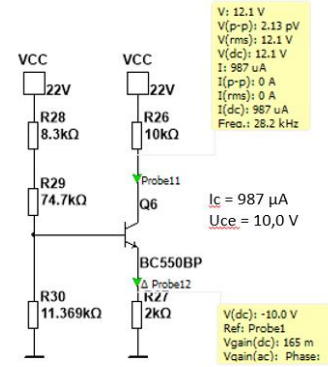
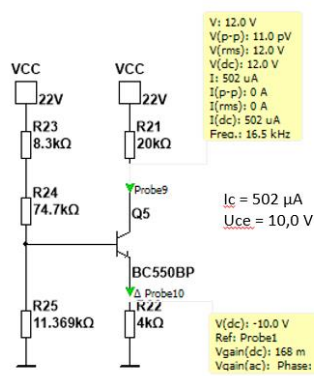
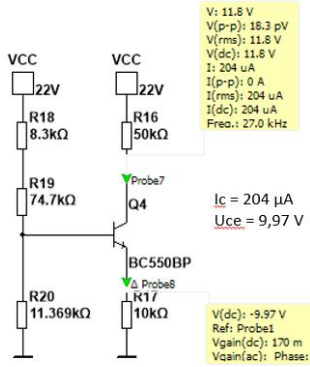
Příloha P XVII: Realizované moduly

Příloha P XVIII: Realizovaná základní deska

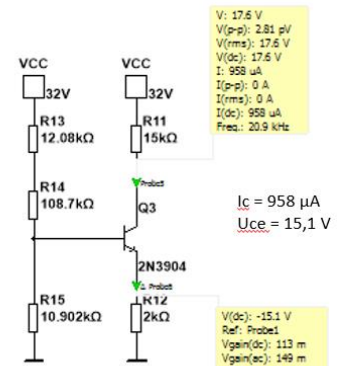
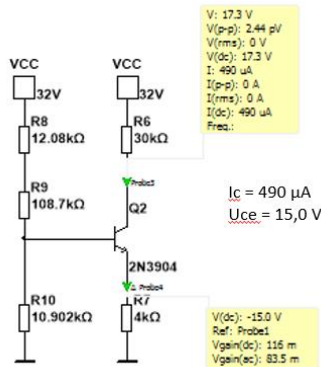
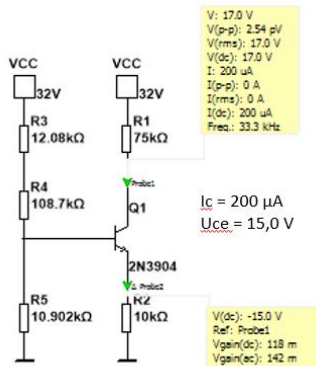
PŘÍLOHA P I: Simulace pracovního bodu tranzistoru $U_{CE} = 10\text{ V}$, tranzistor 2N3904



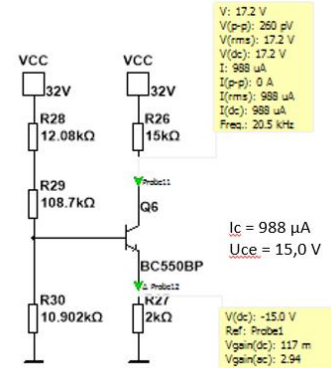
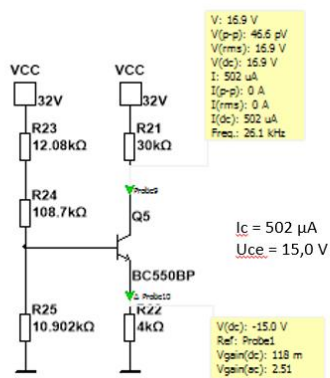
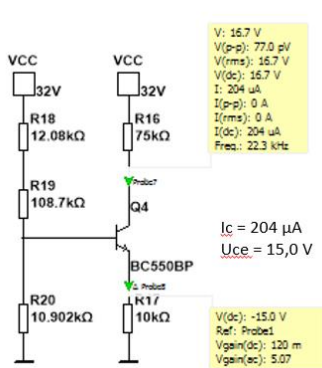
PŘÍLOHA P II: Simulace pracovního bodu tranzistoru $U_{CE} = 10\text{ V}$, tranzistor BC550



