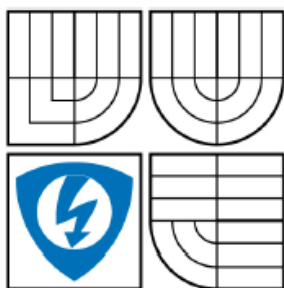


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologií

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## KONSTRUKCE AUDIO ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ T

CONSTRUCTION OF CLASS T AUDIO AMPLIFIER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

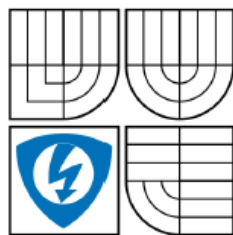
LENKA ZELINOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ PETRŽELA, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Studentka:** Lenka Zelinová  
**Ročník:** 3

**ID:** 72762  
**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

**Konstrukce audio zesilovače ve třídě T**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem funkce zesilovačů pracujících ve třídě T a s komerčně dostupnými integrovanými obvody. Navrhněte schéma zapojení zesilovače ve třídě T s výstupním výkonem 2x20W doplněný korekčním předzesilovačem s možností korekce hlasitosti, výšek a basů.

Vámi navržený zesilovač prakticky realizujte. Správnou funkci zařízení zkontrolujte laboratorním měřením. Zhodnotte dosažené parametry audio zesilovače.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] DOSTÁL, T., AXMAN, V. Elektrické filtry. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.  
[2] NOVOTNÝ, V. Nízkofrekvenční elektronika. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2002.

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 5.6.2009

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida  
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.

## **ABSTRAKT**

Téma bakalářské práce se týká zesilovačů pracujících ve třídě T. Jelikož se tyto zesilovače používají převážně jako výkonové nízkofrekvenční audio zesilovače, klade se důraz především na schopnost přenést signál bez zkreslení, zesilovat signál v širokém frekvenčním pásmu, docílit vysoké účinnosti koncových stupňů a dosáhnout špičkové kvality zvuku. V práci jsou shromážděny informace a fakta o principu funkce audio zesilovačů různých typů, včetně těch, které pracují ve třídě T, a komerčně dostupných integrovaných obvodech této třídy. Dále je uveden návrh schématu zapojení tohoto zesilovače s výstupním výkonem 2x20 W, včetně korekčního předzesilovače, který umožňuje korekci výšek, basů a hlasitosti. Navržený audio zesilovač je realizován a v závěru jsou proměřeny jeho charakteristiky, které jsou srovnány s teorií.

## **ABSTRACT**

The aim of my bachelor's thesis is to collect information about amplifiers, working in the T class. Because these amplifiers are usually used as digital power processing audio amplifiers, we mostly insist on the ability of sending the signal without distortion, to amplify the frequency broadband signal, to obtain the high efficiency of the output stages and to obtain the peak quality of the sound. My task is to gather information and facts of principle of the function of the audio amplifiers working in the T class and reasonably priced integrated circuits of this class. Furthermore I am going to focus on the design of wiring of this amplifier with the 2x20 watts output, including the correction pre-amplifier, which provides correction of the heights, basses and volume. The amplifier is realized, in the end of bachelor's thesis, there are measured its characteristics, which are compared to theory.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Audio zesilovač, Třída T, Nízkofrekvenční zesilovač, TRIPATH technologie, DPP, PWM, koncový zesilovač audio signálu, TA2020-020, TDA4292, korekční předzesilovač, korekce hlasitosti, výšek a basů, THD+N

## **KEYWORDS**

Audio amplifier, Class T, lowfrequency amplifier, TRIPATH technology, Digital Power Processing, Pulse Width Modulation, TA2020-020, TDA4292, correction pre-amplifier, correction of volume, trebble and bass, THD+N

ZELINOVÁ, L. *Konstrukce audio zesilovače ve třídě T*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Konstrukce audio zesilovače ve třídě T jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Jiřího Petrželou, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma 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 autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce ing. Jiřímu Petrželovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# Obsah

|           |                                                       |           |
|-----------|-------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b> | <b>ÚVOD.....</b>                                      | <b>1</b>  |
| <b>2.</b> | <b>ROZDĚLENÍ ZESILOVAČŮ .....</b>                     | <b>2</b>  |
| <b>3.</b> | <b>PRINCIP FUNKCE ZESILOVAČŮ.....</b>                 | <b>3</b>  |
| 3.1.      | ZÁKLADNÍ TŘÍDY ZESILOVAČŮ .....                       | 3         |
| 3.1.1.    | <i>Princip funkce zesilovačů ve třídě A:</i> .....    | 3         |
| 3.1.2.    | <i>Princip funkce zesilovačů ve třídě B:</i> .....    | 4         |
| 3.1.3.    | <i>Princip funkce zesilovačů ve třídě AB:</i> .....   | 6         |
| 3.1.4.    | <i>Princip funkce zesilovačů ve třídě C:</i> .....    | 7         |
| 3.2.      | PRACOVNÍ BODY ZÁKLADNÍ TŘÍDY ZESILOVAČŮ .....         | 8         |
| 3.3.      | SPÍNANÉ ZESILOVAČE.....                               | 9         |
| 3.3.1.    | <i>Princip funkce zesilovačů ve třídě D:</i> .....    | 9         |
| 3.3.2.    | <i>Princip funkce zesilovačů ve třídě E:</i> .....    | 11        |
| 3.3.3.    | <i>Princip funkce zesilovačů ve třídě S:</i> .....    | 11        |
| 3.3.4.    | <i>Princip funkce zesilovačů ve třídě T:</i> .....    | 11        |
| 3.4.      | DALŠÍ ZESILOVAČE.....                                 | 11        |
| <b>4.</b> | <b>ZESILOVAČ TŘÍDY T .....</b>                        | <b>13</b> |
| 4.1.      | TECHNOLOGIE DPP (DIGITAL POWER PROCESSING) .....      | 13        |
| <b>5.</b> | <b>SOUČÁSTKY DOSTUPNÉ NA TRHU.....</b>                | <b>14</b> |
| 5.1.      | KONCOVÝ ZESILOVAČ TA1101B .....                       | 14        |
| 5.2.      | KONCOVÝ ZESILOVAČ TA2022 .....                        | 15        |
| 5.3.      | KONCOVÝ ZESILOVAČ TA2020-020.....                     | 16        |
| 5.4.      | BUDIČ TA3020 .....                                    | 17        |
| <b>6.</b> | <b>REALIZACE AUDIO ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ T .....</b>    | <b>19</b> |
| 6.1.      | KOREKČNÍ PŘEDZESILOVAČ .....                          | 19        |
| 6.2.      | KONCOVÝ ZESILOVAČ .....                               | 21        |
| 6.3.      | NAPÁJENÍ .....                                        | 23        |
| 6.4.      | ZESÍLENÍ .....                                        | 23        |
| 6.5.      | CHLAZENÍ .....                                        | 24        |
| 6.6.      | DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ .....                            | 24        |
| 6.7.      | SCHÉMA ZAPOJENÍ.....                                  | 26        |
| 6.7.1.    | <i>Korekční předzesilovač</i> .....                   | 26        |
| 6.7.2.    | <i>Koncový zesilovač</i> .....                        | 27        |
| 6.8.      | SEZNAM SOUČÁSTEK .....                                | 28        |
| 6.8.1.    | <i>Korekční předzesilovač</i> .....                   | 28        |
| 6.8.2.    | <i>Koncový zesilovač</i> .....                        | 28        |
| <b>7.</b> | <b>PARAMETRY REALIZOVANÉHO T ZESILOVAČE.....</b>      | <b>29</b> |
| 7.1.      | ABSOLUTNÍ HODNOTA VSTUPNÍ IMPEDANCE ZESILOVAČE .....  | 29        |
| 7.2.      | ABSOLUTNÍ HODNOTA VÝSTUPNÍ IMPEDANCE ZESILOVAČE ..... | 30        |
| 7.3.      | NAPĚŤOVÉ ZESÍLENÍ .....                               | 30        |
| 7.3.1.    | <i>Maximální výstupní sinusový výkon</i> .....        | 31        |

|           |                                      |           |
|-----------|--------------------------------------|-----------|
| 7.3.2.    | <i>Napěťový zisk</i> .....           | 31        |
| 7.4.      | FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA .....     | 32        |
| 7.5.      | FÁZOVÁ CHARAKTERISTIKA .....         | 35        |
| 7.6.      | PŘESLECH.....                        | 37        |
| 7.7.      | ŠUMOVÉ VLASTNOSTI ZESILOVAČE .....   | 37        |
| 7.8.      | ÚČINNOST ZESILOVAČE .....            | 38        |
| 7.9.      | THD+N ZKRESLENÍ .....                | 39        |
| 7.10.     | PŘÍSTROJE POUŽITÉ PŘI MĚŘENÍ .....   | 41        |
| <b>8.</b> | <b>ZÁVĚR.....</b>                    | <b>42</b> |
|           | <b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b> | <b>43</b> |

