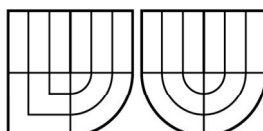


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘÍCÍ TECHNIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŠIROKOPÁSMOVÝ NÍZKOŠUMOVÝ PŘEDZESILOVAČ

BROADBAND LOWNOISE PREAMPLIFIER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

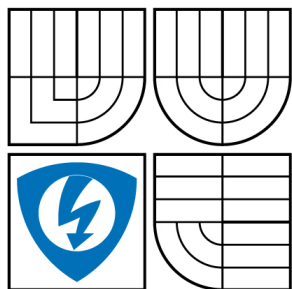
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

KAMIL VARGA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí
techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Automatizační a měřicí technika

Student: Varga Kamil

ID: 83163

Ročník: 3

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Širokopásmový nízkošumový předzesilovač

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou návrhu širokopásmových nízkošumových zesilovačů. Navrhněte a realizujte zesilovač s těmito parametry:

- napájení 24V
- frekvenční rozsah 20 kHz - 2 MHz
- vstupní šum < 10uV

Parametry realizovaného zesilovače proměřte.

Dbejte pokynů vedoucího projektu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 1.2.2008

Termín odevzdání: 2.6.2008

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav automatizace a měřicí techniky

ŠIROKOPÁSMOVÝ NÍZKOŠUMOVÝ PŘEDZESILOVAČ

Vedoucí: **doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.**

ABSTRAKT

Bakalářská práce popisuje problematiku širokopásmových nízkošumových předzesilovačů a podmínky jejich návrhu včetně desky plošných spojů. Dále se práce zabývá oživováním a proměřováním nejdůležitějších parametrů těchto zesilovačů. Všechny tyto problematiky jsou vysvětleny na dvou praktických řešeních.

KLÍČOVÁ SLOVA

Šum, předzesilovač, zesilovač, měření na zesilovači, MAX414

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Control and Instrumentation

BROADBAND LOWNOISE PREAMPLIFIER

Supervisor: **doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.**

ABSTRACT

The bachelor thesis describes the problems of broadband low-noise preamplifiers and the conditions of their design, including their printed circuit board. Furthermore, the thesis considers debugging and measuring of the most important parameters of these amplifiers. All of these problems are explained on two practical solutions.

KEYWORDS

Noise, preamplifier, amplifier, measurement of the amplifier, MAX414

Bibliografická citace

VARGA, K. *Širokopásmový nízkošumový předzesilovač*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 50 s., 10 příloh. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma "širokopásmový nízkošumový předzesilovač" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne :

Podpis:

Poděkování

Děkuji tímto panu doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za cenné připomínky a odborné rady při vypracování bakalářské práce.

V Brně dne :

Podpis:

OBSAH

1. ÚVOD	5
2. PROBLEMATIKA ŠUMU	7
2.1 Druhy šumu	7
2.1.1 Tepelný šum	7
2.1.2 Výstřelový šum	7
2.1.3 Partitivní šum	8
2.1.4 Lavinový šum	8
2.2 Optimalizace připojení předzesilovače	8
2.2.1 Šumové vlastnosti předzesilovače	9
2.2.2 Vstupní impedance předzesilovače	9
2.2.3 Výstupní impedance zdroje signálu	9
2.2.4 AC vazba	10
3. NÁVRH NÍZKOŠUMOVÝCH ŠIROKOPÁSMOVÝCH PŘEDZESILOVAČŮ	12
3.1 Návrh předzesilovače s použitím diskrétních součástek	12
3.1.1 První stupeň	13
3.1.2 Horní propust LC	13
3.1.3 Koncový stupeň	15
3.1.4 Zdroj pro diskrétní řešení	18
3.1.5 Umístění a DPS	18
Postup návrhu desky plošných spojů	18
Umístění již hotové a osazené DPS	19
3.2 Návrh předzesilovače s použitím integrovaných obvodů	21
3.2.1 Volba operačního zesilovače	21
3.2.2 Návrh prvního stupně	22
3.2.3 Horní propust	25
3.2.4 Druhý (koncový) stupeň	26
3.2.5 Napájení zesilovače	27
3.2.6 Výsledné zapojení a návrh DPS	28
4. OŽIVOVÁNÍ PŘEDZESILOVAČŮ	30

5. MĚŘENÍ NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH PARAMETRŮ ZESILOVAČŮ	33
5.1 Měření vstupní impedance	33
5.2 Měření výstupní impedance	33
5.3 Měření amplitudové frekvenční charakteristiky	34
5.4 Měření fázové frekvenční charakteristiky.....	34
5.5 Měření šumu	35
6. SROVNÁNÍ PARAMETRŮ PŘEDZESILOVAČŮ	37
6.1 Příklady výpočtu	38
6.2 Zhodnocení naměřených údajů	39
7. ZÁVĚR	41
8. LITERATURA	42

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Vliv AC vazby [2]	10
Obrázek 2 Návrh prvního stupně z diskretních součástek	13
Obrázek 3 Horní propust z diskretních součástek.....	14
Obrázek 4 Principiální schéma zapojení koncového stupně	15
Obrázek 5 Koncový stupeň realizovaný z diskretních součástek	16
Obrázek 6 Celkové schéma zapojení předzesilovače z diskretních součástek	17
Obrázek 7 Realizace napájení pro diskretní řešení	18
Obrázek 8 Umístění DPS v krabici.....	20
Obrázek 9 Pohled na celé řešení zepředu.....	20
Obrázek 10 - Frekvenční a fázová charakteristika obvodu MAX414 s volbou pracovního bodu.....	22
Obrázek 11 - Invertující zapojení prvního stupně.....	23
Obrázek 12 Diferenční zapojení prvního stupně.....	24
Obrázek 13 Výsledné zapojení prvního stupně.....	24
Obrázek 14 Horní propust.....	25
Obrázek 15 Zapojení koncového stupně přímo v horní propusti.....	26
Obrázek 16 Řešení napájení předzesilovače	27
Obrázek 17 Výsledné zapojení předzesilovače z integrovaných obvodů	29
Obrázek 18 Testování navrženého zapojení na kontaktním poli	30
Obrázek 19 Redukce SMD obvodu do kontaktního pole.....	31
Obrázek 20 Oživovací schéma.....	32
Obrázek 21 Měření vstupní impedance.....	33
Obrázek 22 Měření výstupní impedance.....	34
Obrázek 23 Měření amplitudové frekvenční charakteristiky.....	34
Obrázek 24 Měření fázové frekvenční charakteristiky	35
Obrázek 25 Ziskové frekvenční charakteristiky předzesilovačů	39

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Srovnání parametrů možných operačních zesilovačů.....	22
Tabulka 2 Naměřené hodnoty frekvenční charakteristiky jednotlivých předzesilovačů	37
Tabulka 3 Spočítané hodnoty zisku a zesílení	38

SEZNAM ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
ss	-	Stejnoseměrný
OZ	-	Operační zesilovač
K	-	Zesílení
NF	-	Nízkofrekvenční
PN	-	Positiv-Negativ
VF	-	Vysokofrekvenční
Z	-	Zesilovač
DPS	-	Deska plošných spojů
K	-	Zesílení
U	volt	Elektrické napětí
A	ampér	Jednotka elektrického proudu
V	volt	Jednotka elektrického napětí
Ω	ohm	Jednotka elektrického odporu
Au	decibel	Zisk
Všš (Vpp)	volt	Špičkové napětí
R	ohm	Elektrický odpor
H	henry	Jednotka elektromagnetické indukce
C	farad	Elektrická kapacita
dB	decibel	Jednotka zisku
f	hertz	Frekvence

1. ÚVOD

Předkládaná bakalářská práce se zabývá problematikou nízkošumových širokopásmových předzesilovačů. V prvních kapitolách je cílem práce seznámit čtenáře s problematikou šumu a optimalizací obvodů pro práci s minimálním šumem. V dalších kapitolách je čtenář seznámen s návrhem nízkošumových předzesilovačů, co se týče obvodového řešení, ale také návrhem desky plošných spojů a v neposlední řadě také konstrukčního řešení a umístění celého obvodu. Tento návrh je koncipován dvěma různými cestami. První z cest je návrh předzesilovače z diskretních součástek a druhou potom návrh z integrovaných obvodů. Čtenář zde tedy je postaven před dvě konkrétní řešení, jejichž funkce je v kapitolách patřičně vysvětlena. První z řešení je založeno na zapojení starém více, jak 20 let s použitím moderních náhrad za použité součástky. Hlavním cílem celé práce bylo toto zapojení pochopit, znovu sestavit a proměřit. Druhé řešení je postaveno na moderních nízkošumových technologiích. V koncové fázi práce je uvedeno ožiování předzesilovačů, možné problémy s ožiováním a jejich řešení. Jakmile je ukončen proces ožiování, tak je předložen postup proměřování nejdůležitějších vlastností předzesilovačů s nízkým šumem a obecně zesilovačů. Nakonec jsou všechna uvedená řešení zhodnocena. Ve zhodnocení a v samotném závěru práce jsou také uvedeny problémy, které nastaly při realizaci jednotlivých obvodů a nastínění jejich dalších možných řešení.

Za úspěchy, které tato práce přinesla, považuji vyřešený problém s frekvenčním rozsahem a napájením diskretního řešení předzesilovače. Tyto úpravy umožňovaly předzesilovači doslovné splnění požadavků zadání práce. Dalším úspěchem byla realizace předzesilovače z integrovaných obvodů na kontaktním poli. Ten sice nepracoval s konstantním zesílením v celém pásmu zadaných frekvencí, ovšem tato skutečnost byla s největší pravděpodobností dána právě řešením na kontaktním poli. Zde se totiž zvláště při vyšších frekvencích mohly projevit parazitní kapacity vývodů a samotného kontaktního pole. Neúspěchy celé práce jsou zřejmě v řešení desek plošných spojů. I když se tyto držely metodiky návrhu i pro vysoké frekvence a nízký šum, tak řešení zde selhávala. U prvního řešení, jak je v kapitole zhodnocení uvedeno, docházelo k rezonančnímu převýšení a to značně

záviselo i na kvalitě desky plošných spojů. V případě druhého řešení se při oživování na desce plošných spojů předzesilovač okamžitě rozkmital konstantními kmity. Rezervu celého řešení tedy vidím právě v návrhu desek plošných spojů. Ty musejí být lépe chráněny proti vnějším elektromagnetickým vlivům (v případě druhého řešení) a také budou muset být lépe vyřešeny jejich parazitní kapacity (případ prvního i druhého řešení).

Uvedené prameny v literatuře jsou výbornými zdroji informací k problematikám šumu a návrhům aktivních elektronických obvodů. V těchto pracích se jde značně do hloubky a bude-li se čtenář chtít vážněji zabývat některou z problematik, tak zdroje vřele doporučuji, zvláště pak [1],[2],[5]. Práce využívá některých důležitých poznatků z těchto pramenů a vyvozuje z nich důsledky a návrhy pro použití v širokopásmových a nízkošumových obvodech, stejně tak jako v předzesilovačích.

2. PROBLEMATIKA ŠUMU

Šum je náhodná, ve většině případů, parazitní veličina, která bývá v elektrotechnice reprezentována jako složka nasuperponovaná na užitečný signál. Tohoto šumu, stejně jako jeho zdrojů, bývá několik druhů vyskytujících se prakticky v jakémkoliv elektrickém přístroji či zařízení. V následujících podkapitolách jsou popsány jednotlivé druhy šumu a optimalizace připojení zdroje signálu k předzesilovači pro minimalizaci šumu.

2.1 DRUHY ŠUMU

V této kapitole jsou popsány jednotlivé druhy a zdroje šumu a také způsoby jak se jim vyhnout nebo je minimalizovat. Následující druhy šumu jsou také podrobněji popsány např. v [1],[4] a zde jsou uvedeny pouze obecně pro úplnost vysvětlení. Šumů existuje podstatně větší škála, než je zde uvedena, ale v dané problematice se neprojeví nebo jsou na daném spektru frekvencí již zanedbatelné a není třeba je uvažovat.

2.1.1 Tepelný šum

Tento druh šumu bývá přítomen u všech obvodových prvků s odporovým charakterem a pracovní teplotou větší než je absolutní nula. Je dán pohybem nosičů, které se vlivem teploty samy uvolňují a na svorkách prvku tak vzniká rozdíl potenciálu. Tepelný šum se vyskytuje ovšem i u kondenzátorů s velkým ztrátovým činitelem (elektrolytické kondenzátory). Omezení a minimalizace tohoto šumu tedy spočívá ve správné volbě obvodových prvků a dobrém chlazení přístroje či zařízení, po kterém požadujeme co nejmenší šum. Obecně platí, že při volbě součástek dáváme přednost v případě rezistorů metalizovaným před uhlíkovými a v případě kondenzátorů tantalovým před elektrolytickými.