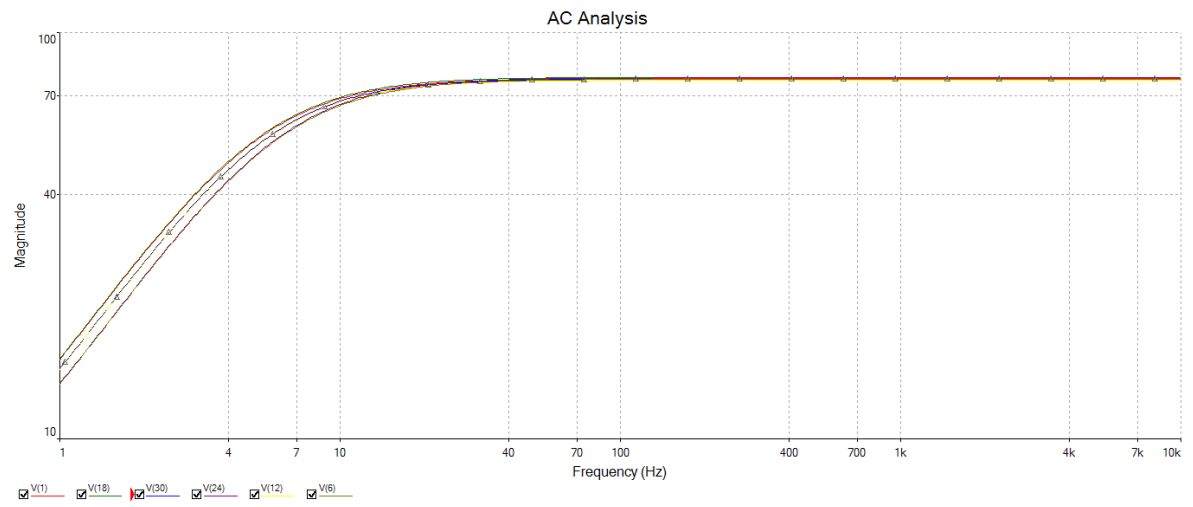
PŘÍLOHA P III: Simulace pracovního bodu tranzistoru $U_{CE} = 15\text{ V}$, tranzistor 2N3904



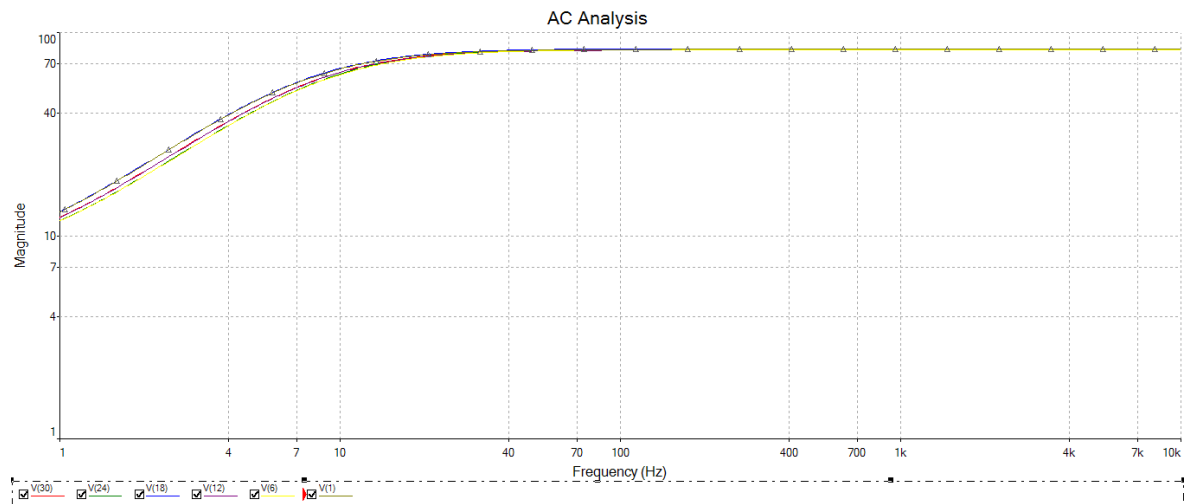
PŘÍLOHA P IV: Simulace pracovního bodu tranzistoru $U_{CE} = 15\text{ V}$, tranzistor BC550