# Seznam obrázků

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| OBR. 3.1A: SCHÉMA ZAPOJENÍ ZESILOVAČE TŘÍDY A.....                                | 3  |
| OBR. 3.1B: STŘÍDAVÝ VÝSTUPNÍ SIGNÁL ZESILOVAČE TŘÍDY A S PŘEDPĚTÍM 5V .....       | 4  |
| OBR. 3.1C: SPEKTRUM VÝSTUPNÍHO SIGNÁLU ZESILOVAČE TŘÍDY A .....                   | 4  |
| OBR. 3.2: PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA TRANZISTORU.....                             | 5  |
| OBR. 3.3A: SCHÉMA ZAPOJENÍ ZESILOVAČE TŘÍDY B .....                               | 5  |
| OBR. 3.3B: VIDITELNÉ PŘECHODOVÉ ZKRESLENÍ.....                                    | 5  |
| OBR. 3.3C: SPEKTRUM VÝSTUPNÍHO SIGNÁLU ZESILOVAČE TŘÍDY B.....                    | 6  |
| OBR. 3.4: MALÉ PŘECHODOVÉ ZKRESLENÍ U ZESILOVAČŮ TŘÍDY AB.....                    | 6  |
| OBR. 3.5: SCHÉMA ZAPOJENÍ ZESILOVAČE TŘÍDY AB S TRANZISTORY PNP .....             | 7  |
| OBR. 3.6: PŘENOSOVÁ CHARAKTERISTIKA DVOJČINNÉHO ZAPOJENÍ.....                     | 7  |
| OBR. 3.7: ZKRESLENÍ, KE KTERÉMU DOCHÁZÍ U ZESILOVAČŮ TŘÍDY C .....                | 8  |
| OBR. 3.8: SKLÁDÁNÍ VÝSTUPNÍHO SIGNÁLU U TŘÍDY C.....                              | 8  |
| OBR. 3.9: PRACOVNÍ BODY ZESILOVAČŮ TŘÍD A, B, AB A C [15] .....                   | 9  |
| OBR. 3.10: PULSNĚ ŠÍRKOVÁ MODULACE .....                                          | 10 |
| OBR. 3.11: PRINCIP ZESILOVAČE PRACUJÍCÍHO VE TŘÍDĚ T.....                         | 10 |
| OBR. 3.12: SCHÉMA ZÁKLADNÍHO ZAPOJENÍ ZESILOVAČŮ TŘÍDY E.....                     | 11 |
| OBR. 3.13: SCHÉMA ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ F .....                                     | 12 |
| OBR. 4.1: ZÁVISLOST THD+N NA VÝKONU PRO ZATĚŽOVACÍ IMPEDANCI 4 A 8 $\Omega$ ..... | 13 |
| OBR. 5.1: TA1101B TRIPATH .....                                                   | 14 |
| OBR. 5.2: APLIKACE KONCOVÉHO ZESILOVAČE TA2022.....                               | 15 |
| OBR. 5.3: TA2022 TRIPATH .....                                                    | 15 |
| OBR. 5.4: TA2020-020 TRIPATH.....                                                 | 16 |
| OBR. 5.5: TA3020 TRIPATH .....                                                    | 17 |
| OBR. 6.1: FYZIOLOGIE - KŘIVKY HLADIN STEJNÉ HLASITOSTI.....                       | 19 |
| OBR. 6.2: 24 VÝVODOVÉ POUZDRO.....                                                | 20 |
| OBR. 6.3: ZÁVISLOST ZKRESLENÍ THD+N NA VÝSTUPNÍM VÝKONU .....                     | 21 |
| OBR. 6.4: 32 PINOVÉ SSIP POUZDRO .....                                            | 23 |
| OBR. 6.5: HORNÍ STRANA DPS .....                                                  | 24 |
| OBR. 6.6: SPODNÍ STRANA DPS – VÝKONOVÁ A SIGNÁLOVÁ ZEM.....                       | 25 |
| OBR. 6.7: OSAZENÁ DPS.....                                                        | 25 |
| OBR. 6.8: SCHÉMA ZAPOJENÍ TDA4292 S EXTERNÍMI SOUČÁSTKAMI.....                    | 26 |
| OBR. 6.9: SCHÉMA ZAPOJENÍ TA2020-020 S EXTERNÍMI SOUČÁSTKAMI .....                | 27 |
| OBR. 7.1: BLOKOVÉ ZAPOJENÍ ZESILOVAČE PŘI MĚŘENÍ VSTUPNÍ IMPEDANCE .....          | 29 |
| OBR. 7.2: BLOKOVÉ ZAPOJENÍ ZESILOVAČE PŘI MĚŘENÍ VÝSTUPNÍ IMPEDANCE.....          | 30 |
| OBR. 7.3: MAXIMÁLNÍ VÝSTUPNÍ NAPĚTÍ PŘI PŘÍPUSTNÉM ZKRESLENÍ (0,3% THD+N) .....   | 31 |
| OBR. 7.4: ROVNÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA S FYZIOLOGIÍ A BEZ FYZIOLOGIE .....    | 32 |
| OBR. 7.5: PRŮBĚH VÝST. SIGNÁLU, BEZ FYZIOLOGIE, F= 50kHz.....                     | 33 |
| OBR. 7.6: PRŮBĚH ZKRESLEN. VÝST. SIGNÁLU, F = 1kHz.....                           | 33 |
| OBR. 7.7: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA ZESILOVAČE.....                              | 34 |
| OBR. 7.8: ZISK PŘI PŘENOSU NEZKRESLENÉHO SIGNÁLU .....                            | 35 |
| OBR. 7.9: POSUN PRŮBĚHŮ VSTUPNÍHO A VÝSTUPNÍHO SIGNÁLU .....                      | 35 |
| OBR. 7.10: FÁZOVÁ CHARAKTERISTIKA .....                                           | 36 |
| OBR. 7.11: FÁZOVÁ CHARAKTERISTIKA PŘI F = 10 Hz.....                              | 36 |
| OBR. 7.12: ZÁVISLOST ÚČINNOSTI NA PŘÍKONU .....                                   | 38 |
| OBR. 7.13: ZÁVISLOST ÚČINNOSTI NA VÝKONU.....                                     | 39 |
| OBR. 7.14: ZÁVISLOST THD+N NA VÝKONU .....                                        | 40 |
| OBR. 7.15: ZÁVISLOST THD+N NA FREKVENCÍ .....                                     | 40 |

# Seznam tabulek

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABULKA 5.1: PŘEHLED ZESILOVAČŮ A BUDIČŮ FIRMY TRIPATH [13] .....              | 14 |
| TABULKA 5.2: PŘEHLED PARAMETRŮ PRO KONCOVÝ ZESILOVAČ TA1101B.....              | 15 |
| TABULKA 5.3: PŘEHLED PARAMETRŮ PRO KONCOVÝ ZESILOVAČ TA2020-020 .....          | 17 |
| TABULKA 5.4: PŘEHLED PARAMETRŮ BUDIČE TA3020 .....                             | 18 |
| TABULKA 6.1: MAXIMÁLNÍ HODNOTY.....                                            | 20 |
| TABULKA 6.2: PRACOVNÍ PODMÍNKY TDA4292 .....                                   | 20 |
| TABULKA 6.3: ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI TDA4292 .....                               | 20 |
| TABULKA 6.4: PRACOVNÍ PODMÍNKY TA2020-020.....                                 | 21 |
| TABULKA 6.5: MAXIMÁLNÍ HODNOTY.....                                            | 22 |
| TABULKA 6.6: TEPLOTNÍ VLASTNOSTI.....                                          | 22 |
| TABULKA 6.7: ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI TA2020-020.....                             | 22 |
| TABULKA 8.1: ROVNÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA .....                            | 32 |
| TABULKA 8.2: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA, BASY I VÝŠKY POTLAČENY .....          | 33 |
| TABULKA 8.3: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA, BASY I VÝŠKY ZDŮRAZNĚNY .....         | 33 |
| TABULKA 8.4: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA, BASY POTLAČENY, VÝŠKY ZDŮRAZNĚNY..... | 33 |
| TABULKA 8.5: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA, BASY ZDŮRAZNĚNY, VÝŠKY POTLAČENY..... | 34 |
| TABULKA 8.6: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA, NEZKRESLENÝ VÝSTUP .....              | 34 |
| TABULKA 8.7: FÁZOVÁ CHARAKTERISTIKA.....                                       | 35 |
| TABULKA 8.8: ŠUMOVÉ VL. ZESILOVAČE .....                                       | 37 |
| TABULKA 8.9: ÚČINNOST ZESILOVAČE PRO 1 KANÁL .....                             | 38 |
| TABULKA 8.10: ÚČINNOST ZESILOVAČE PRO 2 KANÁLY .....                           | 38 |
| TABULKA 8.11: THD+N ZKRESLENÍ V ZÁVISLOSTI NA VÝKONU .....                     | 39 |
| TABULKA 8.12: THD+N ZKRESLENÍ V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI.....                   | 39 |

# 1.Úvod

Název třídy zesilovačů „T“ byl zaveden firmou TRIPATH a zesilovače pracující v této třídě jsou průlomem v nelineárním digitálním zpracování signálů. Zesilovače pracují na podobném principu jako ve třídě D, která pracuje na principu PWM, pulsně - šířkové modulace, ale liší se vylepšenou a důkladně propracovanou technologií (algoritmem) řízení. To vede k mnohem vyšší účinnosti výkonového zesilovače, která dosahuje až 90%. Dalším výsledkem vylepšení technologie zpracování je velmi malé zkreslení a dosažení velkých výstupních výkonů. Zesilovače, pracující v této třídě, mají perfektní zvukové vlastnosti, což je pro zákazníka rozhodující.

Mezi další základní požadavky na dobrý nízkofrekvenční audio zesilovač z hlediska odběratele jsou právě zmíněná vysoká účinnost koncových stupňů, nerozeznatelné zkreslení, velký dynamický rozsah a nízká cena.

Následující kapitoly jsou věnovány podrobnějšímu popisu principu funkce zesilovačů, jejich vlastnostem, výhodám a nevýhodám. Dále také komerčně dostupným integrovaným obvodům třídy T. V druhé části bakalářské práce bude proveden výběr nejvhodnějšího obvodu koncového zesilovače třídy T s výstupním výkonem 2x20W, návrh schématu zapojení s tímto zesilovačem a korekčním předzesilovačem TDA4292, s možností ovládání hlasitosti, výšek a basů. V poslední části budou zobrazeny naměřené charakteristiky zkonstruovaného zesilovače, srovnání s teoretickými hodnotami, uváděnými v literaturách a zhodnocení dosažených parametrů audio zesilovače.

## 2. Rozdělení zesilovačů

Třída zesilovače je dána polohou pracovního bodu na převodní charakteristice tranzistoru. Převodní charakteristika je závislost kolektorového proudu na proudu báze.

Zesilovače jsou z tohoto pohledu děleny do 3 skupin [15],[16],[17]:

1. základní (lineární) ..... A, B, AB, C
2. spínané (impulsní) ..... D, E, S, T
3. další (s preregulátorem, laděné) ..... F, G, H

V základních třídách volíme podle hodnoty, která je pro nás rozhodující. Chceme-li získat nezkreslený signál, musíme počítat s nižší hodnotou účinnosti. Potřebujeme-li naopak vysoký výkon nebo velkou účinnost, objeví se problémy s chlazením a s přechodovým zkreslením zesilovače.

Zesilovače ve třídě A mívají účinnost 30% až 40% a mají jednočinné zapojení.