2.1.2 Výstřelový šum

Výstřelový šum se projevuje pouze u PN přechodů (polovodičových součástek). Vzniká průchodem nosiče PN přechodem. Tento průchod vyvolá v konečném důsledku impuls proudu. Proud procházející PN přechodem tedy není spojitý, ale je sledem impulsů procházejících nosičů. Nosičů ovšem nikdy neprochází

přechodem za stejný časový okamžik stejné množství a proto je výsledný proud pouze střední hodnotou. Ve skutečnosti totiž proud nepatrně kolísá, což zanáší do obvodu šum. Omezit tento šum lze pouze volbou co možná nejmenšího ss proudu procházejícího PN přechodem.

2.1.3 Partitivní šum

Jedná se o šum často se vyskytující u aktivních prvků, který souvisí s náhodným rozdělením proudu mezi jednotlivými bránami dvojbranu. Tento druh šumu bývá obvyklý u bipolárních tranzistorů a omezit ho lze pouze volbou unipolárních tranzistorů místo bipolárních.

2.1.4 Lavinový šum

Lavinový šum vzniká u PN přechodů, které pracují v závěrném směru na napětí blízkém jejich průraznému napětí. V této oblasti začíná PN přechodem procházet zvýšený závěrný proud. Omezení lavinového šumu je celkem patrné z jeho principu a to volbou součástek s vyšším závěrným napětím nebo úpravou návrhu obvodu na takový, ve kterém nevzniká tak velké závěrné napětí PN přechodů.

Z uvedených šumů se v zapojení předzesilovače nejvíce projevuje šum tepelný a výstřelový. Pro bližší studium výše uvedených druhů šumů a mnoha dalších, lze využít literaturu [1]. V této literatuře je uveden podrobnější popis a jsou zde také uvedeny vztahy pro výpočet jednotlivých šumů.

2.2 OPTIMALIZACE PŘIPOJENÍ PŘEDZESILOVAČE

Při řešení konkrétního problému lze předzesilovač optimalizovat i pro daný zdroj signálu a tím podstatně snížit šumové pozadí. V této podkapitole je vysvětleno, jak upravit předzesilovač nebo jakými pravidly se řídit při návrhu předzesilovače pro konkrétní zdroj signálu (např. snímač). Níže uvedené poznatky jsou také podrobněji popsány v práci [2] a zde jsou uvedeny pouze nejdůležitější fakta z této práce pro pochopení problematiky připojení zdroje signálu k předzesilovači.

2.2.1 Šumové vlastnosti předzesilovače

Vstupní šum předzesilovače je výrazně ovlivňován odporem připojovaného zdroje signálu. Tento šum bývá proudový pro vysoko-ohmové zdroje anebo napěťový pro nízko-ohmové zdroje signálu. Zlomová hodnota tohoto odporu je zhruba $10\text{k}\Omega$, která je neoptimálnějším kompromisem pro napěťový a proudový šum. U praktických řešení se můžeme setkat pouze se dvěma druhy možných vstupů předzesilovačů danými volbou technologie tranzistorů. Těmito druhy jsou bipolární a unipolární tranzistory. Dle hodnoty odporu zdroje signálu tedy volíme:

- Pro $R_{\text{vst}} \gg 10\text{k}\Omega$ zapojení s unipolárními tranzistory na vstupu. Jelikož ty zesilují napěťově. Proudový šum, který se u těchto hodnot odporů projevuje, se nebude vstupním zesilovačem zesilovat.
- Pro $R_{\text{vst}} \ll 10\text{k}\Omega$ zapojení s bipolárními tranzistory. Z opačného důvodu než v případě unipolárních. Zdrojový signál obsahuje napěťový šum, který není bipolárními tranzistory zesilován.

2.2.2 Vstupní impedance předzesilovače

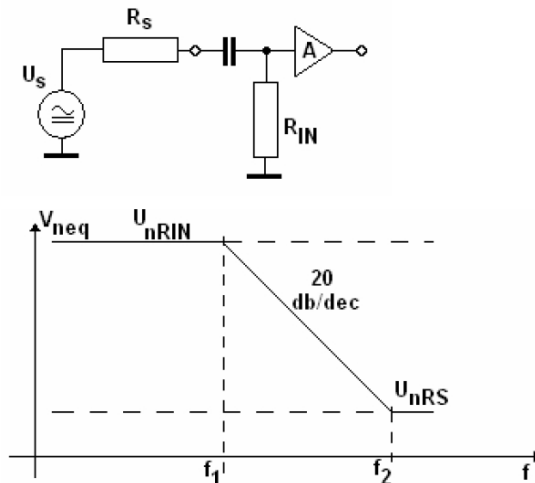
Problém vstupní impedance není sice přímo spjat se šumem, ale při návrhu je také velice důležitý. Na vstupní kapacitě záleží totiž mezní frekvence předzesilovače zvláště pro vysoce-ohmové zdroje signálu. Řešení tohoto problému spočívá v minimalizaci vstupní kapacity nebo snížení vstupního odporu (děličem) s adekvátním zesílením, což má bohužel za následek vzrůst šumu.

2.2.3 Výstupní impedance zdroje signálu

Dalším možným problémem je výstupní impedance zdroje signálu. Ten totiž nemusí být pouze rezistivního charakteru. V těchto případech se používají, jak napěťové zesilovače, tak proudové zesilovače, dle charakteru impedance zdroje. Vstupní odpor napěťového zesilovače (nebo proudového) by měl být co největší. To sice zvyšuje teplotní šum, ale vylepšuje frekvenční charakteristiky předzesilovače. V těchto případech totiž spolu s kapacitním (induktivním) charakterem zdroje tvoří vstupní odpor předzesilovače dolní propust.

2.2.4 AC vazba

Posledním popisovaným problémem optimalizací předzesilovače je vliv AC (střídavé) vazby. Tento efekt se projevuje u střídavé vazby stejnosměrného zdroje signálu (viz. Obrázek 1).



Obrázek 1 - Vliv AC vazby [2]

Jestliže máme vysoký vstupní odpor R_{IN} předzesilovače A a malý vnitřní odpor zdroje signálu R_S , pak mezi frekvencemi f_2 a f_1 vznikne zvyšující se šum. Toto je způsobeno působením časových konstant $C_C R_{IN}$ a $C_C R_S$. Pro jednotlivé frekvence platí vztahy:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_{IN} C_C} \quad (2.1)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi R_S C_C} \quad (2.2)$$

V případě AC vazby je tedy nejvhodnější použít co nejmenší vstupní kapacitu C_C .

Jak je tedy z výše uvedených informací patrné, tak i problematika optimálního připojení zdroje signálu může značně ovlivnit výsledný šum celého zapojení předzesilovač + zdroj signálu. Proto, pokud známe předem použití

navrhovaného předzesilovače (např. pro snímač) je vhodný návrh předzesilovače optimalizovaný na dané požadavky a vlastnosti zdroje.

3. NÁVRH NÍZKOŠUMOVÝCH ŠIROKOPÁSMOVÝCH PŘEDZESILOVAČŮ

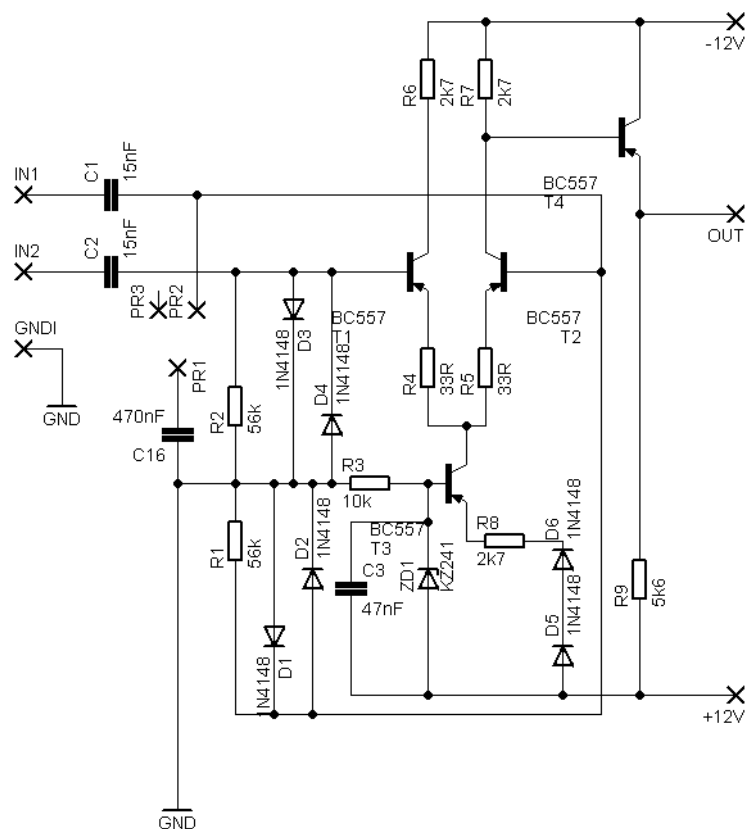
Tato kapitola předkládá dvě možnosti řešení návrhu předzesilovačů, přičemž každý návrh vychází z jiné použité technologie. První vychází z diskrétních součástek, zatímco druhý z integrovaného obvodu. Oba návrhy jsou principiálně popsány a druhý návrh také obohacen o výpočty všech stupňů.

3.1 NÁVRH PŘEDZESILOVAČE S POUŽITÍM DISKRÉTNÍCH SOUČÁSTEK

Toto zapojení vychází z přes 20 let starého návrhu uvedeného v [3], kde se také nachází podrobný popis včetně výpočtů obvodu. Obvod je prvně přetransformován na moderní součástky použitím vhodných náhrad. Následně jsou přepočítány hodnoty jednotlivých filtrů na frekvence uvedené v zadání. Pro takto vytvořené zapojení je navržena deska plošných spojů. V poslední části je vyřešeno napájení celého obvodu pomocí „modulu“ zdroje, který upravuje napájení ze zadaného nesymetrického na potřebné symetrické. Nakonec jsou předzesilovač i zdroj umístěny do vhodné krabičky.

3.1.1 První stupeň

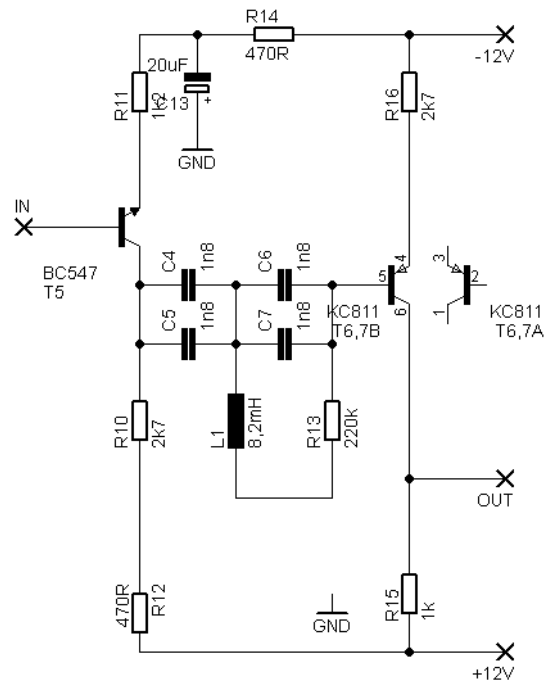
Schéma zapojení prvního stupně je uvedeno na Obrázek 2. Tento stupeň je vytvořen, jako rozdílový zesilovač tvořený tranzistory T_1 a T_2 napájený zdrojem konstantního proudu. Zdroj je tvořen tranzistorem T_3 , zenerovou diodou ZD_1 a dvěma křemíkovými diodami D_5 a D_6 . Zenerova dioda způsobuje konstantní předpětí tranzistoru T_3 , který je tak otevřen se stabilním výstupním proudem. Diody D_5 a D_6 slouží, jako teplotní kompenzace zmiňované zenerovy diody. Tranzistor T_4 slouží pouze, jako oddělovací obvod, který odděluje vstupní část od dalších stupňů. Zároveň se tento obvod stará o to, aby připojením dalších stupňů nekleslo zesílení prvního stupně.



Obrázek 2 Návrh prvního stupně z diskretních součástek

3.1.2 Horní propust LC

Za prvním stupněm se nachází horní propust LC vytvořena, jako T článek. Celé její schéma je uvedeno na Obrázek 3. Původně je tato propust navržena na mezní frekvenci 100kHz a je tedy pro naše potřeby přepočítána.