PŘÍLOHA P V: Simulace zesílení tranzistorů $U_{CE} = 10\text{ V}$



PŘÍLOHA P VI: Simulace zesílení tranzistorů $U_{CE} = 15\text{ V}$



PŘÍLOHA P VII: Tabulka simulovaných hodnot, $U_{CE} = 10\text{ V}$

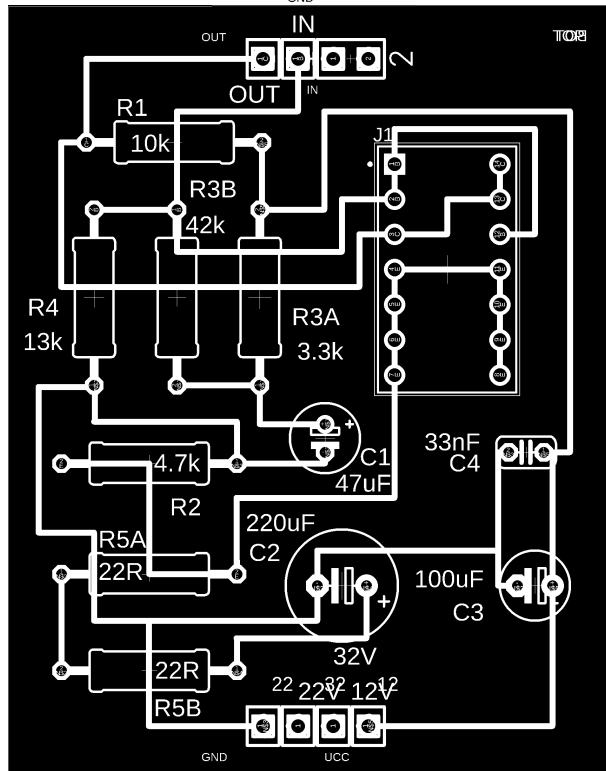
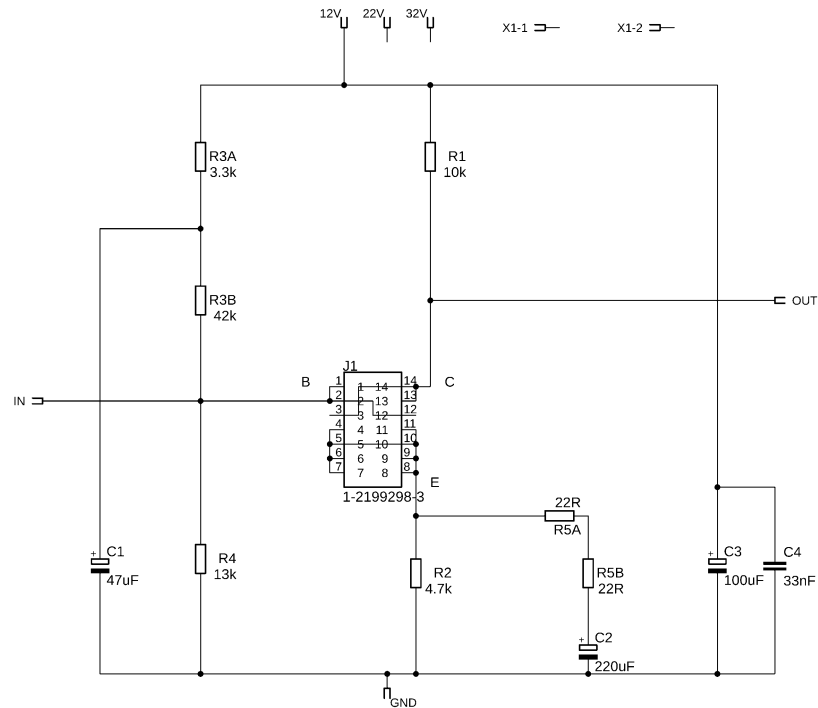
| Tranzistor | R5 [Ω] | C [μF] | Zesílení | Odchylka v dB | Nový R [Ω] | Nový C [μF] | Výsledné zesílení | Odchylka v dB |
|------------|-----------------|---------------------|----------|---------------|---------------------|--------------------------|-------------------|---------------|
| 2N3904 | 526 | 47 | 76,97 | -2,27 dB | 365 | 100 | 99,85 | -0,01 dB |
| | 210 | 100F | 76,75 | -2,30 dB | 145 | 220 | 99,73 | -0,02 dB |
| | 105 | 220 | 76,3 | -2,35 dB | 21 | 470 | 99,40 | -0,05 dB |
| BC550 | 526 | 47 | 77,61 | -2,20 dB | 365 | 100 | 100,78 | +0,07 dB |
| | 210 | 100 | 77,34 | -2,23 dB | 145 | 220 | 100,63 | +0,05 dB |
| | 105 | 220 | 76,87 | -2,28 dB | 21 | 470 | 100,29 | +0,03 dB |

PŘÍLOHA P VIII: Tabulka simulovaných hodnot, $U_{CE} = 15\text{ V}$

| Tranzistor | R5 [Ω] | C [μF] | Zesílení | Odchylka v dB | Nový R [Ω] | Nový C [μF] | Výsledné zesílení | Odchylka v dB |
|------------|-----------------|---------------------|----------|---------------|---------------------|--------------------------|-------------------|---------------|
| 2N3904 | 810 | 22 | 82,64 | -1,65 dB | 635 | 47 | 99,47 | -0,05 dB |
| | 324 | 47 | 82,42 | -1,68 dB | 145 | 100 | 99,71 | -0,03 dB |
| | 162 | 100 | 82,11 | -1,71 dB | 21 | 220 | 99,83 | -0,02 dB |
| BC550 | 810 | 22 | 83,23 | -1,59 dB | 635 | 47 | 100,23 | +0,02 dB |
| | 324 | 47 | 82,96 | -1,62 dB | 145 | 100 | 100,42 | +0,04 dB |
| | 162 | 100 | 82,60 | -1,66 dB | 21 | 220 | 100,50 | +0,04 dB |