Ve třídách B, AB a C (dvojčinná zapojení) mohou být schémata zapojení prakticky stejná s tím, že odpory v děliči (pracovní bod zesilovače) musí být nastaveny tak, aby klidové předpětí bylo:

- ve třídě B cca 0,7 V, respektive hodnota, při které tranzistory začíná procházet proud
- ve třídě AB větší než je napětí, při kterém se tranzistory otvírají
- ve třídě C menší než je napětí, při kterém se tranzistory otvírají

S ohledem na teplotní závislosti tranzistorů je nutné provést stabilizaci pracovního bodu s teplotou.

Účinnost bývá obvykle 50% až 65%, ve třídě C až 80%.

U spínaných zesilovačů musí být frekvence spínání volena několikanásobně vyšší než je nejvyšší přenášený kmitočet (pro šířku pásma 20kHz bývá obvykle cca 200kHz). Tepelné ztráty jsou způsobeny převážně spínáním tranzistorů, kdy je na tranzistoru velké napětí a proud.

Účinnost zesilovačů bývá většinou 70% až 90%.

## 3.Princip funkce zesilovačů

Tato kapitola je věnována typům zesilovačů a jejich rozdělení do tříd. U každé ze tříd jsou uvedeny výhody a nevýhody, plynoucí z principu jejich funkce, jejich využití a u některých principiální schéma.

### 3.1. Základní třídy zesilovačů

#### 3.1.1. Princip funkce zesilovačů ve třídě A:

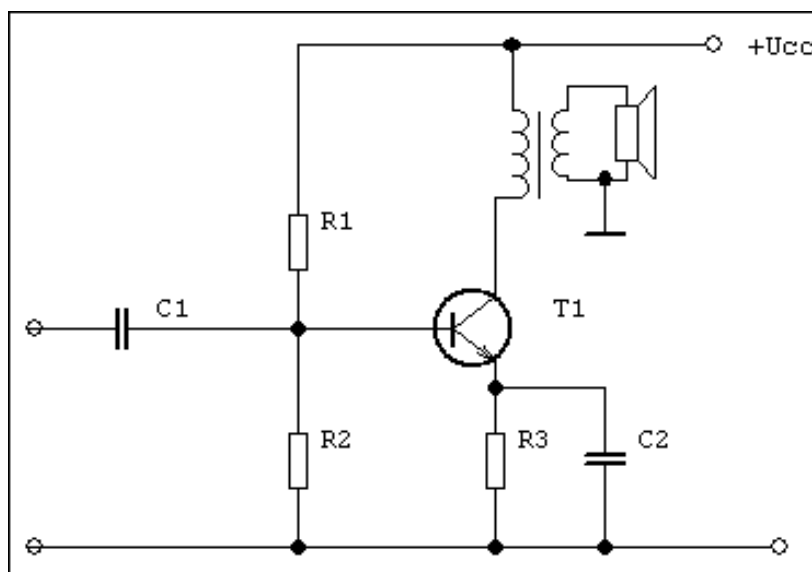
Výkonové součástky (bipolární tranzistory, MOSFET, elektronky atd.) se v koncovém stupni třídy A používají obvykle v jednočinném zapojení a klidový proud mají nastavený tak, aby byly stále ve vodivém (aktivním) stavu.

Díky velkému klidovému proudu pracují výkonové součástky přibližně ve středu své lineární pracovní oblasti (tranzistorem prochází proud po celou dobu periody vstupního střídavého signálu). Mají tedy ze všech tříd nejmenší zkreslení signálu.

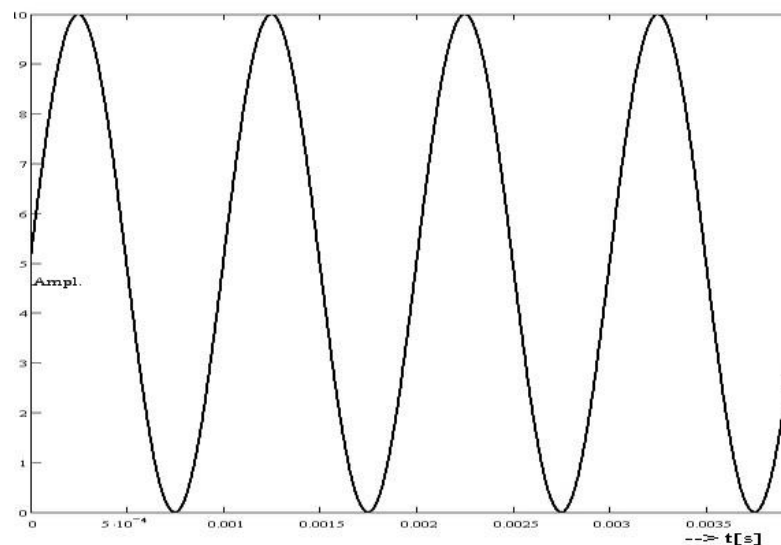
Nevýhodou třídy A je hodně malá energetická účinnost koncového stupně. Příkon je relativně velký a z velké části se mění v teplo.

Zesilovač vyžaduje robustní konstrukci s dobře zpracovaným odvodem tepla z výkonových součástek. Také jsou v něm kladeny značné nároky na výkonové součástky a na napájecí zdroj, a to vše si žádá poměrně vysoké finanční náklady na výrobu. Schéma můžeme vidět na **obrázku 3.1a**, simulovaný výstupní signál a spektrum na **obrázku 3.1b** a **3.1c** (ss složka není na obrázku simulace zobrazena) programem Mathcad.

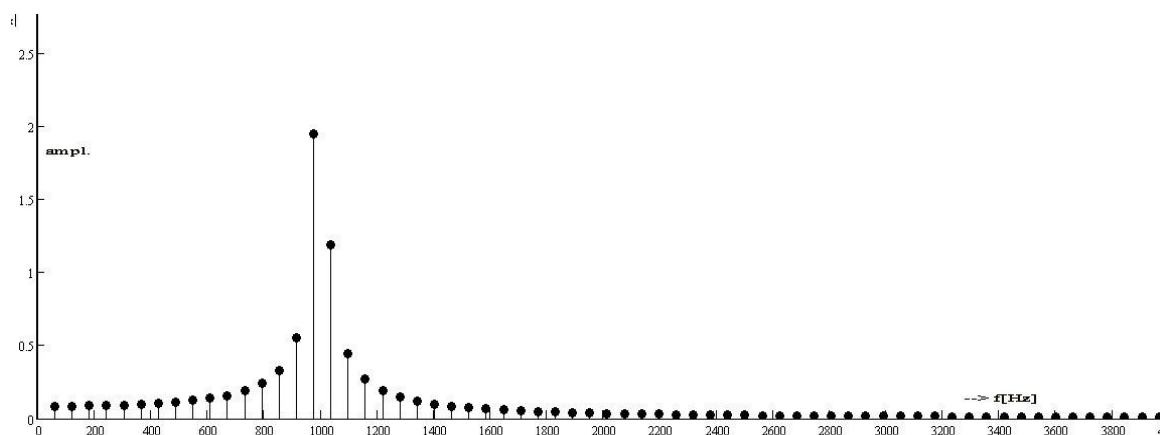
Výkonové zesilovače ve třídě A nejsou příliš časté, objevují se pouze na trhu High-End zařízení, kde se uvádí podíl zhruba 10 procent ze všech zesilovačů na spotřebitelském trhu.



Obr. 3.1a: Schéma zapojení zesilovače třídy A



Obr. 3.1b: Střídavý výstupní signál zesilovače třídy A s předpětím 5V



Obr. 3.1c: Spektrum výstupního signálu zesilovače třídy A

### 3.1.2. Princip funkce zesilovačů ve třídě B:

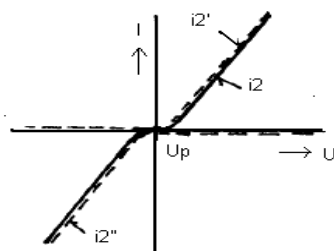
Výkonové součástky se v koncovém stupni třídy B používají ve dvojčinném zapojení a klidový proud mají nastavený na nulový. V jedné polovině koncového stupně jsou výkonové součástky aktivní pouze při kladné polaritě zpracovávaného signálu a při záporné polaritě signálu jsou nevodivé. V druhé polovině koncového stupně jsou tyto součástky aktivní pouze při záporné polaritě vstupního signálu a při kladné polaritě jsou neaktivní. Obě poloviny koncového stupně se pak v závislosti na polaritě nízkofrekvenčního signálu střídají v činnosti a vzájemně se doplňují (viz **obrázek 3.3b**, tvořeno programem Mathcad).

Přechod z nevodivého do aktivního stavu je pozvolný a výkonové součástky jsou v okolí průchodu vstupního signálu nulou v obou polovinách koncového stupně téměř nevodivé. Proto vzniká na průběhu výstupního signálu jakýsi "schod" (viz **obrázek 3.2** - přechod mezi kladnou a zápornou půlvlnou – přechodová charakteristika,  $i_2$  je výsledný proud,  $i_2'$  je charakteristika tranzistoru T2 a  $i_2''$  tranzistoru T3).

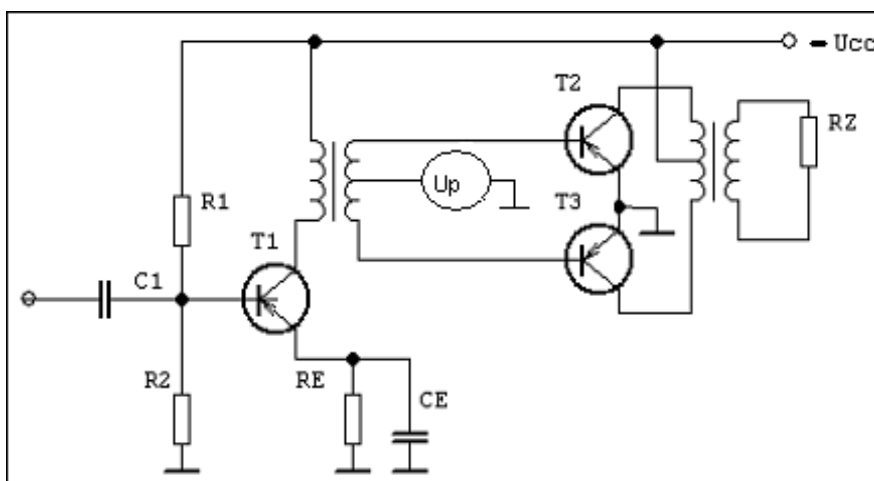
Vzniklé nelineární zkreslení signálu se nazývá přechodové, je velmi dobře slyšitelné a uplatní se zejména u signálů s malou amplitudou.