Obrázek 3 Horní propust z diskretních součástek

Výpočet probíhal dle následujících vztahů:

$$L_1 = \frac{R}{4 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{2,2 \cdot 10^3}{4 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^4} = 8,75mH \quad (3.1)$$

$$C_1 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot R} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 2,2 \cdot 10^3} = 1,809nF \quad (3.2)$$

Výsledná kapacita C bude složena ze dvou C_1 a tyto budou dále rozděleny také na dvě, proto:

$$C = 2 \cdot C_1 \quad (3.3)$$

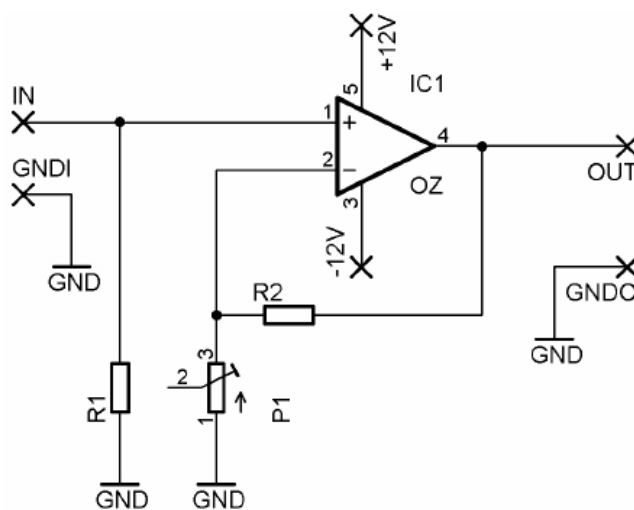
$$C_4 = C_6 = 1,8nF \quad (3.4)$$

$$C_5 = C_7 = 1,8nF \quad (3.5)$$

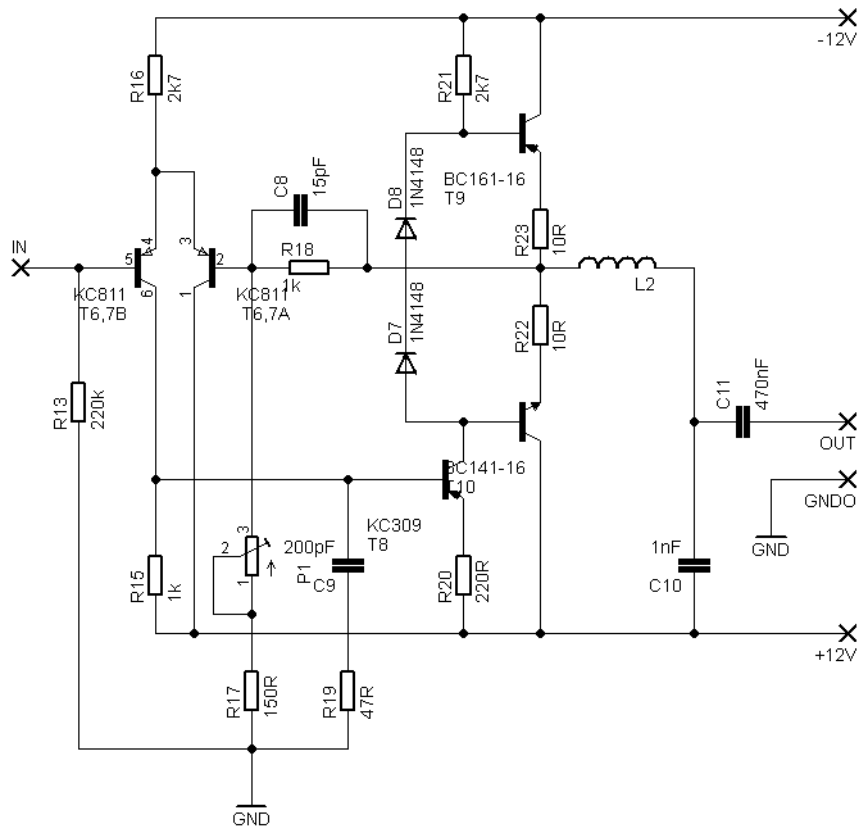
Jelikož výrobní řada nedovoluje zakoupit tlumivku 8,75mH, tak je použita nejbližší vhodná náhrada 8,2mH, která frekvenční rozsah nepatrně posune.

3.1.3 Koncový stupeň

Principiální schéma zapojení koncového stupně je uvedeno na Obrázek 4, výsledné schéma potom na Obrázek 5. Jak je z těchto obrázků vidět, tak je koncový stupeň vytvořen, jako operační zesilovač z diskretních součástek. Rozdílový zesilovač je vytvořen dvojitým tranzistorem $T_{6,7}$ typu KC811 (jediná původní součástka). Tímto zesilovačem je buzen tranzistor T_8 , který budí komplementární dvojici tranzistorů T_9 a T_{10} . Tyto tranzistory realizují výkonový stupeň ve třídě AB, protože na vstupu tranzistorů T_9 a T_{10} je přivedeno konstantní předpětí tvořené diodami D_7 a D_8 . Na výstupu koncového stupně je ještě zařazená dolní propust nastavená na 2,2MHz. Tato propust se stará o dostatečné zatížení výstupu, čímž zabrání rozkmitání předzesilovače. Obvody C_8, R_{18} a C_9, R_{19} slouží k odstranění VF kmitání a je nutné je správně nastavit. Lépe řečeno nastavit je zapotřebí pouze C_8 , kde lze volit hodnotu mezi 6,8pF a 15pF. Kmitání lze ovšem mírně posunout i obvodem C_9, R_{19} .

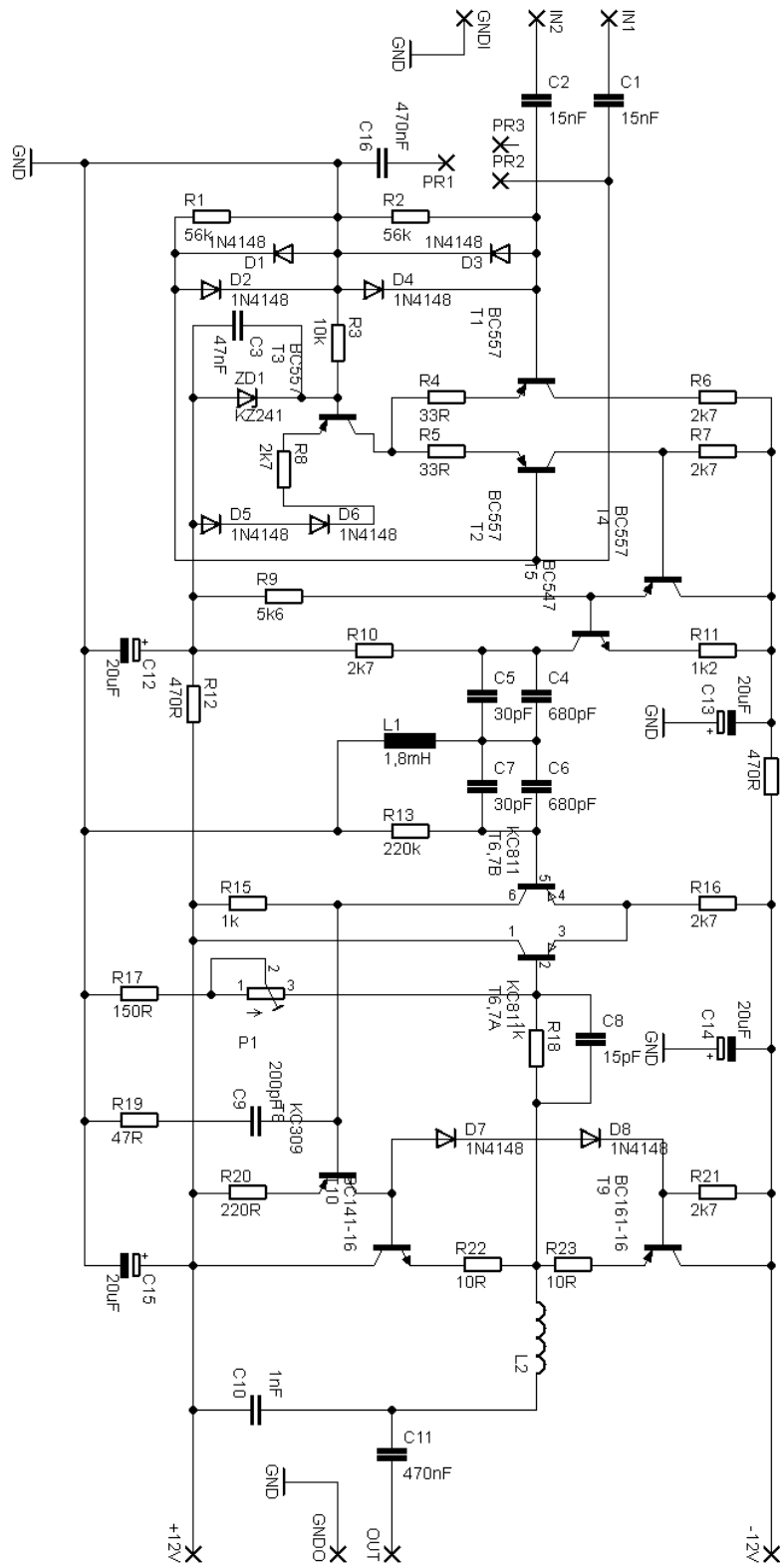


Obrázek 4 Principiální schéma zapojení koncového stupně



Obrázek 5 Koncový stupeň realizovaný z diskretních součástek

Celkové schéma obvodu je uvedeno na následujícím Obrázek 6 a seznam použitých součástek v příloze č. 9.

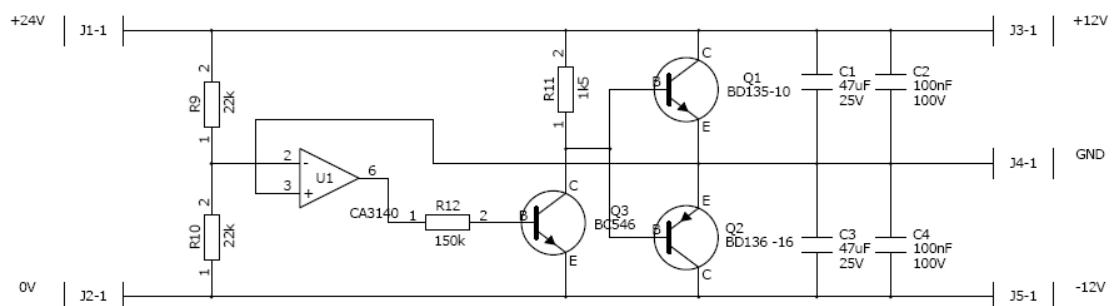


Obrázek 6 Celkové schéma zapojení předzesilovače z diskretních součástek

3.1.4 Zdroj pro diskretní řešení

Jak je patrné ze zadání, tak toto řešení nespĺňuje požadavek na napájení nesymetrickým zdrojem. Je proto nutné udělat drobné úpravy, aby byl splněn i tento bod zadání. Zdroj se inspihuje zapojením uvedeným v [6]. Toto zapojení je mírně upraveno a to konkrétně koncové tranzistory, které jsou zbytečně moc silné, za slabší a levnější, ale pro zapojení naprosto dostačující. Dále jsou vyměněny kondenzátory elektrolytické 10 μ F za tantalové 47 μ F pro lepší vlastnosti, co se šumu týče a vyšší kapacitu pro lepší filtraci napětí. Deska plošných spojů je také celá přepracována.

Schéma tohoto upraveného zapojení je uvedeno na Obrázek 7. Princip je poměrně jednoduchý, vstupním děličem je napětí rozpůleno, což by se dalo ihned využít, jako zemní signál pro zesilovač, ovšem takovýto zdroj je tzv. měkký. Tento problém se dá vyřešit dvěma způsoby. Prvním z nich je použít odpory s velice nízkým odporem a velkým povoleným ztrátovým výkonem, což ovšem není příliš hospodárné, protože se na nich zbytečně mnoho energie přeměňuje v teplo. Druhou možností je použití OZ s výkonovým stupněm ve zpětné vazbě. Tento OZ napětí neustále udržuje na hodnotě nastavené děličem tím, že zvyšuje nebo snižuje proud do báze tranzistorů T_1 a T_2 budícím tranzistorem T_3 , podle zátěže jednotlivých větví.



Obrázek 7 Realizace napájení pro diskretní řešení

3.1.5 Umístění a DPS

Postup návrhu desky plošných spojů

Deska plošných spojů pro výše zmiňované řešení je vytvořena v návrhovém systému EAGLE. Tvorba této desky se řídí několika následujícími pravidly:

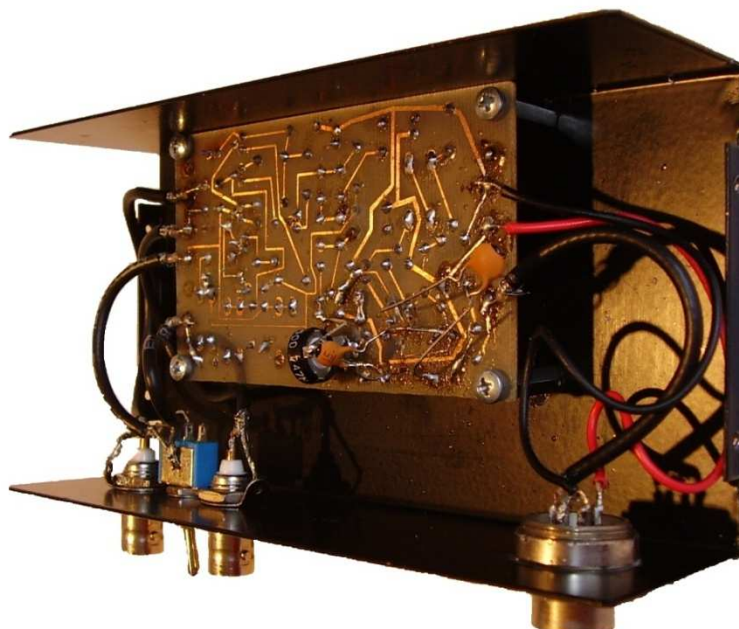
- Jedná se o oboustrannou desku, kde vrchní vrstva je tvořena pouze rozlitou mědí připojenou k zemi zapojení pro lepší odolnost vůči rušení.