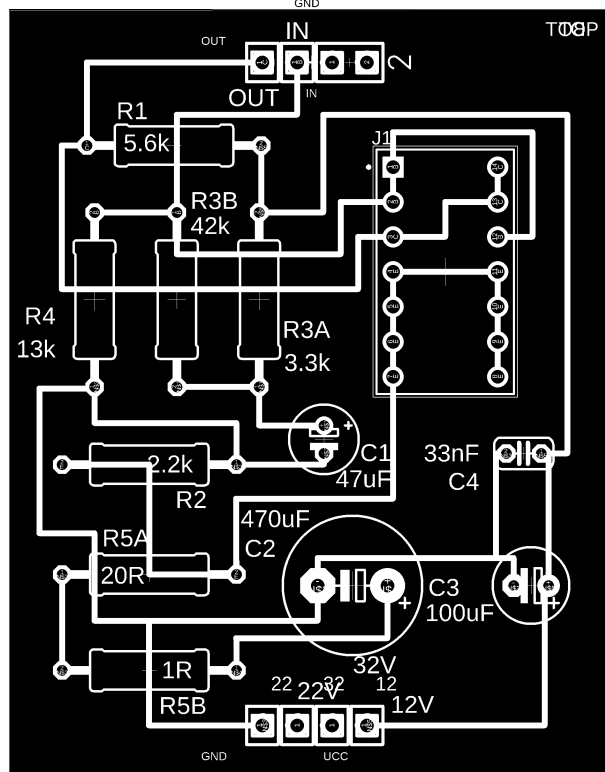
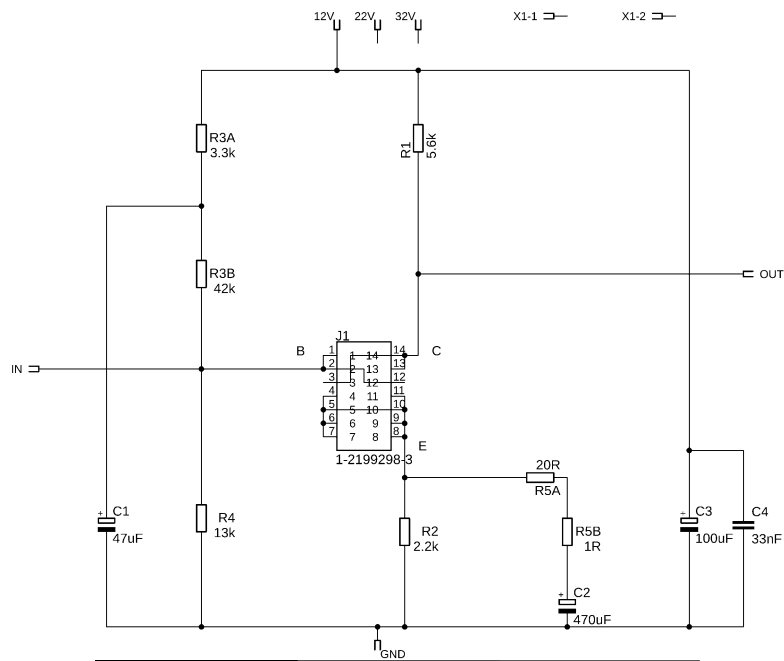
PŘÍLOHA P IX: SCHÉMA A PLOŠNÝ SPOJ PRO $U_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 500\ \mu\text{A}$

μA



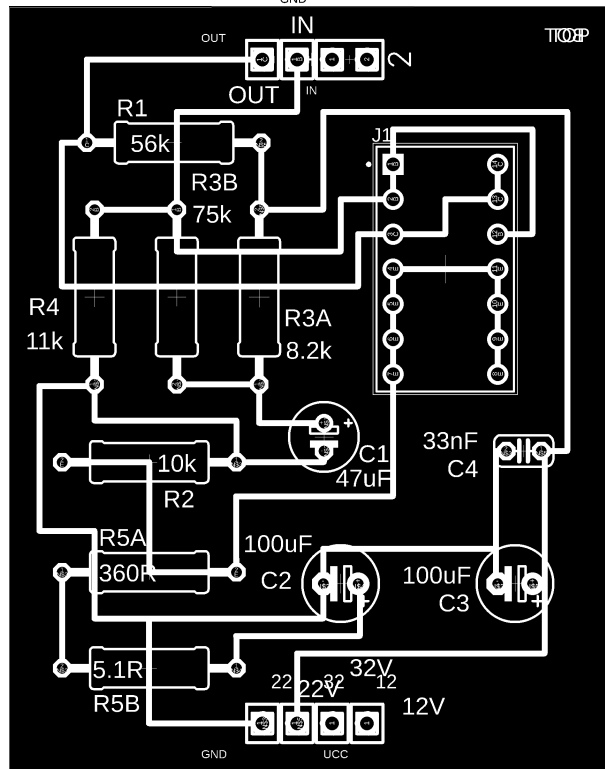
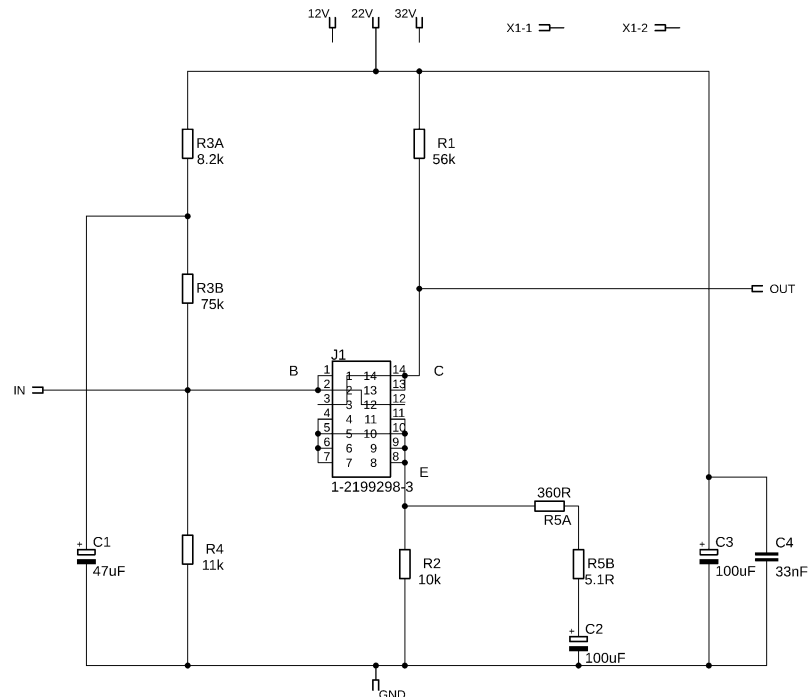
PŘÍLOHA P X: SCHÉMA A PLOŠNÝ SPOJ PRO $U_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 1000\ \mu\text{A}$