Zesilovače třídy B mají oproti třídě A větší účinnost – při nulovém vstupním signálu neodebírá koncový stupeň žádný proud. Při malém signálu se proudový odběr jen pozvolna zvětšuje. Schéma zesilovače této třídy znázorňuje **obrázek 3.3a**. Napětí  $U_p$  volíme tak, aby byl klidový proud nulový, ale aby se tranzistory začaly otvírat i při malém buzení. Ve spektru (**obrázek 3.3c**, tvořeno v programu Mathcad) je obsažena 3. harmonická složka.

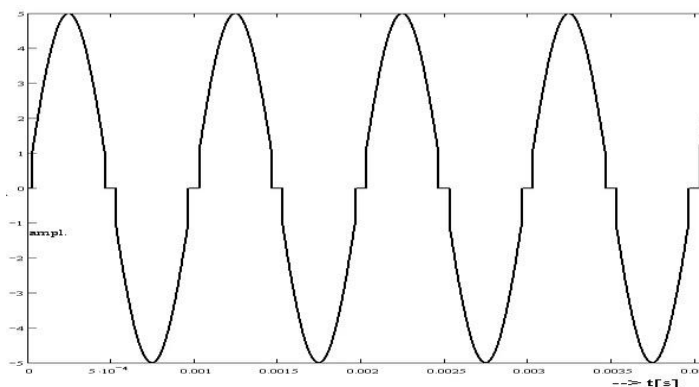
Výkonové zesilovače čistě ve třídě B se díky zkreslení v nízkofrekvenční technice téměř nepoužívají.



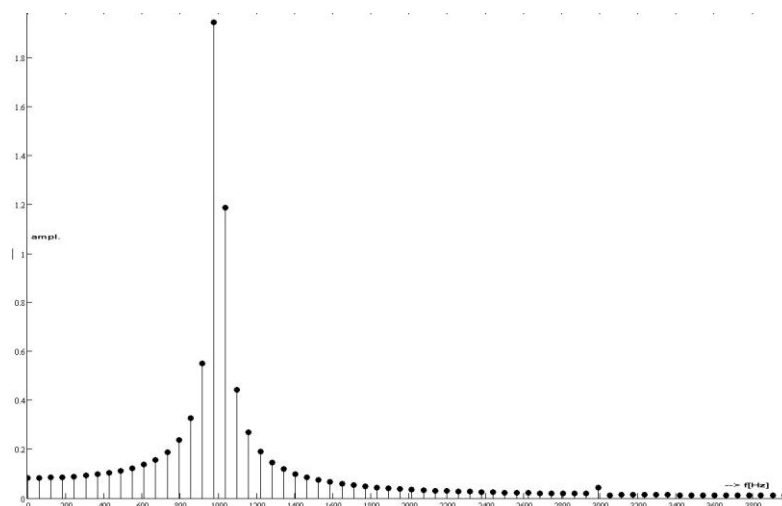
**Obr. 3.2:** Přechodová charakteristika tranzistoru



**Obr. 3.3a:** Schéma zapojení zesilovače třídy B



**Obr. 3.3b:** Viditelné přechodové zkreslení  
v místě kde se signály skládají



Obr. 3.3c: Spektrum výstupního signálu zesilovače třídy B

### 3.1.3. Princip funkce zesilovačů ve třídě AB:

Třída AB, jak už ze samotného označení vyplývá, využívá principy obou tříd - A i B, s tím, že se více podobá třídě B.

Jedná se v podstatě o zesilovač pracující ve třídě B se zavedeným malým klidovým proudem. V zapojení můžeme pozorovat rozdíl jen u zavedení odporu  $R_4$ .

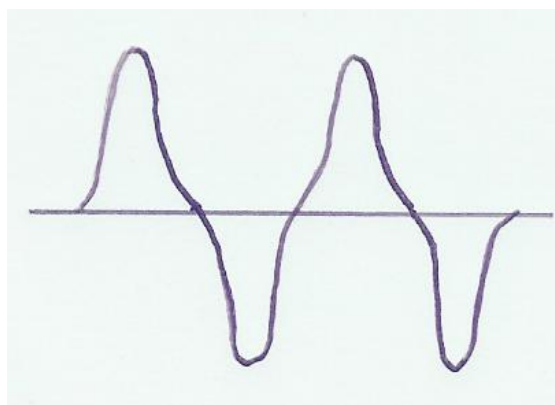
Zavedený klidový proud sice nepatrně zvyšuje spotřebu a zmenšuje účinnost, ale přesto má zesilovač mnohem větší účinnost než čistá třída A, a mnohem menší zkreslení než čistá třída B. Na **obrázku 3.4** můžeme pozorovat malé nelineární zkreslení v místě přechodu kladné půlvlny v zápornou a záporné v kladnou.

Je možné zjednodušeně říci, že při malých signálech pracuje zesilovač třídy AB jako zesilovač ve třídě A, a při velkých signálech jako zesilovač ve třídě B se všemi výhodami z toho vyplývajících - velkou účinností a malým nelineárním zkreslením.

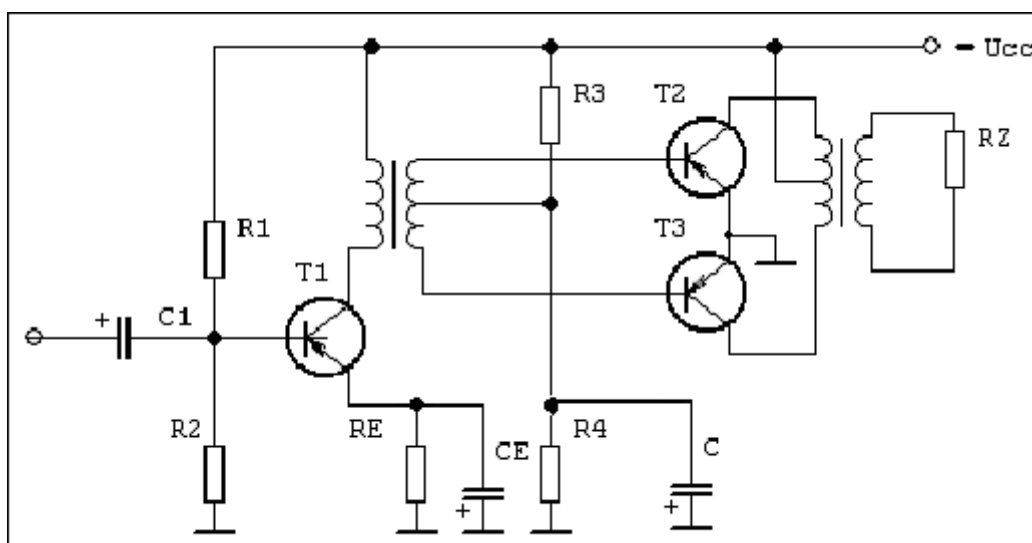
Výkonové zesilovače třídy AB se staly pro tyto vlastnosti velmi oblíbené a většina lineárních zesilovačů, které nám nabízí trh, pracují právě v této třídě.

Schéma zapojení zesilovače pracujícího v této třídě je zobrazeno na **obrázku 3.5**.

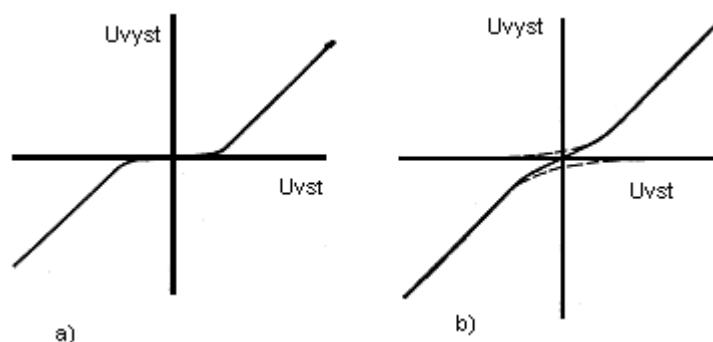
Kdybychom chtěli použít tranzistory NPN, napájecí napětí bude kladné a elektrolytické kondenzátory musí mít opačnou polaritu, jinak se na schématu nic nemění [1], [2]. Velmi často se používají tyto zesilovače bez transformátorové vazby, a jsou základem pro většinu výkonových audiozesilovačů [3], [4], [15].



Obr. 3.4: Malé přechodové zkreslení u zesilovačů třídy AB



Obr. 3.5: Schéma zapojení zesilovače třídy AB s tranzistory PNP



Obr. 3.6: Přenosová charakteristika dvojčinného zapojení

a) ve třídě B, b) ve třídě AB

### 3.1.4. Princip funkce zesilovačů ve třídě C:

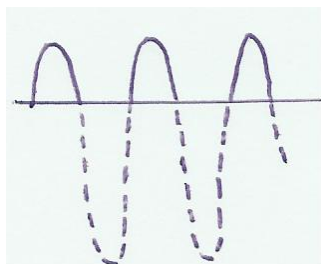
Výkonové součástky zesilovače ve třídě C mají nastaven klidový proud na nulový a zavedeno předpětí, které je dále zavírá. Pracovní bod je umístěn hluboko pod zánikem výstupního proudu. Proto přecházejí z neaktivního do aktivního stavu až ve špičkách vstupního signálu, to znamená, že tyto součástky budou otevřeny až při napětí, které dosahuje několik desítek procent napájecího napětí.

Proud v kolektorovém (výstupním) obvodu protéká dobu, která je stanovena úhlem otevření (ten je pro tuto třídu vždy menší než  $180^\circ$ ). Čím menší je úhel otevření, tím větší je účinnost.