- Vynechání drátových propojek. Deska je navržena tak, aby se nikde nenalézaly drátové propojky.
- Cesty nesmí svírat pravý úhel, při vysokých frekvencích by mohlo docházet k tzv. sršení z hran.
- Izolační mezera mezi cestami větší než 0,35mm. Obecně platí čím větší, tím lepší. Zabrání se tak vzniku parazitních kapacit.
- Šířka cest větší než 0,35mm. Pouze pro kvalitnější cesty.
- Šířka napájecích cest větší než cest ostatních. Opět zlepšuje odolnost proti rušení.
- Vyvedení země. Je vhodné vyvést z desky zem signálu alespoň třikrát a to pro napájení, vstup a výstup.

Hotové návrhy DPS jsou uvedeny v měřítku 1:1 v přílohách 1-3, přičemž liché přílohy jsou pro pohled ze strany spojů a sudé pro pohled ze strany součástek. V přílohách č. 4 a 5 je uvedeno rozmístění součástek na deskách.

Umístění již hotové a osazené DPS

Hotovou desku je vhodné umístit do kovové krabičky, která bude mít kryt spojen se zemí celého zapojení, čímž se zlepší odolnost proti rušení cizími zdroji. Výrobek je uložen do skříňky zakoupené ve firmě GM electronic spol. s r.o. pod označením U-AH304. Do této skříňky jsou vyřezány čtyři otvory pro konektory a přepínač. DPS jsou ve skříňce připevněny distančními sloupky o výšce 15mm. Foto celého zapojení a umístění ve skříňce (bez zdroje) je zobrazeno na Obrázek 8 a krabička samotná na Obrázek 9.



Obrázek 8 Umístění DPS v krabičce



Obrázek 9 Pohled na celé řešení zepředu

3.2 NÁVRH PŘEDZESILOVAČE S POUŽITÍM INTEGROVANÝCH OBVODŮ

V dnešním světě integrovaných technologií s extrémně nízkým šumem je vhodné použít obvod, který má všechny důležité součástky zapouzdřeny v sobě a ty pak nejsou tolik ovlivňovány okolním prostředím. Ovšem v pouzdře mohou být pro změnu ovlivňovány sebou samými, zvláště je-li v pouzdře více jak jeden obvod. Celé zapojení se svými parametry (vstupní odpor) a vlastnostmi (zesílení klasické i diferenční) přibližuje k předzesilovači z diskrétních součástek se zlepšením šumových vlastností.

3.2.1 Volba operačního zesilovače

Vzhledem k menším šumovým hodnotám a také lepší citlivosti je zvolena technika operačních zesilovačů. Po průzkumu trhu je možno nalézt u největších světových výrobců tři operační zesilovače, které vyhovují realizovaným parametrům. Jedná se o OPA37 firmy Texas Instruments, Inc., dále LM837 firmy National Semiconductor a MAX414 firmy Maxim Integrated Products, Inc. v Tabulka 1 jsou uvedeny parametry pro srovnání. Jak je z této tabulky patrné, tak všichni tři výrobci mají velice kvalitní operační zesilovače a rozdíl mezi nimi je pouze nepatrný. Lze proto zvolit kterýkoliv z nich. V našem případě je zvolen obvod MAX414 pouze z toho důvodu, že má v jednom pouzdře hned čtyři operační zesilovače (jak je dále uvedeno, tak jsou využity tři z nich) a rozesílací služba firmy Maxim Integrated Products, inc. je extrémně rychlá na rozdíl od National Semiconductor, kde dodávka trvá několik týdnů. Další z důvodů, proč také není LM837 použit, je jeho frekvenční rozsah, kde mezní frekvence mohla být už na 15MHz, což by v případě použitého zesílení 20dB na OZ nemuselo stačit pro horní mezní kmitočet, který má být přenášen a to 2MHz.

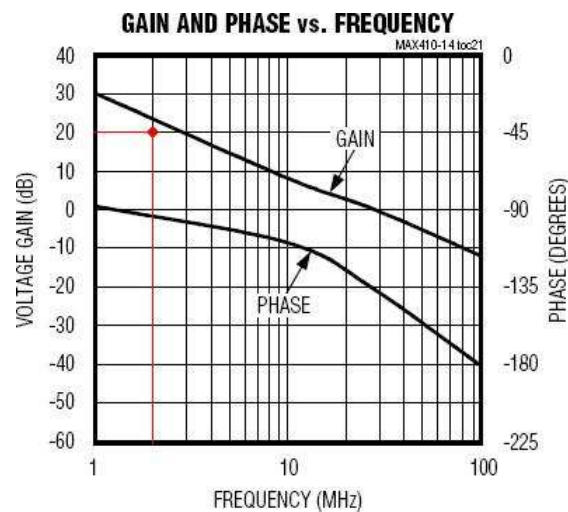
obvod	LM837	OPA37	MAX414
výrobce	National Semiconductor	Texas Instruments, Inc.	Maxim Integrated Products, Inc.
počet obvodů v pouzdře	4	1	4
napěťový šum [nV/√Hz]	4,5	3,2	1,5

proudový šum [pA/√Hz]	0,7	0,4	1,2
mezní frekvence [MHz]	15-25	45-63	28
napájecí napětí [V]	symetrické +-18V	symetrické +-15V	symetrické +-5V

Tabulka 1 – Srovnání parametrů možných operačních zesilovačů

3.2.2 Návrh prvního stupně

První stupeň je realizován jako invertující zesilovač tvořen dvěma za sebou spojenými invertujícími zesilovači, každý se ziskem 20dB. Použití dvou po sobě jdoucích zesilovačů místo jednoho se ziskem 40dB plyne z frekvenční a fázové charakteristiky (viz. Obrázek 10) uvedené v [8] se zvýrazněným pracovním bodem (červeně). Z tohoto obrázku je také patrné, že při použití zisku 40dB a tedy zesílení 100 dochází k limitaci mezní frekvencí zesilovače a není přenášeno korektně celé pásmo použitých frekvencí, ale dochází k jeho ořezání. Na charakteristikách je také viditelné, že při použití zisku 20dB zůstává ještě drobná zisková rezerva a tedy maximální přenášený kmitočet o něco málo vyšší než 2MHz.



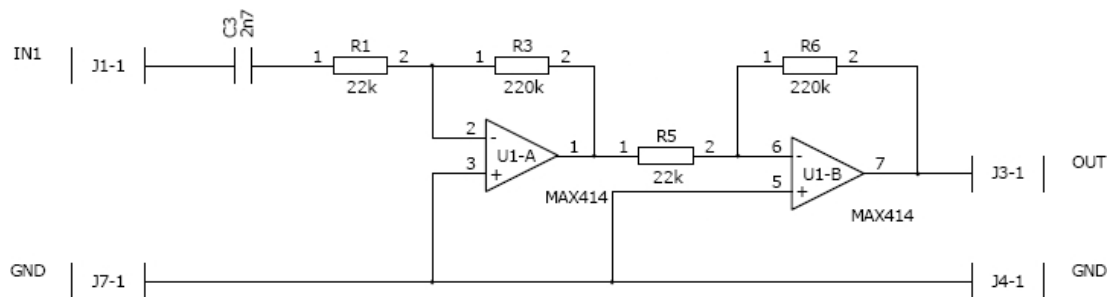
Obrázek 10 - Frekvenční a fázová charakteristika obvodu MAX414 s volbou pracovního bodu

Schéma prvního stupně s invertujícími zesilovači je na Obrázek 11. Pro přiblížení předzesilovače svými vlastnostmi k předzesilovači z diskretních součástek a možností je srovnávat, je jako vstupní odpor R_1 zvolen $22k\Omega$. Hodnoty ostatních uvedených odporů jsou spočítány dle známého vztahu pro invertující zapojení operačního zesilovače a to:

$$K = -\frac{R_3}{R_1} = -10 \gg R_3 = 10 \cdot R_1 = 10 \cdot 2,2 \cdot 10^4 = 220k\Omega \quad (3.6)$$

Kde znaménko – u zesílení říká, že fáze takto zesíleného signálu je obrácená (o 180°). Hodnota zesílení 10 se určí ze vztahu:

$$Au = 20 \cdot \log K = 20dB \gg K = 10^{\frac{Au}{20}} = 10[-] \quad (3.7)$$



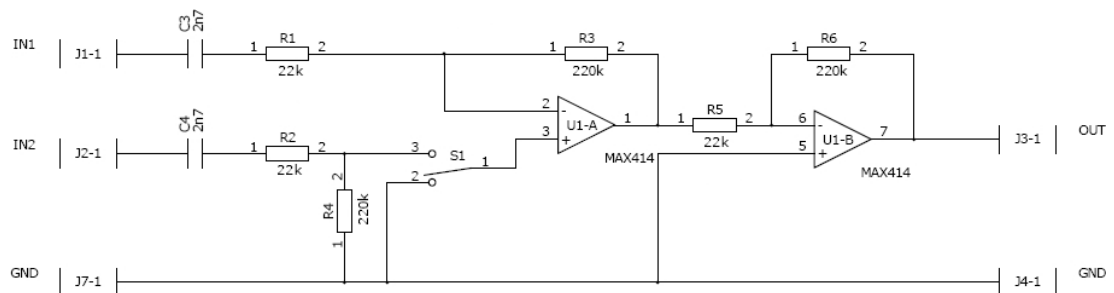
Obrázek 11 - Invertující zapojení prvního stupně

Kondenzátor C_3 tvoří spolu se vstupním odporem R_1 jednoduchou horní propust nastavenou na frekvenci necelých 20kHz dle vztahu:

$$f = \frac{1}{C_3 R_1} = \frac{1}{2,7 \cdot 10^{-9} \cdot 2,2 \cdot 10^4} \doteq 16835,02Hz \quad (3.8)$$

Tato propust je zde proto, aby se nepřenášely parazitní signály, jako například síťový brum na vstup.

Z hlediska přiblížení se vlastnostem předzesilovače z diskretních součástek je vhodné tento první stupeň obohatit o možnost měřit i diferenčně. Toho lze docílit použitím speciálního případu diferenčního zapojení OZ, jak ukazuje Obrázek 12.

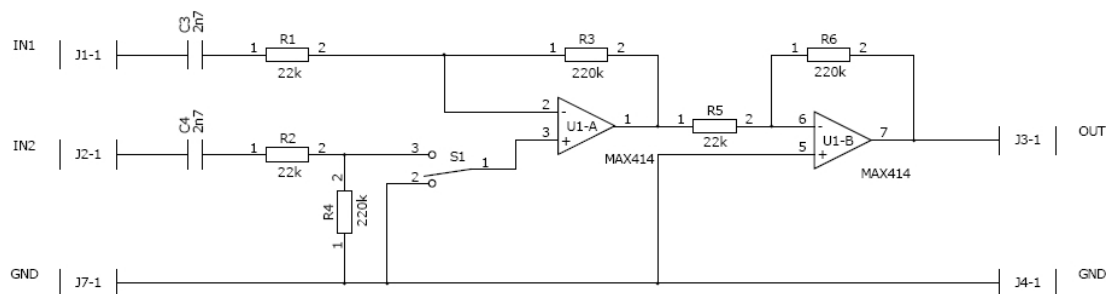


Obrázek 12 Diferenční zapojení prvního stupně

V tomto speciálním případě, kde je $R_3 = R_4$ a $R_1 = R_2$ bude zesilován rozdíl napětí připojených na svorky IN1 a IN2 dle následujícího vztahu:

$$U_O = (U_{IN2} - U_{IN1}) \cdot \frac{R_3}{R_1} [V] \quad (3.9)$$

Kde U_O je výstupní napětí z prvního operačního zesilovače a poměr R_3 ku R_1 udává zesílení rozdílu napětí. V daném případě je tedy opět zesílení rovno deseti, stejně jako v případě invertujícího zesilovače a také ze stejného důvodu. Obě dvě předchozí uvedené zapojení lze skloubit do jednoho, jak ukazuje Obrázek 13. Výsledné zapojení prvního stupně tedy obsahuje možnost přepínání mezi diferenčním a invertujícím zesilovačem. Tato část má zesílení rovné deseti a společně s druhým operačním zesilovačem zapojeným, jako invertujícím rovněž se zesílením rovném deseti, je výsledně signál zesílen stokrát.