μA



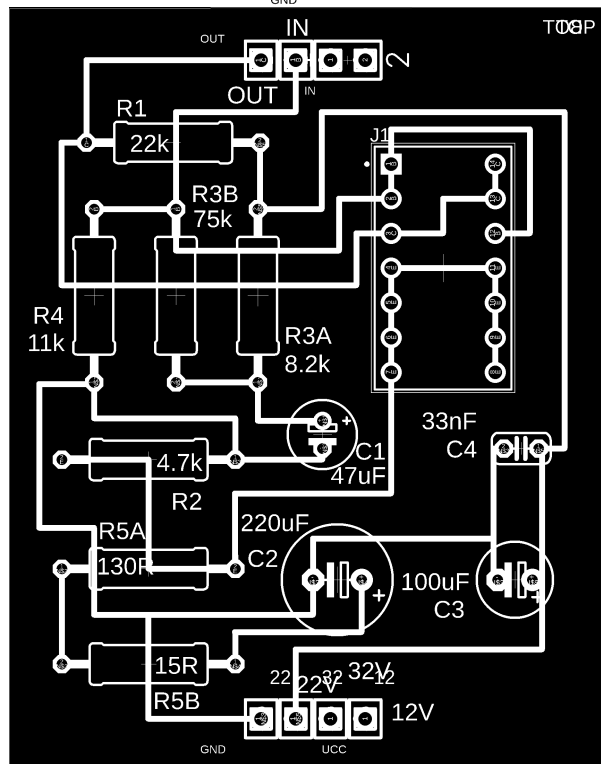
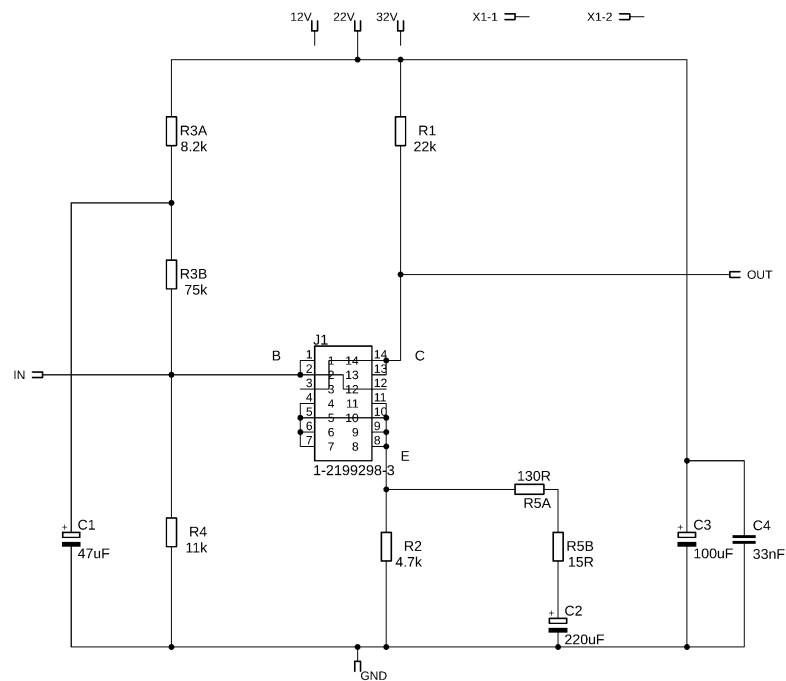
PŘÍLOHA P XI: SCHÉMA A PLOŠNÝ SPOJ PRO $U_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 200\ \mu\text{A}$