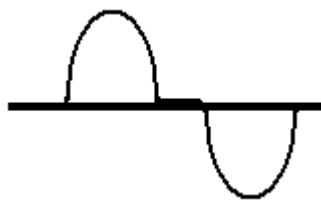
Zkreslení výstupního signálu je tedy mnohem větší než ve třídě B (obrázek 3.7 a 3.8) a tyto výkonové zesilovače ve třídě C nejsou pro akustiku v nízkofrekvenční technice použitelné.

Používají se však v jednočinném i ve dvojčinném zapojení pro vysokofrekvenční techniku ve vysílačích, kde vysoké zkreslení nevadí, protože je v kolektoru zapojen rezonanční obvod, který si jsme schopni vyladit tak, abychom získali námi chtěný signál. Dále se používá v aplikacích, kde nemusí být zesílení signálu (amplitudy) lineární. Mezi takové aplikace řadíme například zesilovače nosné frekvence, FM signálu, impulsů,...

Schéma zesilovače pracujícího ve třídě C získáme ze schématu pro třídu B (obrázek 3.3a), a to tak, že  $U_p$  nastavíme na takovou hodnotu, aby při zvyšování hodnoty vstupního signálu nedosahovalo dlouho bazové napětí cca 0,7V (napětí, při kterém se začínají tranzistory otvírat).



**Obr. 3.7:** Zkreslení, ke kterému dochází u zesilovačů třídy C



**Obr. 3.8:** Skládání výstupního signálu u třídy C

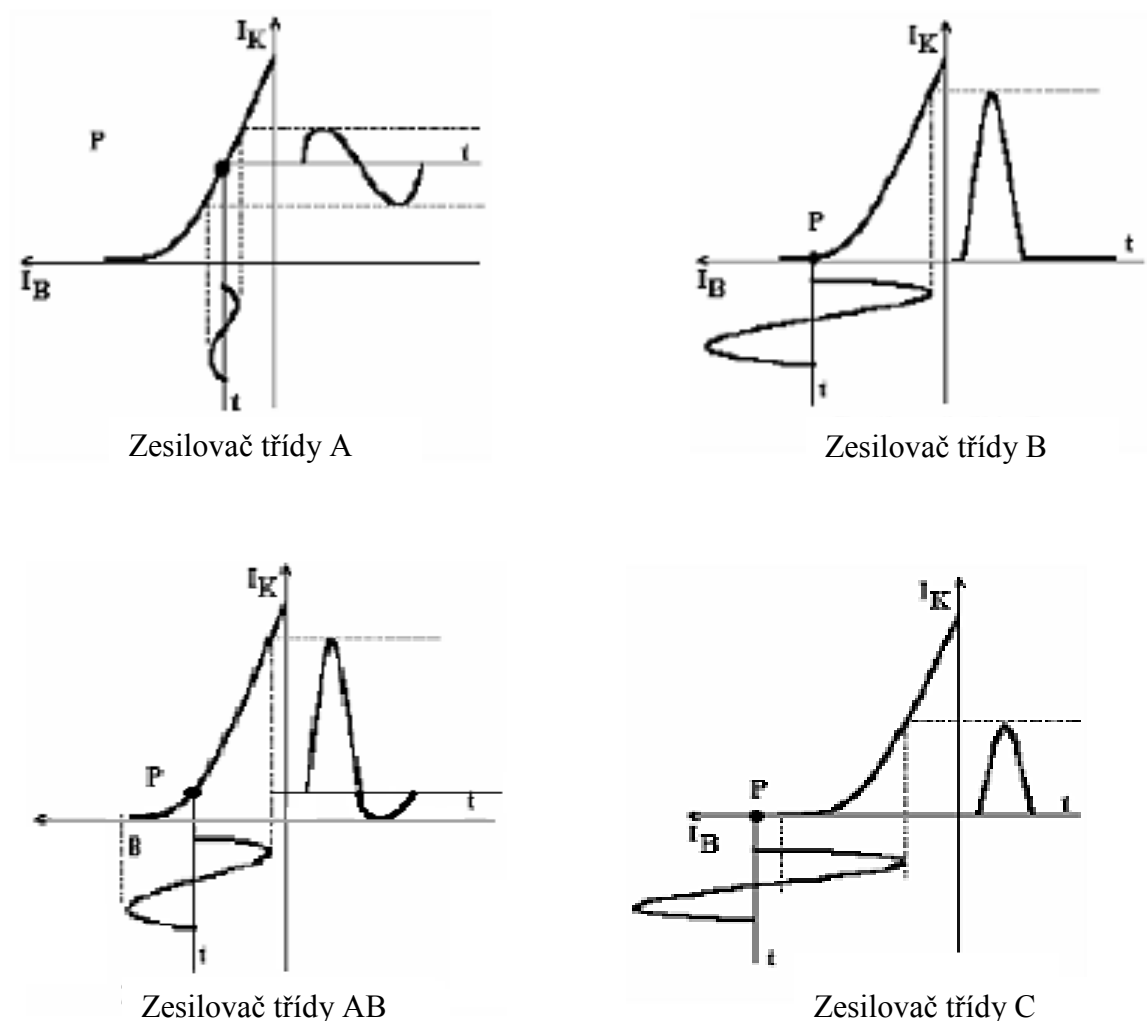
## 3.2. Pracovní body základní třídy zesilovačů

Zesilovače třídy A mají nastavený pracovní bod prakticky ve středu lineární části charakteristiky tranzistoru. Proud tedy protéká tranzistorem pořád a dochází k velkým ztrátám. Účinnost je tudíž velmi malá, ale ke zkreslení nedochází.

Ve třídě B máme pracovní bod nastaven tak, aby klidový proud byl nulový. Znamená to, že ztráty jsou mnohem nižší a účinnost tím pádem vyšší, ale dochází k velkému přechodovému zkreslení při přechodu signálu z kladné hodnoty do záporné a naopak. Navíc je velmi obtížné udržet toto předpětí (cca 0,7 V) s ohledem na teplotní závislost přechodu BE tranzistoru.

U třídy AB je klidový pracovní bod umístěn v koleni dynamické převodní charakteristiky. Tranzistorem tedy neustále teče jakýsi klidový proud, takže se nám mírně zvýší spotřeba a sníží účinnost, avšak zkreslení není tak velké.

Pro třídu C je charakteristický pracovní bod volen hluboko pod zánikem výstupního proudu a dochází tedy k relativně velkému zkreslení amplitudy signálu.



Obr. 3.9: Pracovní body zesilovačů tříd A, B, AB a C [15]

### 3.3. Spínané zesilovače

#### 3.3.1. Princip funkce zesilovačů ve třídě D:

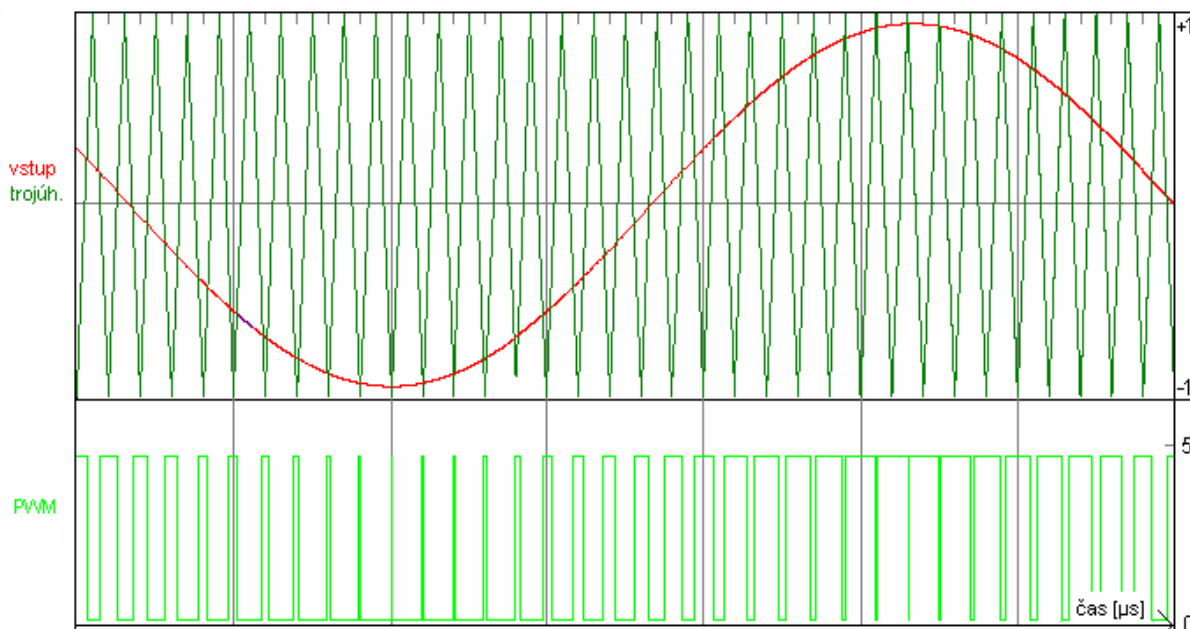
Jsou to zesilovače pracující na principu PWM – pulsně šířkové modulace (obrázek 3.10), kde je vstupní analogový signál přiveden na modulátor, a převeden na signál s obdélníkovým průběhem a proměnnou střídou.

Jestliže je vstupní napětí nulové, střída je 1:1. Tímto způsobem upravený signál budí spínací koncové tranzistory – většinou typu MOSFET. Na výstupu bývá obvykle zařazen vícepólový filtr LC, který umožňuje získat z PWM digitálního signálu opět signál analogový a zároveň potlačuje vyšší harmonické kmitočty, vyskytující se ve výstupním signálu.

Koncové tranzistory MOSFET pracují ve spínacím režimu, což znamená relativně malé výkonové ztráty a z toho plynoucí menší požadavky na chlazení a mnohem větší účinnost než na jakou jsme zvyklí z „jednodušších“ zařízení třídy AB.