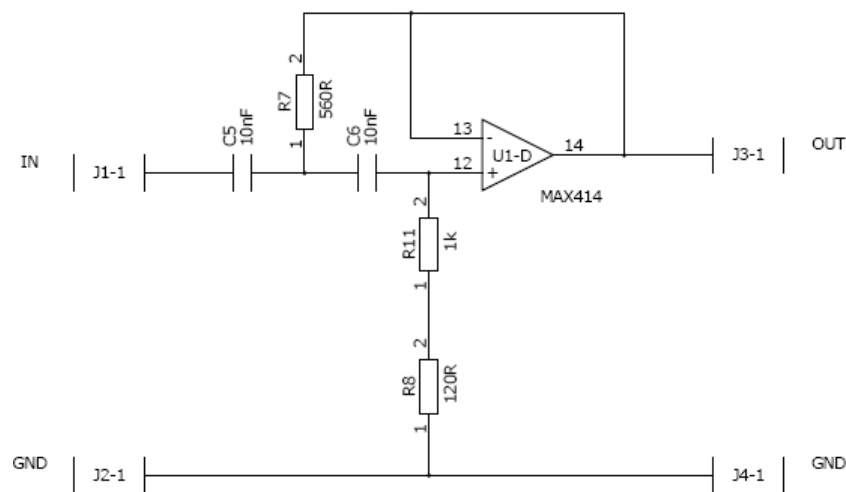


Obrázek 13 Výsledné zapojení prvního stupně

Uvedená obecná zapojení operačních zesilovačů (invertující, diferenční) včetně vysvětlení jejich principů i s podrobnějšími výpočty jsou například také v [5], odkud je také částečně čerpáno (vztah pro výpočet 3.9).

3.2.3 Horní propust

Horní propust, která určuje frekvenční rozsah předzesilovače od 20kHz, je vytvořena jako aktivní filtr typu Butterworth druhého řádu. Schéma zapojení tohoto filtru je uvedeno na Obrázek 14. Jedná se vlastně o jednoduchou horní propust druhého řádu obohacenou o napěťový sledovač. Díky tohoto zapojení s aktivním prvkem nedochází na filtru ke ztrátám, protože ty jsou sledovačem kompenzovány. Z toho také plyne název aktivní.



Obrázek 14 Horní propust

V obvodu byly zvoleny kondenzátory C_5 a C_6 na kapacitu 10nF. Koeficienty pro filtr typu Butterworth druhého řádu jsou: $k_1 = 1,414$ a $k_2 = 0,7071$. Ostatní prvky obvodu byly vypočteny dle následujících vztahů:

$$R_7 = \frac{1}{\frac{k_1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C}} = \frac{1}{\frac{1,414}{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot 10^{-8}}} \doteq 562,78\Omega \quad (3.10)$$

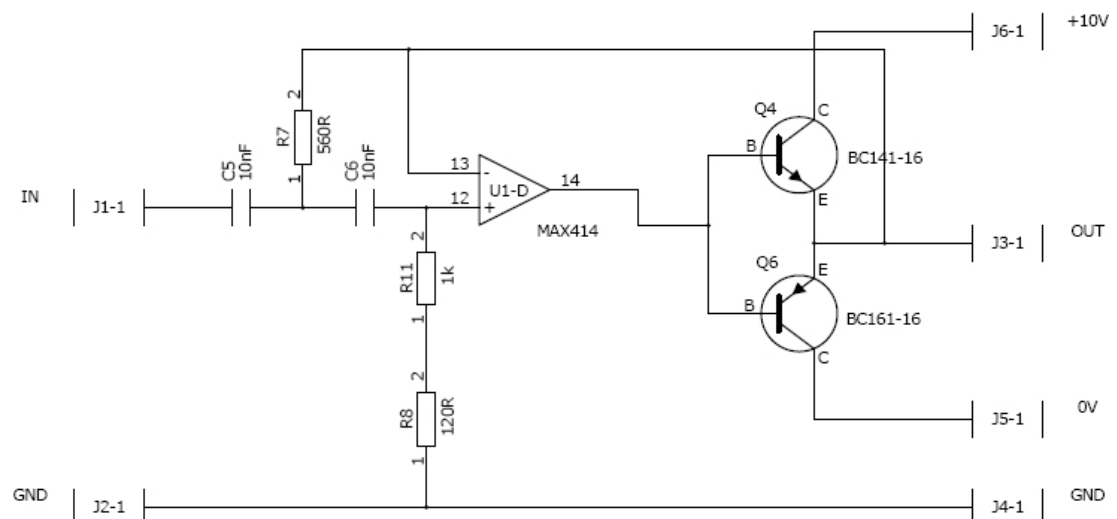
$$R_{8+11} = \frac{1}{\frac{k_2}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C}} = \frac{1}{\frac{0,7071}{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot 10^{-8}}} \doteq 1125,41\Omega \quad (3.11)$$

$$R_{8+11} = R_8 + R_{11} \gg R_8 = R_{8+11} - R_{11} = 1125,41 - 1000 \doteq 125,41\Omega \quad (3.12)$$

Z výše uvedených vztahů je patrné, že odpor R_{8+11} je tvořen sériovým spojením odporů R_8 a R_{11} (pro větší přesnost mezního kmitočtu), kde R_{11} byl zvolen $1k\Omega$. Z výrobní řady odpovídá hodnotě odporu R_7 nejbližší odpor s hodnotou 560Ω a v případě R_8 je tato hodnota 120Ω .

3.2.4 Druhý (koncový) stupeň

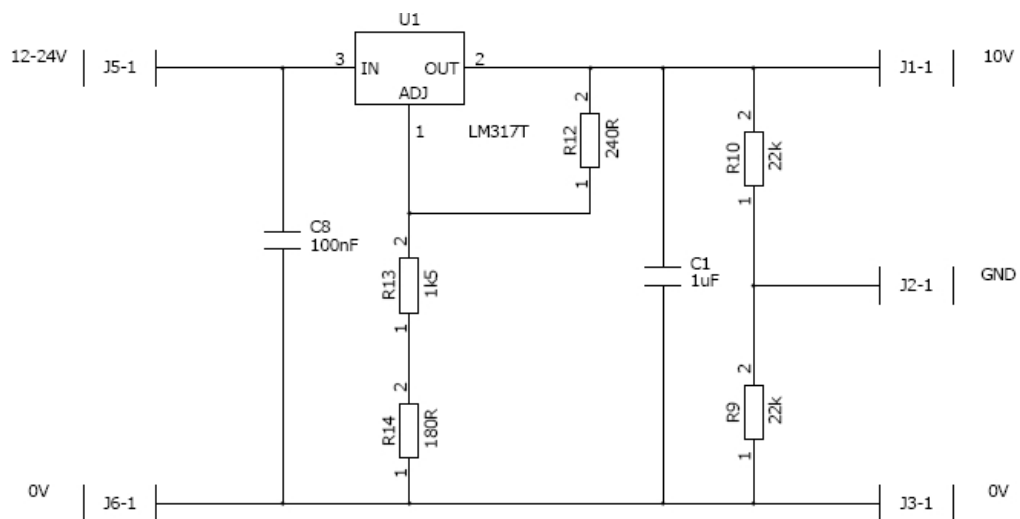
Koncový stupeň je tvořen komplementární dvojicí tranzistorů BC 141-16 (NPN) a BC 161-16 (PNP) zapojených se společným kolektorem, jako emitorový sledovač. Každý tranzistor zesiluje pouze jednu půlperiodu signálu, z čehož plyne, že tranzistory pracují, jako zesilovač ve třídě B. Tyto dva tranzistory ovšem nezesilují signál, který je menší, než jejich prahové napětí (všeobecně problém zesilovačů třídy B). Tento jev se nazývá přechodové zkreslení. Proto se používá na jejich bázi nízké konstantní předpětí (napětí, které nepatrně otevře tranzistor) vytvořené pomocnými obvody (např. jako u zapojení z diskretních součástek, kde je předpětí tvořeno dvěma diodami) nebo, jak uvádí zapojení na Obrázek 15, lze předpětí vytvořit i tím, že se zesilovač zapojí do zpětné vazby napětěového sledovače. Tímto předpětím vzniká ze zesilovače třídy B zesilovač třídy AB. V našem případě je zesilovač zapojen přímo do zpětné vazby napětěového sledovače obvodu horní propusti. Sledovač potom přímo kompenzuje hodnotu přechodového zkreslení.



Obrázek 15 Zapojení koncového stupně přímo v horní propusti

3.2.5 Napájení zesilovače

Jak je uvedeno v zadání práce, tak předzesilovač musí pracovat s nesymetrickým napájecím napětím +24V. Toto napětí je ovšem příliš vysoké pro napájení obvodu MAX414, který dovoluje maximální napájecí napětí 12V (+-6V) a výrobce doporučuje napětí +-5V. Je zde proto nutno dořešit otázku napájení. Problém s napájením je vyřešen pomocí lineárního regulovatelného stabilizátoru LM317T, který na svém výstupu dovoluje regulovat napětí od 1,25V do 37V s maximálním proudem do 1,5A. Na svém vstupu dovoluje napájecí napětí až 40V. Schéma zdroje je vytvořeno na základě doporučeného zapojení uvedeného v [7]. Tento zdroj je ochuzen o možnost regulace a dále obohacen o jednoduchý obvod děliče napětí, s odpory stejné hodnoty, který tak vytváří zemní signál pro operační zesilovač. Výsledné zapojení zdroje je uvedeno na Obrázek 16.



Obrázek 16 Řešení napájení předzesilovače

Hodnota odporu R_{12} je použita doporučená katalogová uvedená v [7], stejně tak hodnoty kondenzátorů C_8 a C_1 . Hodnoty odporů R_9 a R_{10} jsou zvoleny na hodnotu $22k\Omega$ a hodnoty odporů R_{13} a R_{14} jsou vypočteny dle následujících vztahů:

$$U_{OUT} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_{13+14}}{R_{12}}\right) \gg R_{13+14} = \left(\frac{U_{OUT}}{1,25} - 1\right) \cdot R_{12} \quad (3.13)$$

$$R_{13+14} = \left(\frac{U_{OUT}}{1,25} - 1\right) \cdot R_{12} = \left(\frac{10}{1,25} - 1\right) \cdot 240 = 1680\Omega$$

(3.14)

$$R_{13+14} = R_{13} + R_{14} \gg R_{13} = R_{13+14} - R_{14} = 1680 - 1500 = 180\Omega$$

(3.15)

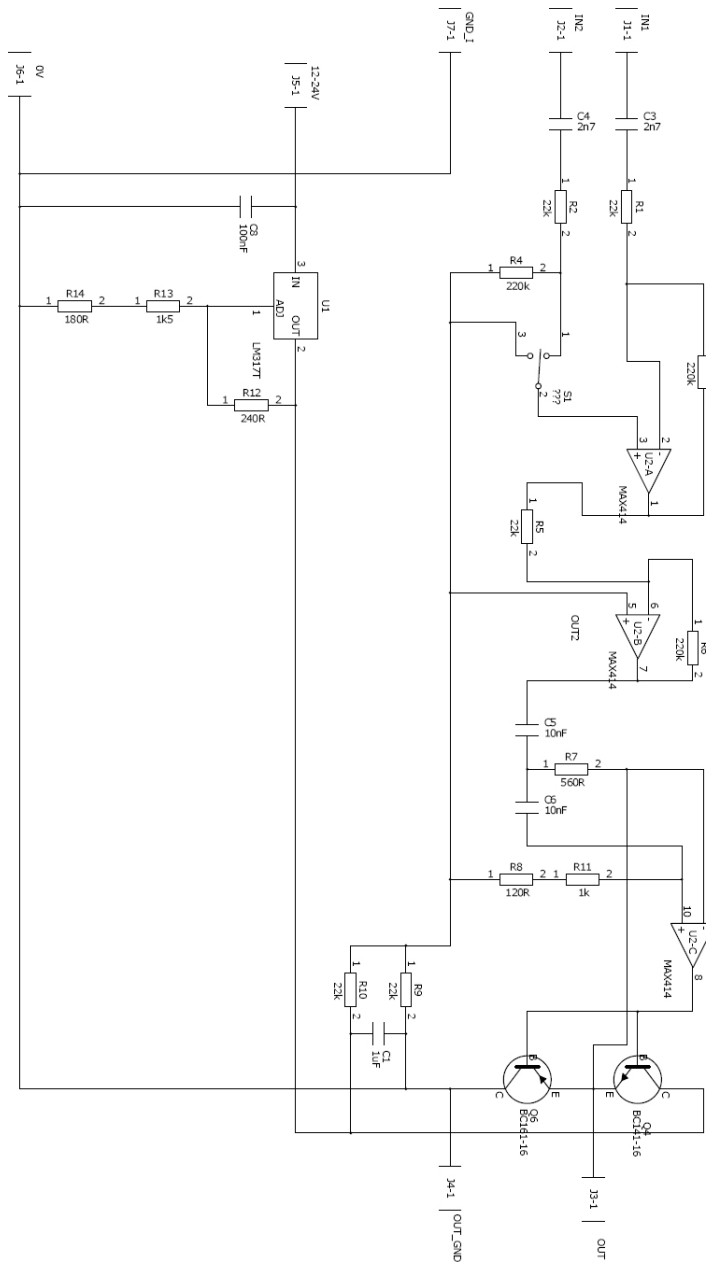
Jak je z výpočtů vidět, tak R_{13+14} je sériovým spojením odporů R_{13} a R_{14} . Tento odpor je rozdělen na dva, protože je nutné mít výstupní napětí co nejbližší hodnotě 10V a hodnoty těchto odporů určují napětí na děliči pro stabilizátor. Hodnoty výrobních řad jsou 1k8 a 1k5, což není pro napájecí napětí dobré. V jednom případě je napětí příliš vysoké a může dojít ke zničení obvodu MAX414, v druhém případě je napájecí napětí příliš nízké a vstupní signály jsou zkreslovány na nižších amplitudách než s napájecím napětím 10V. Odpor R_{14} je tedy zvolen na hodnotu 1k5 a k němu byl poté dopočítán R_{13} . Takto navržený obvod lze díky stabilizátoru LM317T napájet napětím v rozsahu zhruba 12V-40V a obvod na svém výstupu stále drží konstantní napětí. Ovšem čím vyšší je toto napájecí napětí, tím musí být i větší chladič stabilizátoru. Výkon ztracený na tomto stabilizátoru je totiž roven součinu rozdílu napětí mezi vstupem a výstupem a odebíraným proudem celého zapojení (bez připojené zátěže několik málo mA).