μA

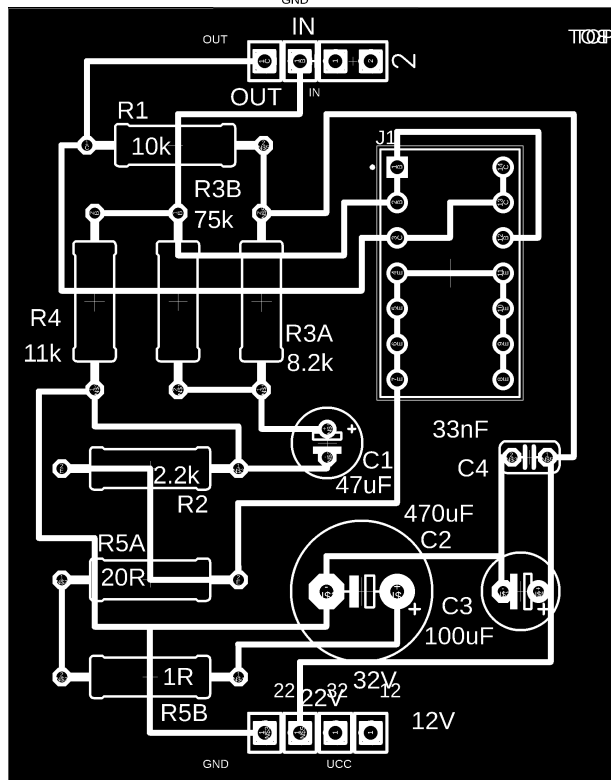
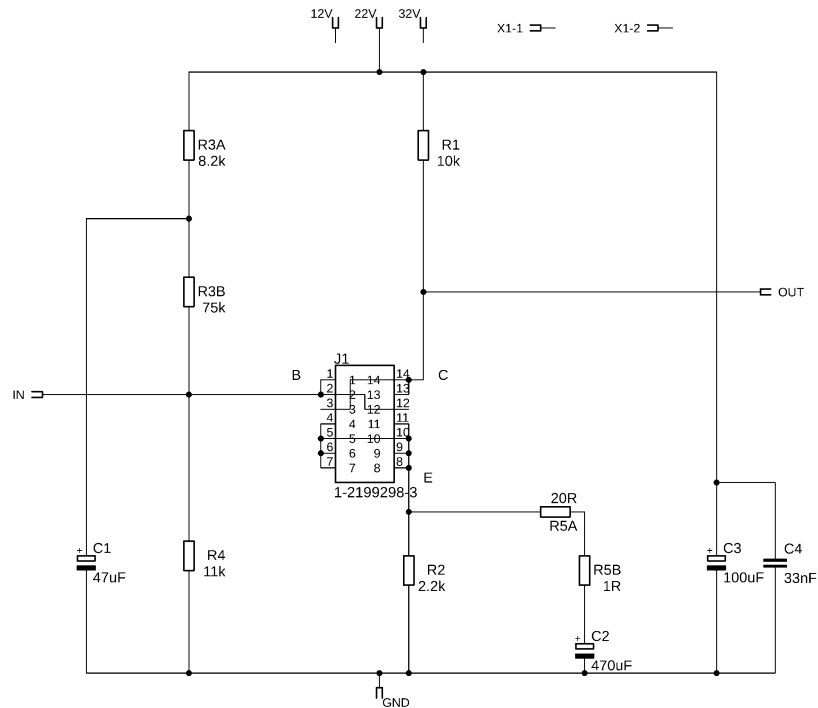


PŘÍLOHA P XII: SCHÉMA A PLOŠNÝ SPOJ PRO $U_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 500\ \mu\text{A}$