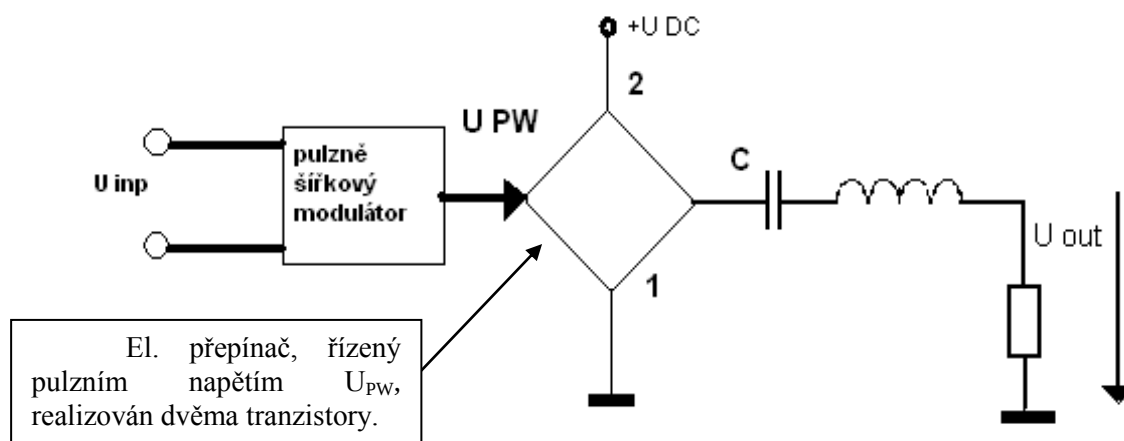
Problém nastává u vlastní realizace požadovaného zařízení, protože konstrukce je poměrně složitá (koncový stupeň je složen z diskretních součástek) a nároky na přesnost jednotlivých filtrů jsou vysoké.

Zesilovače se v amatérských podmínkách dříve nevyráběly vzhledem ke zmíněné složitosti realizace. Americká firma Tripath však představila na trhu řadu monolitických stereofonních zesilovačů a budičů koncových stupňů třídy D. Tím se rozvíjí jejich využití v praxi.



**Obr. 3.10:** Pulsně šířková modulace

(nahore zdrojový signál, dole po PWM)

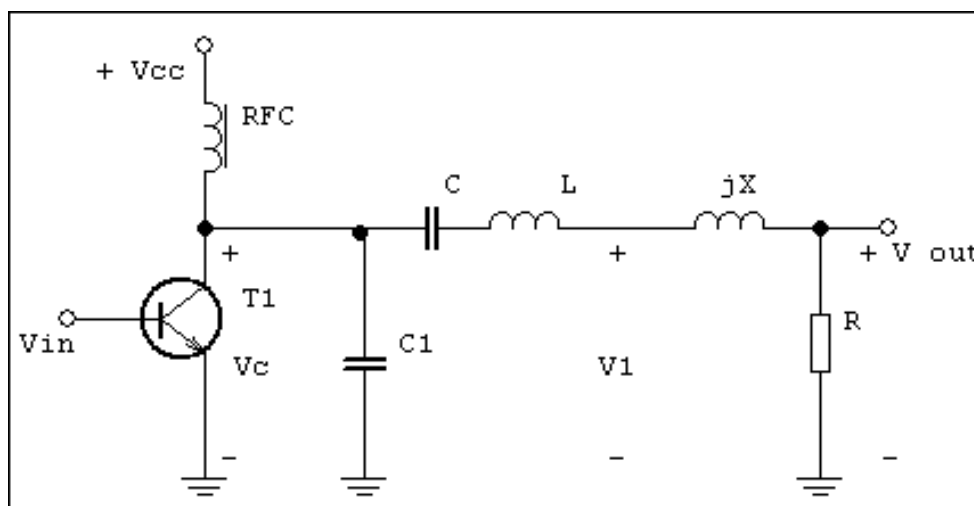


**Obr. 3.11:** Princip zesilovače pracujícího ve třídě T

(LC filtr filtruje první harmonickou složku)

### 3.3.2. Princip funkce zesilovačů ve třídě E:

**Třída E** je modifikací třídy D. Má paralelní DC napájení a jeho spínač zkratuje sběrný kondenzátor C, který je napájen přes tlumivku. Spínač je ovládán vstupním signálem a je za ním umístěn už známý LC obvod.



Obr. 3.12: Schéma základního zapojení zesilovačů třídy E

### 3.3.3. Princip funkce zesilovačů ve třídě S:

**Třída S** využívá opět principů digitálního zpracování signálů. Na výstupu je umístěna dolní propust místo pásmové propusti LC, známé například ze třídy D. Můžeme pak mluvit také o této třídě jako o širokopásmové třídě D.

### 3.3.4. Princip funkce zesilovačů ve třídě T:

**Třída T** Zesilovače postavené v této třídě pracují prakticky stejně jako zesilovače třídy D, avšak T třída je obohacená o skvěle propracovaný algoritmus řízení.

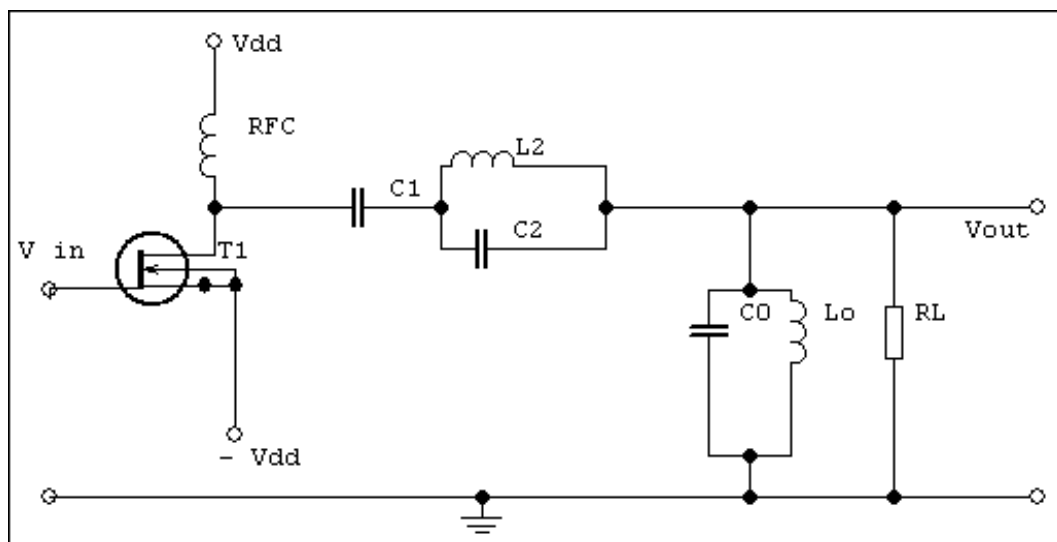
## 3.4. Další zesilovače

**Třída G** je v podstatě stejná jako třída AB, pouze napájecí napětí se mění skokem a přizpůsobuje se výkonu na výstupu.

**Třída H** je v podstatě také stejná jako třída AB, ale velikost napájecího napětí se mění plynule a také se přizpůsobuje výkonu na výstupu. Má mírně vyšší účinnost.

**Třída F** je úzkopásmový zesilovač, který se budí harmonickým signálem a používá výstupní filtry na tvarování napětí a proudu na D (drain) MOSFET tranzistoru.

Pravoúhlé napěťové pulsy mají pouze základní a liché harmonické. Jednocestně usměrněný harmonický proudový signál má pouze základní a sudé harmonické složky.



Obr. 3.13: Schéma zesilovače ve třídě F

## 4. Zesilovač třídy T

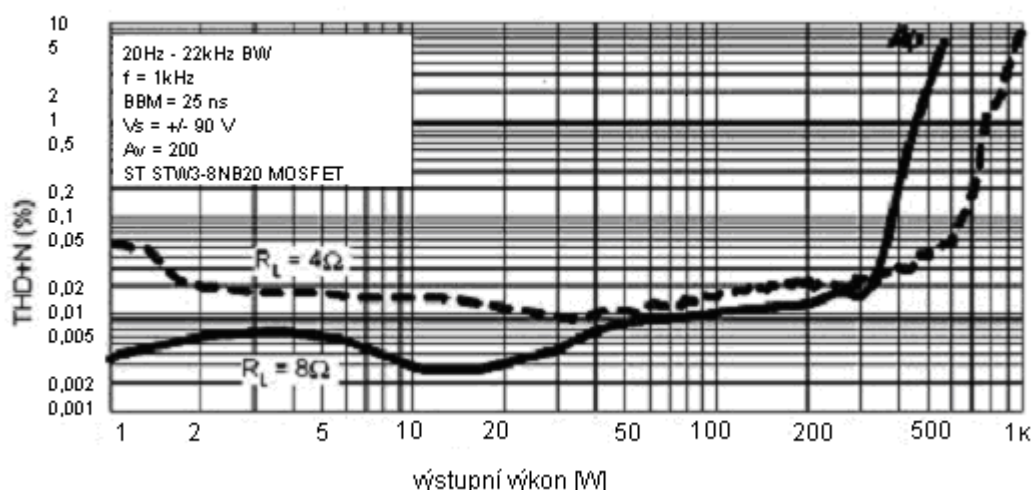
Využívá se zde jak digitální tak analogové zpracovávání signálu. Ve zpětné vazbě má navíc zařazen programovatelný mikroprocesor a modulace zpracovávaného signálu využívá upravených, patentovaně chráněných, modulačních technik - u řady výrobků založených na adaptivní verzi  $\sigma$ - $\delta$  modulátoru 2. řádu, kdy je propust tvořená jedinou cívkou a kondenzátorem, s proměnnými multiplikačními koeficienty. Na vstupu je zařazena horní propust, zamezující průniku kmitočtů pod 10 Hz a obvod pro nastavení nulového výstupního napětí – DC offset [6], [14].

Obvody TRIPATH třídy T nepracují se stálou spínací frekvencí. Tento spínací kmitočet se mění podle amplitudy vstupního signálu od 200 kHz až do 1,5 MHz. Spínací pulsy závisí na individuálních charakteristikách koncových tranzistorů.

### 4.1. Technologie DPP (Digital power processing)

Tato technologie slučuje výhody zesilovačů třídy AB - špičkovou kvalitu zvuku, kde dochází obvykle k malému harmonickému zkreslení THD+N (Total Harmonic Distortion + Noise – harmonické zkreslení + šum) okolo 0,02% při výstupním výkonu do 60% maximálního jmenovitého výkonu, a velkou účinnost, a to i při výstupním výkonu blízkém maximálnímu výkonu jmenovitému.