Jak bylo uvedeno v [1], tak na výsledném šumu se nejvíce podílí první stupeň zesilovače a šumová čísla dalších stupňů jsou oproti němu zanedbatelná. Proto je u prvního stupně nutno zvolit co nejvyšší zesílení a maximálně dbát na návrh s co nejmenším šumem. Obě zapojení jsou navržena s přihlédnutím k této skutečnosti a podle toho je také navržen a sestaven jejich první stupeň.

3.2.6 Výsledné zapojení a návrh DPS

Výsledné zapojení je uvedeno na Obrázek 17. Z tohoto schématu je pomocí návrhového systému PADS 2005, který je mnohem všestrannější s intuitivnějším ovládáním než např. ORCAD a EAGLE, vytvořena oboustranná deska plošných spojů, jejíž vyobrazení je v měřítku 1:1 uvedeno v příloze č. 6 pro pohled ze strany spojů, příloze č. 7 pro pohled ze strany součástek a příloze č. 8, která ukazuje rozmístění součástek na desce. Seznam použitých součástek se nachází v příloze č. 9. Návrh celé desky se řídil stejnými pravidly, jako v případě návrhu z diskretních součástek. Výsledek návrhu je se svými rozměry 8,3 cm x 4,4 cm podstatně menší

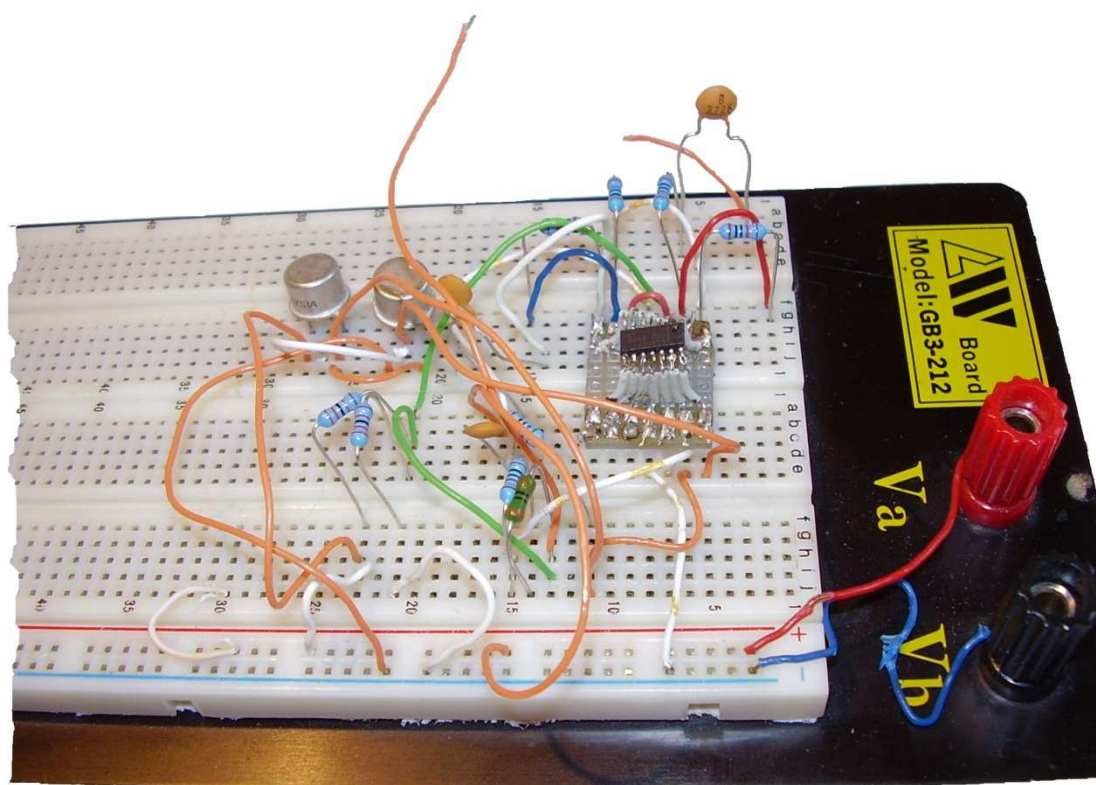
než návrh z diskretních součástek a to už je jeho součástí i zdroj, který řeší nesymetrické napájení.



Obrázek 17 Výsledné zapojení předzesilovače z integrovaných obvodů

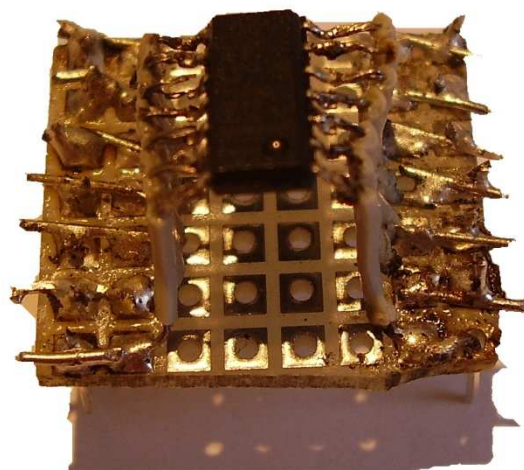
4. OŽIVOVÁNÍ PŘEDZESILOVAČŮ

Pro pokusné účely, zvláště pokud je zapojení jen navrženo a ještě netestováno, je vhodné obvod před umístěním na desku plošných spojů otestovat na kontaktním poli, jak ukazuje Obrázek 18 (testování návrhu s integrovanými obvody).



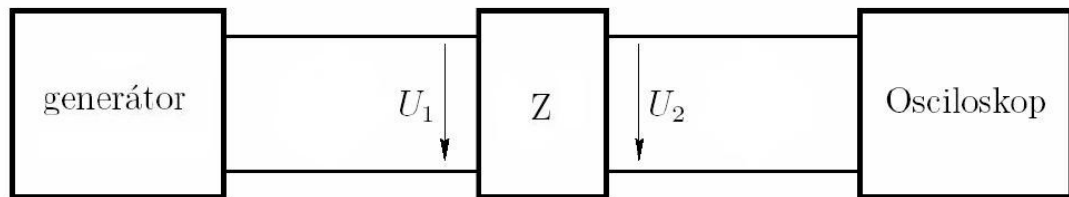
Obrázek 18 Testování navrženého zapojení na kontaktním poli

Je-li třeba použít v kontaktním poli součástku v provedení SMD, pak to lze provést dvěma způsoby. Prvním způsobem je sehnat redukci SMD na standardní patici DIL, nebo pokud není redukce k dispozici či vůbec na daný typ pouzdra neexistuje, tak je nutno vypomoci zapojení pájením, jak je například ukázáno na Obrázek 19.



Obrázek 19 Redukce SMD obvodu do kontaktního pole

Proces oživování předzesilovačů probíhá dle blokového schématu, uvedeném na Obrázek 20. Kde se na zdroji harmonického signálu nastaví dostatečně malá amplituda, pro nezkreslený výstupní signál. Protože se pracuje s nízkošumovými předzesilovači, jejichž zesílení je nastaveno na hodnotu 100 (Zisk 40dB) a výstupní napětí se pohybuje kolem jednotek voltů, tak se zvolí vstupní signál zhruba do $50\text{mV}_{\text{řs}}$. Pokud je na osciloskopu signál z výstupu ořezáván, pak se hodnota vstupního signálu tak dlouho snižuje, dokud nepřestane docházet k limitaci předzesilovačem. Frekvence harmonického signálu se zvolí někde uprostřed pásma pracovních frekvencí, na kterých je zesilovač schopen pracovat. V tomto případě tedy v pásmu 20kHz – 2MHz, je volena například frekvence 500kHz.



Obrázek 20 Oživovací schéma

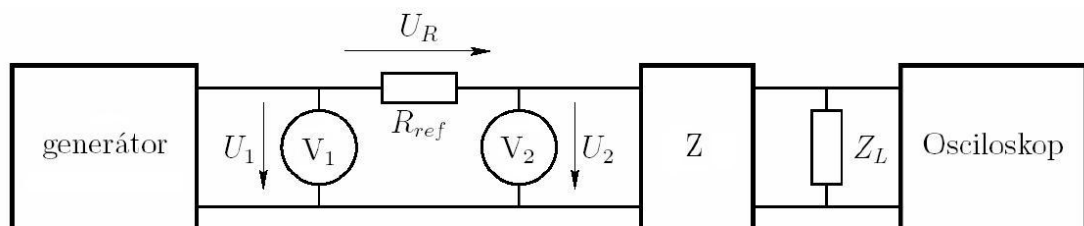
Na osciloskopu se změří frekvence a amplituda signálu na výstupu a porovnává se s frekvencí na vstupu. Nebo pokud je k dispozici dvoukanálový osciloskop, tak jsou zobrazeny oba signály (vstupní i výstupní), které jsou pouze porovnány. Mají-li signály stejnou frekvenci, tak je na půl vyhráno, protože signál zesilovačem prochází. Pokud je na výstupu signál dokonce i zesílen, tak je možno rovnou přejít k proměřování parametrů zesilovače, protože zesilovač se jeví, jako funkční. Pokud na výstupu signál není, nebo není zesílen, pak je zapotřebí proměřit výstupy jednotlivých stupňů a zjistit, kde se signál ztrácí. Jakmile je stupeň nalezen, tak je nutno jej zkontrolovat, opravit nalezené chyby a oživit znovu od začátku. Má-li zesilovač na výstupu při oživování jinou frekvenci signálu než je frekvence signálu vstupního nebo je-li na výstupním signálu patrný i druhý harmonický signál, kterým je zvlněn signál o frekvenci vstupní, pak předzesilovač kmitá. Odpojením vstupního signálu je možno na osciloskopu zjistit, jakou frekvencí kmitá. Poté je zapotřebí prohlédnout výstupy jednotlivých stupňů a zjistit, na kterém stupni dochází k rozkmitávání předzesilovače. Jakmile je stupeň nalezen, tak je nutné tento stupeň stabilizovat zavedením záporné zpětné vazby nebo odstranit vazbu, která stupeň rozkmitává. Pro případ rozkmitání se jako nápomocné ukazuje umístit celé zapojení do krabičky, která má uzemněný kryt (připojen na zemní signál předzesilovače) a také pomáhá zatížit výstup, což odstraňuje kapacitní vazbu z výstupu na vstup zesilovače. Taktéž je vhodné zakrytovat koncový stupeň nebo rovnou celý zesilovač uzemněným plechem tak, aby tento plech odděloval vstup a výstup zesilovače (je používáno u mobilních telefonů i televizních tunerů).

5. MĚŘENÍ NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH PARAMETRŮ ZESILOVAČŮ

V této kapitole je nastíněno, jakým způsobem lze proměřit pět nejzákladnějších parametrů a charakteristik předzesilovače. Těmito parametry jsou vstupní impedance, výstupní impedance, vstupní šum a poté frekvenční amplitudová a frekvenční fázová charakteristika.

5.1 MĚŘENÍ VSTUPNÍ IMPEDANCE

Měřicí pracoviště se zapojí dle blokového schématu uvedeného na Obrázek 21. Referenční odpor R_{ref} je realizován nejlépe odporovou dekádou. Během měření se nastavuje odpor dekády tak dlouho, dokud není napětí na voltmetru₁ rovno napětí na voltmetru₂. V té chvíli, jsou si absolutní hodnota vstupní impedance a hodnota dekády rovny.