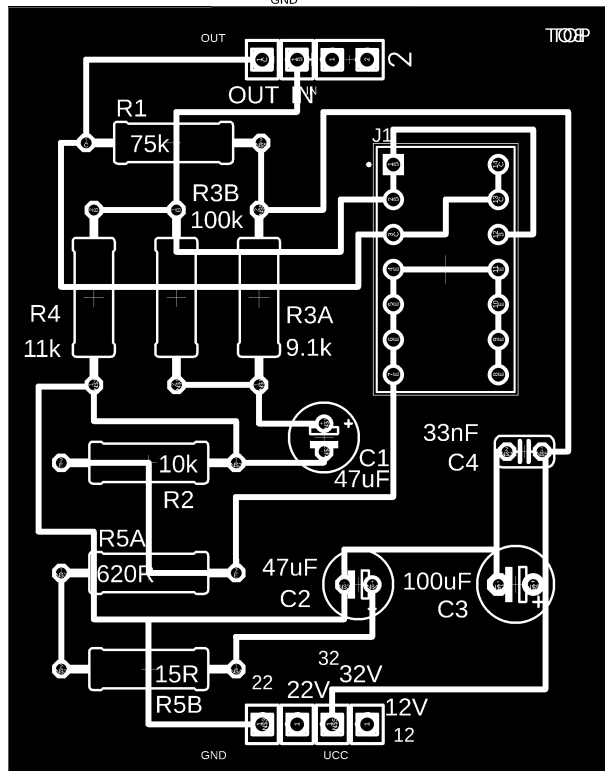
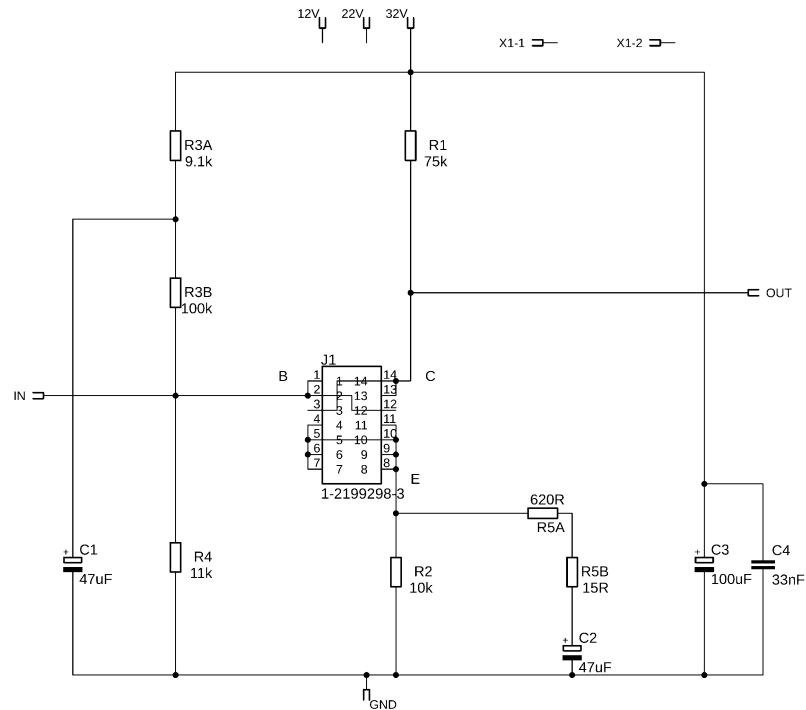
μA



PŘÍLOHA P XIII: SCHÉMA A PLOŠNÝ SPOJ PRO $U_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 1000\ \mu\text{A}$

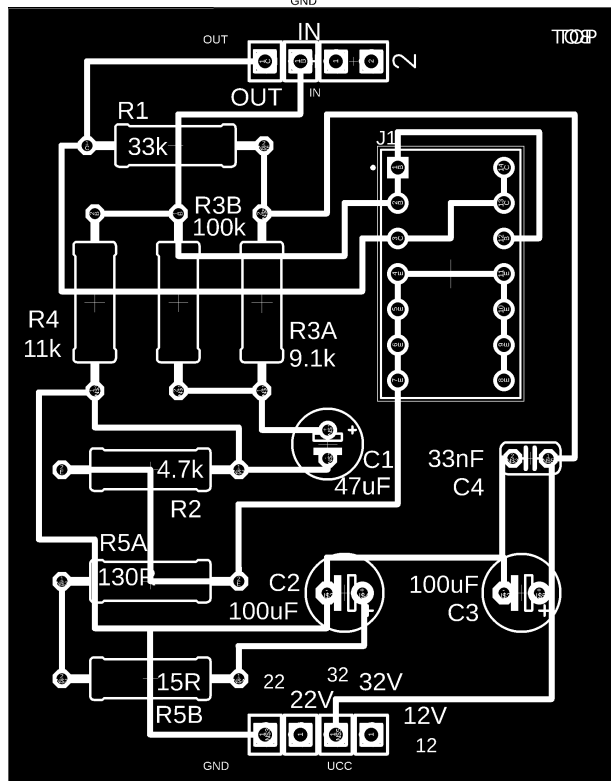
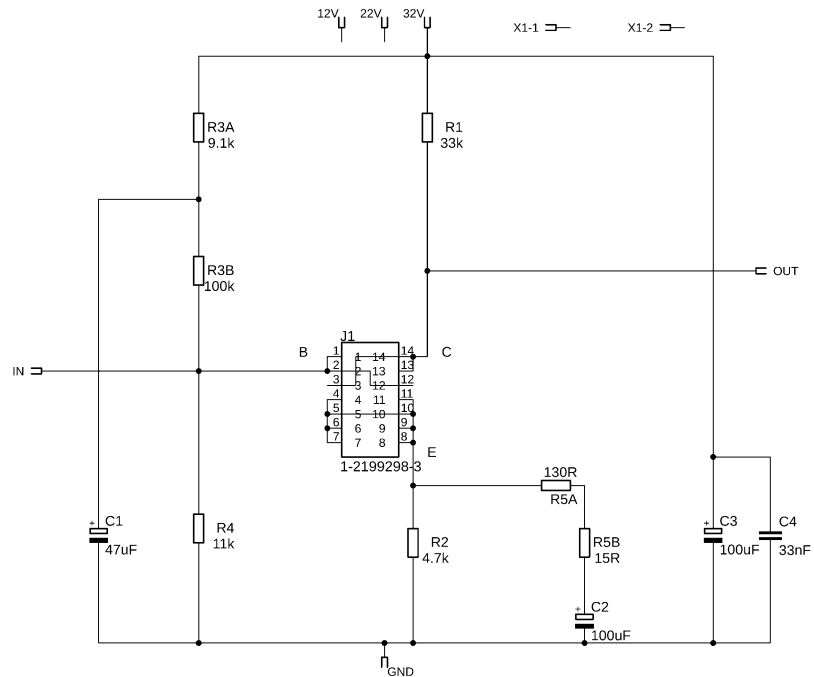