Obvykle mají zesilovače, postavené na této technologii, účinnost vyšší než 90%, bez celkové analogové zpětné vazby harmonické zkreslení THD menší než 0,01%.



Obr. 4.1: Závislost THD+N na výkonu pro zatěžovací impedanci 4 a 8  $\Omega$

## 5. Součástky dostupné na trhu

Řadu výkonových zesilovačů, pracujících ve třídě T od firmy Tripath Technology, které využívají již zmíněnou patentovanou technologii Digital Power Processing (DPP), tvoří v současné době více jak jedna desítka obvodů.

První tři obvody (TA1101 B, TA2020-020 a TA2022) jsou úplné výkonové zesilovače, včetně koncového stupně s výkonovými tranzistory, které jsou součástí čipu integrovaného obvodu.

Ostatní obvody (TA3020, TA0102A, TA0103A a TA0104A) koncový stupeň nemají a jejich výstupy fungují jako "drivery". Můžeme si je představit jako budiče vnějších výkonových spínacích tranzistorů, které tvoří koncový stupeň výkonového zesilovače.

Následující tabulka (**tabulka 5.1**) uvádí základní orientační informace o těchto jmenovaných koncových zesilovačích a budičích třídy T. Ceny jsou však z roku 2002, tudíž je nutné brát je s jistou rezervou.

| Koncové zesilovače a budiče ve třídě T firmy TRIPATH |                   |                 |                  |                 |
|------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Typ                                                  | funkce            | jm. výst. výkon | pouzdro          | orientační cena |
| TA1101B                                              | koncový zesilovač | 2 x 10 W        | 30-pin Power SOP | 198 Kč          |
| TA2020-020                                           | koncový zesilovač | 2 x 20 W        | 32-pin SSIP      | 462 Kč          |
| TA2022                                               | koncový zesilovač | 2 x 90 W        | 32-pin SSIP      | 1500 Kč         |
| TA3020                                               | budič             | 2 x 300 W       | 48-pin DIL       | 722 Kč          |
| TA0102A                                              | budič             | 2 x 150 W       | 38-pin QUAD      | 4250 Kč         |

**Tabulka 5.1:** Přehled zesilovačů a budičů firmy TRIPATH [\[13\]](#)

### 5.1. Koncový zesilovač TA1101B

- Stereo 10W digitální zesilovač
- Architektura třídy T, patentovaná DPP technologie
- Zesiluje v pásmu o šířce 100 kHz SCAD a DVD zvukových signálů s typickým zkreslením 0,04% THD+N
- Lze dosáhnout účinnosti vyšší než 80%
- Vstupy na volbu režimu ztlumení a spánku
- Potlačení jiskření při zapínání a vypínání
- Ochranu pro podpětí a přepětí
- Výstupní ochranu před zkratem
- 30 pinové výkonové SOP pouzdro



**Obr. 5.1:** TA1101B TRIPATH

|                           | minimum | typické | maximum |
|---------------------------|---------|---------|---------|
| Výstupní výkon (4Ω)       | 9 W     | 11 W    | -       |
| Výstupní výkon (8Ω)       | 5,5 W   | 6 W     | -       |
| Šířka pásma               | 22 Hz   | -       | 22 kHz  |
| Odstup signálu od šumu    | -       | -89 dB  | -       |
| THD+N 9W                  | -       | 0,04 %  | -       |
| Amplitudové zkreslení     | -       | 0,18 %  | 0,5 %   |
| Odstup kanálů             | 50 dB   | 55 dB   | -       |
| Přepínací frekvence       | 100 kHz | -       | 1 MHz   |
| Napájecí napětí           | 8,5 V   | 12 V    | 13,2 V  |
| Klidový proud             | -       | 61 mA   | 75 mA   |
| Provozní teplota (vzduch) | 0 °C    | -       | +70 °C  |

**Tabulka 5.2:** Přehled parametrů pro koncový zesilovač TA1101B

## 5.2. Koncový zesilovač TA2022

- Stereo 90W digitální zesilovač
- Architektura třídy T, patentovaná DPP technologie
- Typické zkreslení 0,1% THD+N (pro výkon 90 W, 4 Ω)
- Lze dosáhnout účinnosti kolem 90%
- Zesiluje v pásmu o šířce 100 kHz SCAD a DVD zvukových signálů
- Dynamický rozsah 102 dB
- Možnost přímého připojení zdroje
- Nadproudová ochrana
- Ochrana pro podpětí a přepětí
- 32 pinové SSIP pouzdro



**Obr. 5.2:** Aplikace koncového zesilovače TA2022



**Obr. 5.3:** TA2022 TRIPATH

### 5.3. Koncový zesilovač TA2020-020

- Stereo 20W digitální zesilovač
- Architektura třídy T, patentovaná DPP technologie
- Zesiluje v pásmu o šířce 100 kHz SCAD a DVD zvukových signálů s typickým zkreslením 0,04% THD+N
- 10% THD+N pro výkon 23W, 4  $\Omega$
- Lze dosáhnout účinnosti vyšší než 80%
- Dynamický rozsah 103 dB
- Vstupy pro možnost ztlumení a spánku
- Možnost přímého připojení zdroje
- Nadproudová ochrana
- Ochrana před přehřátím
- Potlačení proudového nárazu při zapínání a vypínání
- 32 pinové SSIP pouzdro



Obr. 5.4: TA2020-020 TRIPATH

Náklady na výrobu zesilovače jsou poměrně malé, stačí nízké napájení, součástka má malé rozměry a musí mít alespoň malý chladič. Integrovaný obvod obsahuje vestavěný rozsáhlý samořídící okruh, který umožňuje automatické vypnutí, když se obvod přehřeje, nebo jím protéká příliš velký elektrický proud (overload). Má také logické výstupy pro přetížení (dochází k velkému zkreslení) a jiné vnitřní chyby. Vstupní impedance a zisk jsou nastavitelné, čímž je součástka přizpůsobitelnější.

TA2020-020 obsahuje DVD, autorádia, počítače, televize, ale i bateriemi napájená zařízení.

|                           | minimum | typické | maximum |
|---------------------------|---------|---------|---------|
| Výstupní výkon (4Ω)       | -       | 13 W    | -       |
| Výstupní výkon (8Ω)       | -       | 8 W     | -       |
| Šířka pásma               | 22 Hz   | -       | 22 kHz  |
| Odstup signálu od šumu    | -       | -89 dB  | -       |
| THD+N 9W                  | -       | 0,03 %  | -       |
| Amplitudové zkreslení     | -       | 0,18 %  | 0,5 %   |
| Odstup kanálů             | 74 dB   | 80 dB   | -       |
| Přepínací frekvence       | 100 kHz | -       | 1 MHz   |
| Napájecí napětí           | 8,5 V   | 13,5 V  | 14,6 V  |
| Klidový proud             | -       | 60 mA   | -       |
| Provozní teplota (vzduch) | -40 °C  | -       | +85 °C  |

**Tabulka 5.3:** Přehled parametrů pro koncový zesilovač TA2020-020

## 5.4. Budič TA3020

- Součástka určená pro podporu (300W na kanál)
- Architektura třídy T
- Typické zkreslení 0,02% THD+N při 50W
- Lze dosáhnout účinnosti vyšší než 90%
- Vstupy pro možnost ztlumení
- Nadproudová ochrana
- Ochrana pro podpětí a přepětí
- 48 pinové DIL pouzdro



**Obr. 5.5:** TA3020 TRIPATH

Náklady na výrobu zesilovače jsou poměrně malé, stačí nízké napájení, součástka má malé rozměry a také musí mít alespoň malý chladič. Integrovaný obvod obsahuje vestavěný rozsáhlý samořídící okruh, který umožňuje automatické vypnutí, když se obvod přehřeje, nebo jím protéká příliš velký elektrický proud. Má také logické výstupy pro přetížení (dochází k velkému zkreslení) a jiné vnitřní chyby. Vstupní impedance a zisk jsou nastavitelné, čímž je součástka přizpůsobitelnější.

TA3020 obsahuje profesionální audio zesilovače, zesilovače pro subwoofery a autorádia.

|                        | minimum  | typické  | maximum  |
|------------------------|----------|----------|----------|
| Výstupní výkon (4Ω)    | 190 W    | 220 W    | -        |
| Výstupní výkon (8Ω)    | 100 W    | 120 W    | -        |
| Šířka pásma            | -        | 20 kHz   | -        |
| Odstup signálu od šumu | -        | -102 dB  | -        |
| THD+N 9W               | -        | 0,02 %   | -        |
| Amplitudové zkreslení  | -        | 0,03 %   | -        |
| Odstup kanálů          | -        | 97 dB    | -        |
| Přepínací frekvence    | 200 kHz  | -        | 1,5 MHz  |
| Napájecí napětí 1      | +/- 15 V | +/- 45 V | +/- 65 V |
| Klidový proud 1        | -        | 90 mA    | -        |
| Napájecí napětí 2      | +4,5 V   | +5 V     | +5,5 V   |
| Klidový proud 2        | -        | 45 mA    | -        |
| Napájecí napětí 3      | +9 V     | +10 V    | +12 V    |
| Klidový proud 3        | -        | 200 mA   | -        |

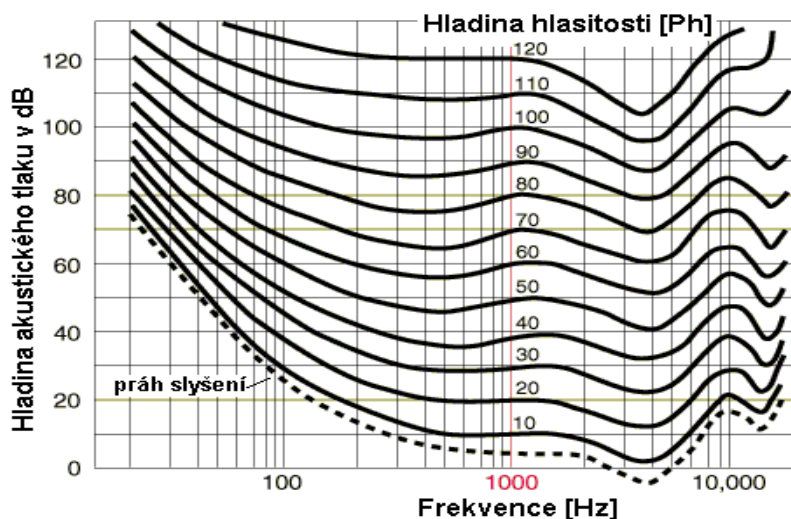
Tabulka 5.4: Přehled parametrů budiče TA3020

## 6. Realizace audio zesilovače ve třídě T

### 6.1. Korekční předzesilovač

Může být řešen pomocí pasivního korektoru ve zpětné vazbě tranzistoru [3], nebo integrovaného obvodu [4], [5]. Nevýhodou těchto zapojení je nutnost použití potenciometrů s dvojími dráhami, které musí mít stejný průběh, čehož se v praxi těžko dosáhne.