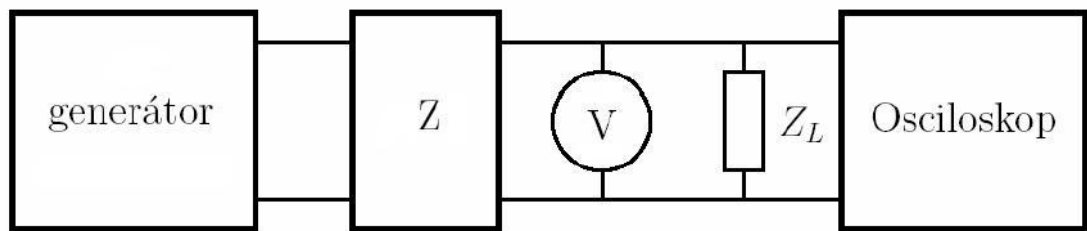
Obrázek 21 Měření vstupní impedance

5.2 MĚŘENÍ VÝSTUPNÍ IMPEDANCE

V případě měření výstupní impedance, se zapojí pracoviště dle Obrázek 22 a poté se přejde k samotnému měření. Nejprve se změří výstupní napětí zesilovače naprázdno a poté se zesilovač zatíží známou impedancí Z_L a opět změří napětí. Výslednou výstupní impedanci je následně možné spočítat ze vztahu 5.1.

$$Z_{výst} = Z_L \cdot \frac{U_{20} - U_2}{U_2} [\Omega]$$

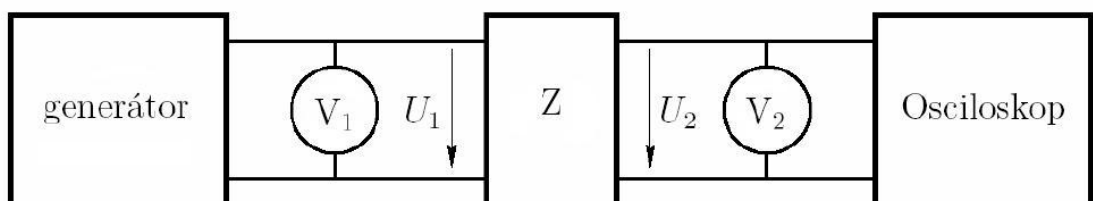
(5.1)



Obrázek 22 Měření výstupní impedance

5.3 MĚŘENÍ AMPLITUDOVÉ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY

Tuto charakteristiku lze měřit více způsoby. Jedním z nich je možnost budít zesilovač tzv. bílým šumem a na spektrálním analyzátoru sledovat odezvu zesilovače. Touto odezvou je přímo frekvenční charakteristika. Druhým způsobem je měření bod, po bodu. Na toto měření se připraví měřicí pracoviště dle Obrázek 23 a měří se tak, že je na generátoru nastavena měřená frekvence (začíná na spodním okraji frekvenčního pásma zesilovače) a odečítá se velikost signálu na vstupu a na výstupu. Postupně je frekvence zvyšována až po horní mezní kmitočet zesilovače. Zpracování takto naměřených výsledků může být opět dvojit. Buďto je počítán zisk vůči hodnotě na referenčním kmitočtu (amplitudové zkreslení) nebo je počítán zisk z podílu výstupního signálu ke vstupnímu.

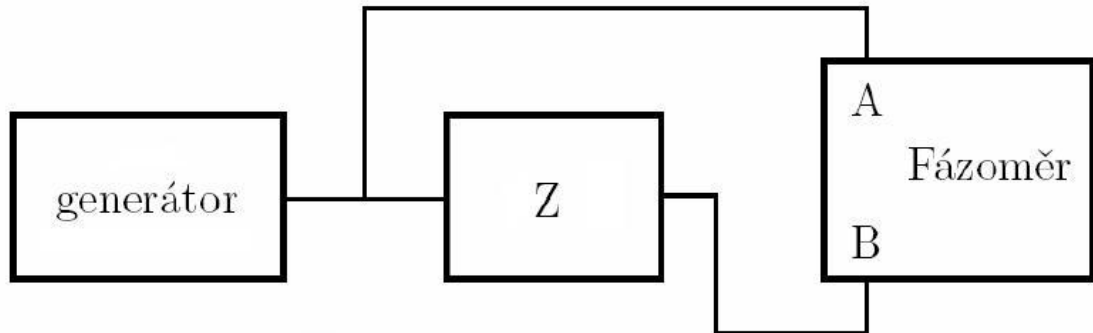


Obrázek 23 Měření amplitudové frekvenční charakteristiky

5.4 MĚŘENÍ FÁZOVÉ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY

Měření této charakteristiky je dosti podobné měření amplitudové charakteristiky a její zapojení ukazuje Obrázek 24. Měří se pomocí zkresloměru, který má na jednom vstupu připojen signál z generátoru a na druhém výstup

zesilovače. Opět se mění frekvence od spodního mezního kmitočtu směrem k hornímu a odečítají se hodnoty.



Obrázek 24 Měření fázové frekvenční charakteristiky

5.5 MĚŘENÍ ŠUMU

U tohoto měření je opět možné se ubírat více směry. Jednou z možností je, že vstup zesilovače je ponechán naprázdno a je měřeno výstupní napětí. Toto napětí v podílu se zesílením zesilovače dává vstupní šum zesilovače naprázdno. Druhou možností je vstup zesilovače zkratovat a opět změřit výstup. Tím se získá vstupní šum nakrátko. Třetí možností je změřit odstup signál/šum. Tato hodnota se získá opět zkratováním vstupu a odečtením momentální hodnoty výstupu. Poté se připojí na vstup jmenovitý signál a změří výstup znovu. Výsledný odstup signál/šum lze spočítat dle následujícího vztahu:

$$SN = 20 \cdot \log \left(\frac{U_{2K}}{U_2} \right) [dB] \quad (5.2)$$

Na závěr kapitoly jsou zde uvedeny obecně požadované parametry zesilovačů. V případě vstupní impedance se jedná o co nejvyšší hodnotu, aby zesilovač příliš nezatěžoval předchozí obvody. U výstupní impedance platí přesný opak, protože je zapotřebí co nejnižší hodnota, aby se zesilovač nechoval jako tzv. měkký zdroj. V případě měření fázové charakteristiky je požadována, aby byla co „nejplošší“ na pracovním pásmu frekvencí. U fázové charakteristiky platí prakticky totéž, pouze je požadována fáze rovna nule na celém pásmu pracovních frekvencí. A

nakonec pro případ šumu je vyžadována co nejnižší hodnota, aby se zesiloval jen signál, který je skutečně požadován.

6. SROVNÁNÍ PARAMETRŮ PŘEDZESILOVAČŮ

V této kapitole je uvedeno srovnání frekvenčních charakteristik třech předzesilovačů. Prvním z nich je původní diskrétní předzesilovač, druhým inovovaný diskrétní a třetím předzesilovač založený na integrovaných obvodech.

$U_{vst}[mV_{pp}]$	20	35	35
	původní diskrétní	inovované diskrétní	integrované
měřicí frekvence [kHz]	$U_{výst}[mV_{pp}]$	$U_{výst}[V_{pp}]$	$U_{výst}[V_{pp}]$
10	79,07	0,731	2,406
20	273,98	1,562	5,719
30	457,50	2,86	7,594
50	566,68	3,141	7,594
100	451,56	3,172	7,594
200	321,45	2,953	7,594
300	278,18	2,828	7,594
400	534,00	2,797	7,156
500	513,00	2,859	5,969
600	497,00	2,891	4,656
700	491,00	2,953	3,594
800	484,00	3,047	2,281
900	478,00	3,125	1,094
1000	478,00	3,234	1,375
1100	475,00	3,375	1,656
1200	469,00	3,531	1,656
1300	469,00	3,719	1,547
1400	466,00	4	1,437
1500	466,00	4,344	1,234
1600	463,00	4,179	0,9688
1700	450,00	5,344	0,7625
1800	459,00	6,219	0,75
1900	459,00	7,562	0,6812
2000	456,00	10,13	0,6375
2100	456,00	15,16	0,5625
2200	456,00	9,83	0,4187

Tabulka 2 Naměřené hodnoty frekvenční charakteristiky jednotlivých předzesilovačů

f[kHz]	původní diskrétní		inovované diskrétní		integrované	
	K	Au[dB]	K	Au[dB]	K	Au[dB]
10	3,95	11,94	20,89	26,40	68,74	36,74
20	13,70	22,73	44,63	32,99	163,40	44,27
30	22,87	27,19	81,71	38,25	216,97	46,73
50	28,33	29,05	89,74	39,06	216,97	46,73
100	22,58	27,07	90,63	39,15	216,97	46,73
200	16,07	24,12	84,37	38,52	216,97	46,73
300	13,91	22,87	80,80	38,15	216,97	46,73
400	26,70	28,53	79,91	38,05	204,46	46,21
500	25,65	28,18	81,69	38,24	170,54	44,64
600	24,85	27,91	82,60	38,34	133,03	42,48
700	24,55	27,80	84,37	38,52	102,69	40,23
800	24,20	27,68	87,06	38,80	65,17	36,28
900	23,90	27,57	89,29	39,02	31,26	29,90
1000	23,90	27,57	92,40	39,31	39,29	31,88
1100	23,75	27,51	96,43	39,68	47,31	33,50
1200	23,45	27,40	100,89	40,08	47,31	33,50
1300	23,45	27,40	106,26	40,53	44,20	32,91
1400	23,30	27,35	114,29	41,16	41,06	32,27
1500	23,30	27,35	124,11	41,88	35,26	30,94
1600	23,15	27,29	119,40	41,54	27,68	28,84
1700	22,50	27,04	152,69	43,68	21,79	26,76
1800	22,95	27,22	177,69	44,99	21,43	26,62
1900	22,95	27,22	216,06	46,69	19,46	25,78
2000	22,80	27,16	289,43	49,23	18,21	25,21
2100	22,80	27,16	433,14	52,73	16,07	24,12
2200	22,80	27,16	280,86	48,97	11,96	21,56

Tabulka 3 Spočítané hodnoty zisku a zesílení

6.1 PŘÍKLADY VÝPOČTU

Zesílení zesilovače je možné vypočítat např. pro první řádek tabulky dle následujícího vztahu:

$$K = \frac{U_{výst}}{U_{vst}} = \frac{79,07 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-3}} = 3,95; \frac{0,731}{0,035} = 20,89; \frac{2,406}{0,035} = 68,74$$

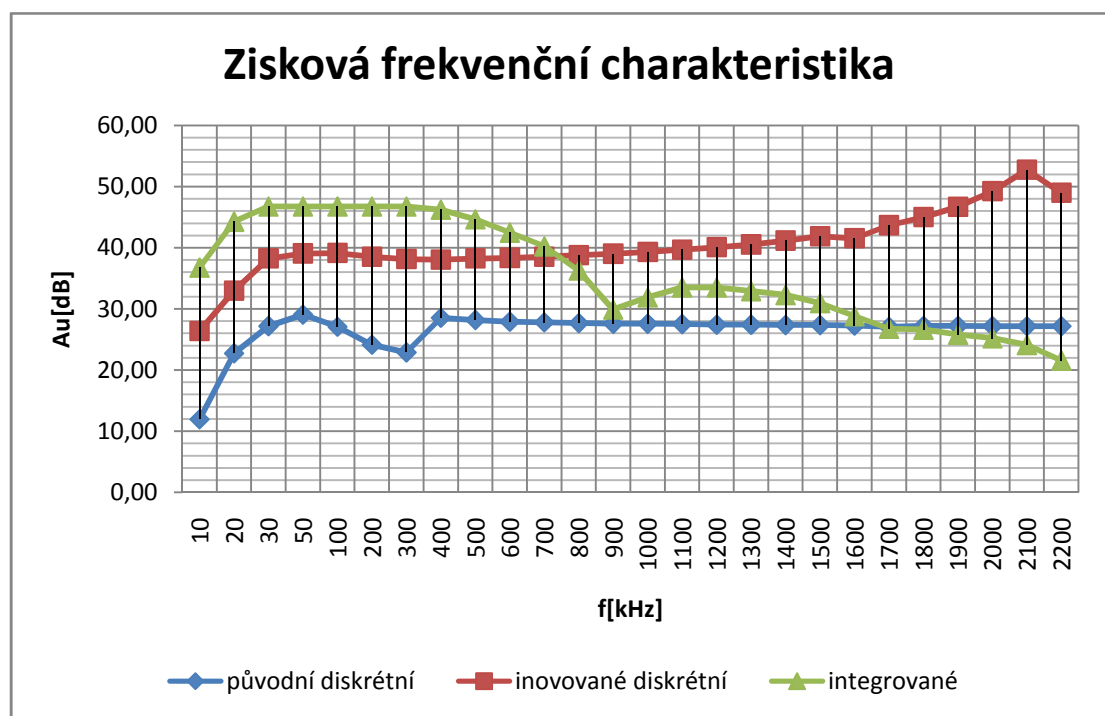
(6.1)

Pomocí takto vypočítaného zesílení lze vypočítat i zisk dle následujícího vztahu:

$$\begin{aligned} Au &= 20 \cdot \log K = 20 \cdot \log(3,95) = 11,94 \text{dB}; 20 \cdot \log(20,89) \\ &= 26,4 \text{dB}; 20 \cdot \log(68,74) = 36,74 \text{dB} \end{aligned}$$

(6.2)

Z vypočítaných hodnot zisku se vytvoří graf závislosti na frekvenci (viz. Obrázek 25).