PŘÍLOHA P XIV: SCHÉMA A PLOŠNÝ SPOJ PRO $U_{CE} = 15\text{ V}$, $I_C = 200\ \mu\text{A}$

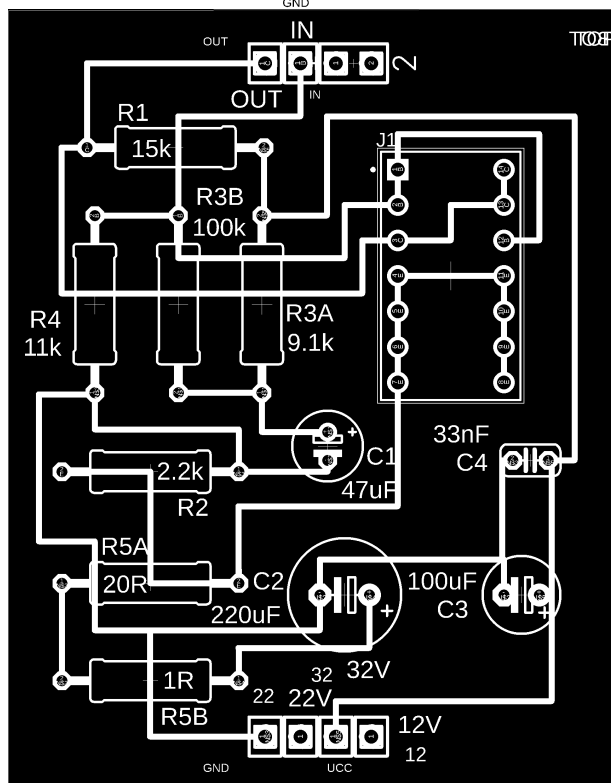
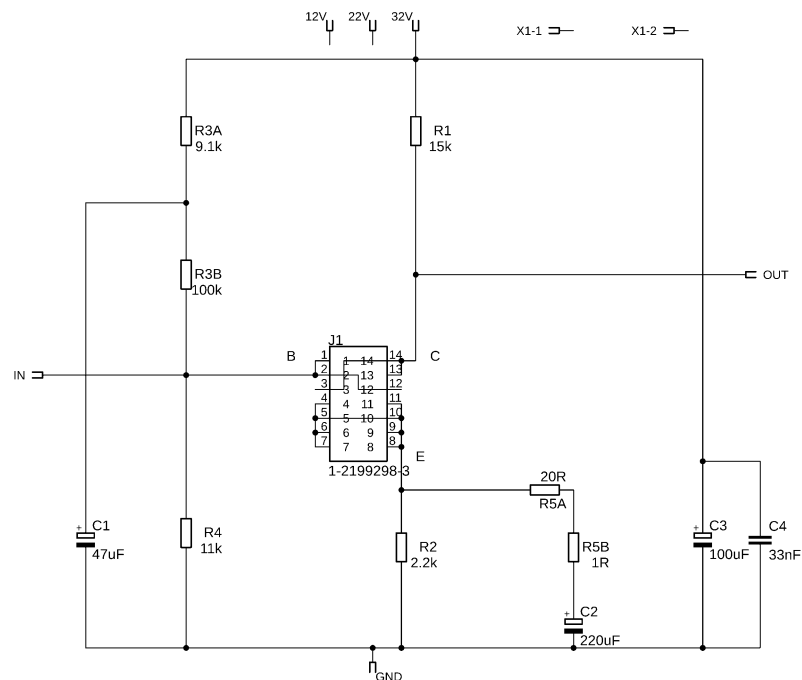


PŘÍLOHA P XV: SCHÉMA A PLOŠNÝ SPOJ PRO $U_{CE} = 15\text{ V}$, $I_C = 500\ \mu\text{A}$

μA



PŘÍLOHA P XVI: SCHÉMA A PLOŠNÝ SPOJ PRO $U_{CE} = 15\text{ V}$, $I_C = 1000\ \mu\text{A}$



PŘÍLOHA P XVII: REALIZOVANÉ MODULY



PŘÍLOHA P XVIII: REALIZOVANÁ ZÁKLADNÍ DESKA