Obrázek 25 Ziskové frekvenční charakteristiky předzesilovačů

6.2 ZHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH ÚDAJŮ

Jak je z naměřených údajů a jejich grafického zpracování vidět, tak nejplošší a tudíž nejlepší charakteristiku má původní diskretní předzesilovač. Nachází se v něm sice jeden pokles na hranici 300kHz, ale tento pokles je s největší pravděpodobností dán dynamickým rozsahem použitých multimetrů (Agilent 34410), protože ty měřili pouze do rozsahu 300kHz. Poté už se měřilo s využitím milivoltmetrů firmy Tesla (rozsah do 1MHz) a nakonec už jen s použitím funkce kurzoru na osciloskopu. V případě inovovaného diskretního předzesilovače se charakteristika velice podobá původnímu, pouze se značným rozdílem zesílení a

s rezonančním převýšením na frekvenci 2MHz. Toto převýšení je značně závislé na kvalitě použité desky plošných spojů. V případě první, nevydařené (vývoj v amatérských podmínkách), desky bylo toto převýšení na 2MHz. Volbou kondenzátorů C_8 a C_9 metodou pokus-omyl se podařilo toto převýšení přesunout až na frekvenci 2,3MHz. Se změnou desky plošných spojů na zakázkovou se ovšem toto převýšení přesune na frekvenci zhruba 1,1MHz a není možné s ním již pohnout, ani volbou kondenzátorů. Z tohoto plyne, že návrh desky anebo i některá volba náhrady za původní součástky není pro daný frekvenční rozsah optimální. Nejhorší průběh má frekvenční charakteristika integrovaného řešení. Jsou na ní patrné dvě vlny, které jsou s největší pravděpodobností dány parazitními kapacitami, protože se jedná o hodnoty naměřené na kontaktním poli. Je taktéž velice možné, že tyto dvě vlny jsou dány použitím trojicí operačních zesilovačů zapouzdřených v jednom pouzdře. Na takto vysokých frekvencích je velice pravděpodobné, že se obvody navzájem ovlivňují. V případě umístění řešení tohoto návrhu na desku plošných spojů dochází okamžitě k rozkmitání předzesilovače a nedaří se jej ničím utlumit. I v tomto případě není tedy zřejmě návrh desky plošných spojů ideální a je třeba vynaložit velké úsilí ke kompenzaci jevů, které na desce vznikají nebo desku navrhnout znovu.

7. ZÁVĚR

Celá práce přináší svým obsahem ucelený pohled na problematiku návrhů širokopásmových nízkošumových předzesilovačů, jejich uvedení do chodu a ověření nejdůležitějších vlastností.

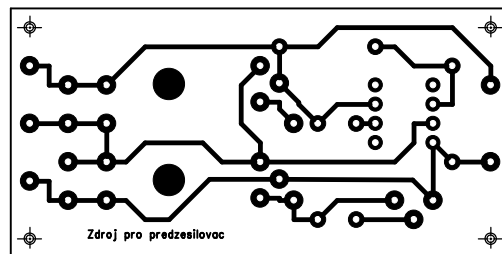
Jak je již v samotném úvodu řečeno, tak základním cílem práce je opětovně sestavení a uvedení do chodu původního řešení z diskrétních součástek. I když se cíl daří naplnit, tak výsledek není úplně optimální. Z kapitoly srovnání parametrů předzesilovačů je jasně patrné, proč právě toto řešení ne zcela vyhovuje technickým představám. Navrhovaným řešením je použít původní návrh desky plošných spojů místo použitého nového a osadit jej navrhovanými moderními náhradami. Práce, ač jí to zadání neudává, navíc nastiňuje možnost řešení celé problematiky za použití moderních nízkošumových technologií. Toto řešení se také daří realizovat na nepájivém kontaktním poli a proměřit. S realizací na desce plošných spojů bohužel dochází k problémům s rozkmitáním celého předzesilovače. Proto musí být celá deska překoncipována na novou nebo pozmeněn návrh samotného předzesilovače na vyrušení jevů (vazeb) vznikajících na této desce.

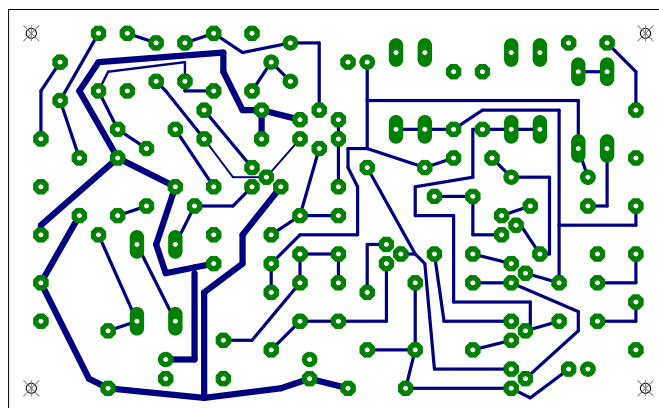
8. LITERATURA

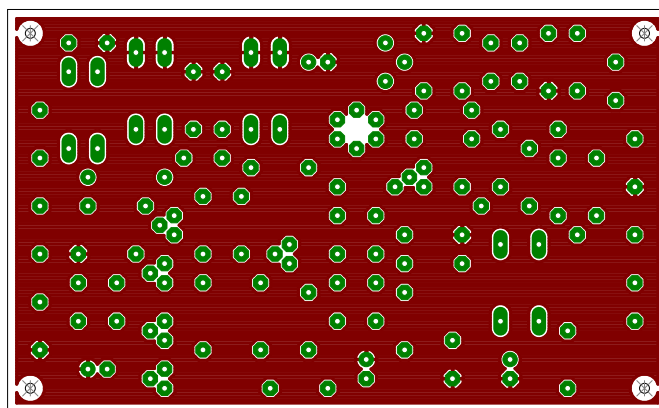
- [1] Žalud, Václav. Polovodičové obvody s malým šumem. 1.vyd. Praha: SNTL, 1980.464 s.
- [2] Hájek K. Noise Optimisation of AE sensor preamplifiers In Defektoskopie 2001 - sborník příspěvků. Brno: VUT v Brně, 2001. s. 117-125, ISBN 80-214-2002-2.
- [3] Dušek F. Širokopásmový nízkošumový předzesilovač. Brno: VUT v Brně, 1981. 19 s. firemní dokumentace.
- [4] Návara D. Nízkošumový zesilovač a ozařovač pro pásmo S. Brno, 48 s. Bakalářská práce na fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Špaček.
- [5] Patočka M. Řídící elektronika – aktivní obvody, 2. Díl, Skriptum VUT, 1.vyd., 2004.154 s.
- [6] Zdroj symetrického napětí
http://paja-trb.unas.cz/elektronika/konstrukce/sym_zdroj.html
[citováno 23.května 2008]
- [7] Katalogové listy (Datasheet) obvodu LM317T
<http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/2154.pdf>
[citováno 23.května 2008]
- [8] Katalogové listy (Datasheet) obvodu MAX414, Maxim
http://www.maxim-ic.com/quick_view2.cfm/qv_pk/1562
[citováno 23.května 2008]

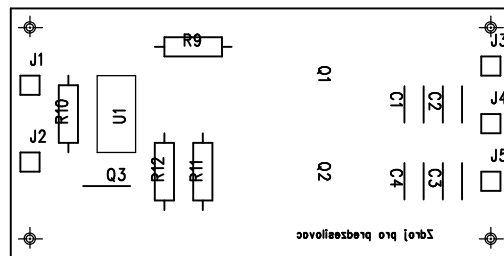
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 DPS ze strany součástek zdroje pro předzesilovač.
- Příloha 2 DPS ze strany spojů předzesilovače z diskrétních součástek.
- Příloha 3 DPS ze strany součástek předzesilovače z diskrétních součástek.
- Příloha 4 Rozmístění součástek na DPS zdroje pro předzesilovač.
- Příloha 5 Rozmístění součástek na DPS předzesilovače z diskrétních součástek.
- Příloha 6 DPS ze strany součástek předzesilovače z integrovaných obvodů.
- Příloha 7 DPS ze strany spojů předzesilovače z integrovaných obvodů.
- Příloha 8 Rozmístění součástek na DPS předzesilovače z integrovaných obvodů.
- Příloha 9 Seznam součástek použitých u předzesilovače z diskrétních součástek včetně zdroje
- Příloha 10 Seznam součástek použitých u předzesilovače z integrovaných obvodů

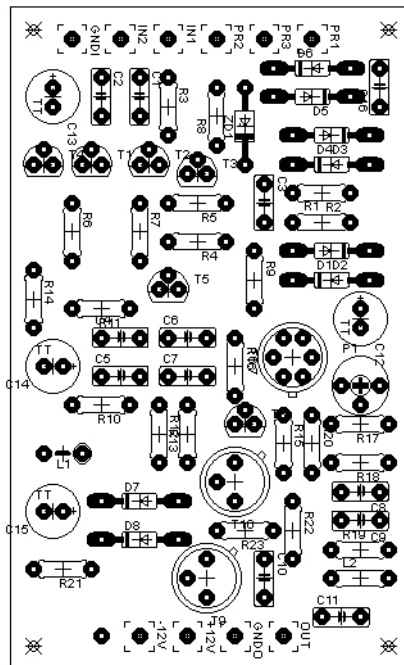


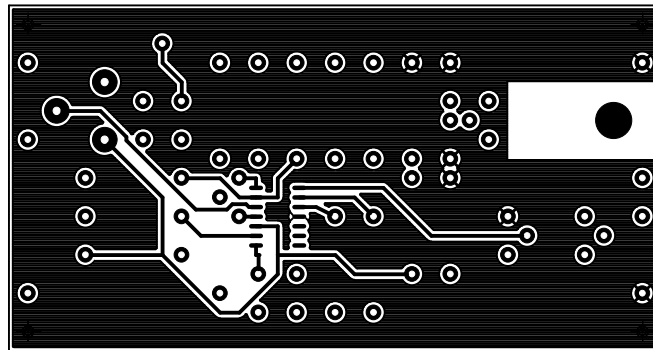


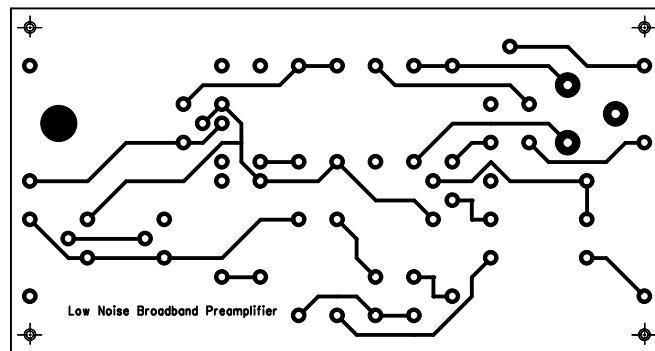


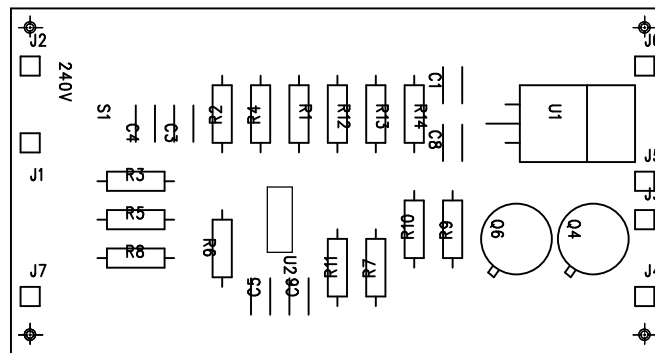


Příloha 5









Příloha 9

Předzesilovač z diskrétních součástek			
Označení	Hodnota	Označení	Hodnota
R1	56k	T7	KC811
R2	56k	T8	BC557
R3	10k	T9	BC161-16
R4	33R	T10	BC141-16
R5	33R	L1	8,2mH
R6	2k7	L2	22μH
R7	2k7	D1-D8	1N4148
R8	2k7	ZD1	KZ241
R9	5k6	P1	470R
R10	2k7		
R11	1k2		
R12	470R		
R13	220k		
R14	470R		
R15	1k		
R16	2k7		
R17	150R		
R18	1k		
R19	47R		
R20	220R		
R21	2k7		
R22	10R		
R23	10R		
C1	15nF		
C2	15nF		
C3	47nF		
C4	1n8		
C5	1n8		
C6	1n8		
C7	1n8		
C8	15pF		
C9	200pF		
C10	1nF		
C11	470nF		
C12	20μF		
C13	20μF		
C14	20μF		
C15	20μF		
C16	470nF		
T1	BC557		
T2	BC557		
T3	BC557		
T4	BC557		
T5	BC547		
T6	KC811		

Zdroj	
Označení	Hodnota
R9	22k
R10	22k
R11	1k5
R12	150k
Q1	BD135-10
Q2	BD136-16
Q3	BC546
C1	47μF
C2	100nF
C3	47μF
C4	100nF
U1	CA3140

Příloha 10

Předzesilovač z integrovaných obvodů

Označení	Hodnota
R1	22k
R2	22k
R3	220k
R4	220k
R5	22k
R6	220k
R7	560R
R8	120R
R9	22k
R10	22k
R11	1k
R12	240R
R13	1k5
R14	180R
C1	1 μ F
C3	2n7
C4	2n7
C5	10nF
C6	10nF
C8	100nF
U1	LM317T
U2	MAX414
Q4	BC141-16
Q6	BC161-16
S1	Páčkový přepínač