Otázka korekce je tedy řešena integrovaným obvodem TDA4292 – elektronickým stereofonním korektorem. Tato součástka umožňuje regulaci hlasitosti, basů, výšek, fyziologie (schopnost automaticky přidávat úroveň basů se snižováním hlasitosti – **obrázek 6.1** znázorňuje hladiny hlasitosti, které udávají, jaký akustický tlak způsobí na různých kmitočtech stejný vjem hlasitosti, jako referenční čistý tón s kmitočtem 1kHz), stereováhy (vyvážení L a P kanálu) a šířky pásma (bandwidth - nastavení šířky pásma audiofrekvenčního signálu) pomocí stejnosměrných napětí.



Obr. 6.1: Fyziologie - křivky hladin stejné hlasitosti

Obvod má malé harmonické zkreslení, schopnost přenášet velkou dynamiku, velkou šířku pásma a externích součástek k obvodu není potřeba mnoho.

Schéma zapojení je uvedeno na **Obrázku 6.8**. Napájecí napětí je přiváděno z koncového zesilovače přes filtrační člen, tvořený součástkami R32, C15 a C16. Vstupní napětí ze zdroje nízkofrekvenčního signálu je připojeno přes konektor X1. Kondenzátory C1, C2 oddělují stejnosměrnou složku. Korekční články pro nízké a vysoké kmitočty jsou převzaty z [8]. Referenční napětí pro potenciometry je filtrováno kondenzátory C7 a C17.

Pro snížení rušivých napětí jsou pouzdra potenciometrů připojena na nulový potenciál. Z experimentálních důvodů lze mezi pinem 8 (fyziologie) a pinem 18 (šířka pásma) vložit propojky, díky nimž se dá prověřit funkce zesilovače s aktivovaným a neaktivním nastavením těchto pinů.

Absolutní maximální hodnoty

|               |                               |               |
|---------------|-------------------------------|---------------|
| $V_s$         | napájecí napětí               | 0 V až 18 V   |
| $I_{ref}$     | referenční proud              | 5 mA          |
| $T_j$         | max. teplota čipu             | 150 °C        |
| $T_{storage}$ | teplota skladování            | -40 až 125 °C |
| $\Theta_{JA}$ | tepelný odpor pouzdro - okolí | 70 °C/W       |

**Tabulka 6.1:** Maximální hodnoty

při překročení těchto hodnot může dojít k poškození nebo zničení obvodu

Pracovní podmínky

|       |                 | MIN | TYP | MAX   |     |
|-------|-----------------|-----|-----|-------|-----|
| $V_s$ | napájecí napětí | 8   |     | 15,75 | [V] |
| $T_o$ | teplota okolí   | 0   |     | 70    | °C  |

**Tabulka 6.2:** Pracovní podmínky TDA4292Parametry při teplotě 25 °C

|                   |                                    | MIN           | TYP     | MAX       |      |
|-------------------|------------------------------------|---------------|---------|-----------|------|
| $I_s$             | proudová spotřeba při $V_s = 15V$  |               | 40      | 70        | [mA] |
| $V_{ref}$         | referenční napětí                  | 4,5           | 4,8     | 5,2       | [V]  |
| $R_{vst}$         | vstupní odpor                      | 10            | 14      | 18        | [kΩ] |
| $A_{hlas=0}$      | zesílení při hlasitosti rovné nule | -75           | -85     |           | [dB] |
| $R_{výst}$        | výstupní odpor                     |               | 0,2     | 0,3       | [kΩ] |
| $V_{IH}$          | vstupní napětí - high level        | $V_{ref} - 1$ |         | $V_{ref}$ | [V]  |
| $V_{IL}$          | vstupní napětí - low level         | 0             |         | 1         | [V]  |
|                   | neshoda kanálů basů a výšek        |               | + - 0,5 | + - 1,5   | [dB] |
| $\Delta V_{výst}$ | odchylka výstupního napětí         |               |         | 300       | [mV] |

**Tabulka 6.3:** Elektrické vlastnosti TDA4292

|    |    |              |                                                               |
|----|----|--------------|---------------------------------------------------------------|
| 1  | 24 | 1            | referenční napětí (2,4 V)                                     |
| 2  | 23 | 2, 3, 23, 24 | řízení výšek, basů, hlasitosti a balance                      |
| 3  | 22 | 4, 22        | vstup levého a pravého kanálu                                 |
| 4  | 21 | 5, 6, 20, 21 | připojení vnějších kapacitorů (bass)                          |
| 5  | 20 | 7, 19        | připojení vnějších kapacitorů (treble)                        |
| 6  | 19 | 8            | fyzilogie, připojeno na $V_{ref}$ (ON)                        |
| 7  | 18 | 18           | šířka pásma, nepřipojeno (OFF)                                |
| 8  | 17 | 9,17         | řízení šířky stereo frekvenčního pásma, přeslech $\sim 1/R_g$ |
| 9  | 16 | 10           | GND (zem)                                                     |
| 10 | 15 | 11,12,14,15  | výstup audiofrekvenčních signálů                              |
| 11 | 14 | 13           | blokování vnitřního napětí                                    |
| 12 | 13 | 16           | napájecí napětí                                               |

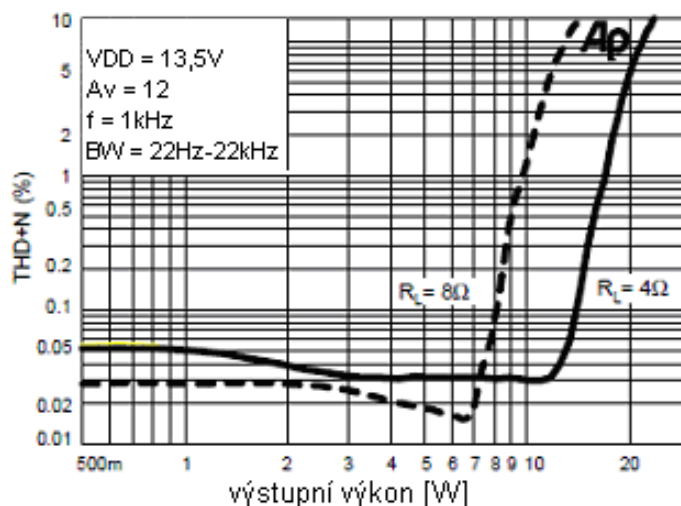
**Obr. 6.2:** 24 vývodové pouzdro

## 6.2. Koncový zesilovač

Jako koncový výkonový zesilovač byl vybrán integrovaný obvod firmy TRIPATH TA2020-020. Zatěžovací impedancí je 4 ohmová reproduktorová soustava.

Základní popis této součástky je uveden výše (kapitola 5.3), následně jsou uvedeny podrobnější charakteristiky. **Obrázek 6.3** znázorňuje závislost zkreslení THD+N na výstupním výkonu. Je zřejmé, že při výstupním výkonu nad cca 11W nabývá toto zkreslení hodnot v řádu desetin procenta a při 20W dosahuje 5%. **Tabulka 6.4** uvádí pracovní podmínky, maximální možné hodnoty veličin pro součástku jsou v **tabulce 6.5**. Dále jsou uvedeny teplotní parametry (**tabulka 6.6**) a elektrické vlastnosti (**tabulka 6.7**). **Obrázek 6.4** zobrazuje 32 pinové pouzdro. Do obvodu byl zapojen externí stabilizátor na 5V, který však nakonec nebyl potřeba, jelikož sám obvod TA2020-020 dostatečně účinný stabilizátor obsahuje. Napájení zesilovače je realizováno spínaným stabilizovaným zdrojem, který je možné zapojit klasicky do síťového napájení. Funkce mute a sleep jsou řešeny přepínačem, který je umístěn na předním panelu výrobku. Kondenzátory, které filtrují přepětí při náhlém odpojení zesilovače od napájení, C33 a C43, musí být připojeny co nejblíže k pinům 22 a 19. Tyto filtrační kapacitory zdroje napětí z výstupního stupně nejen pomáhají potlačit šum zdroje napětí, ale také absorbují výkyvy napětí na napájecích pinech, způsobené překmitými výstupy zesilovačů. Napěťové překmitky mohou být také způsobeny výstupní zpětnou vazbou induktorů během přepínání vyšších proudů, jako jsou zkratovaný výstup nebo buzení nízkých impedancí na vysokých úrovních. Pokud tyto kapacitory nejsou dostatečně blízko k pinům, může se objevit elektrické přepětí, které může vést k permanentnímu poškození TA2020-020.

### Závislost zkreslení na výstupním výkonu



**Obr. 6.3:** Závislost zkreslení THD+N na výstupním výkonu

### Pracovní podmínky

|          |                           | MIN | TYP  | MAX  |     |
|----------|---------------------------|-----|------|------|-----|
| $V_{DD}$ | napájecí napětí           | 8,5 | 13,5 | 14,6 | [V] |
| $V_{IH}$ | vstupní napětí high level | 3,5 |      |      | [V] |
| $V_{IL}$ | vstupní napětí low level  |     |      | 1    | [V] |

**Tabulka 6.4:** Pracovní podmínky TA2020-020

Absolutní maximální hodnoty

|                      |                              |                                         |
|----------------------|------------------------------|-----------------------------------------|
| V <sub>DD</sub>      | napájecí napětí              | 16 V                                    |
| V <sub>5</sub>       | napájecí napětí vst. části   |                                         |
| SLEEP                | vstupní napětí „spánku“      | -0,3 V až 6,0 V                         |
| MUTE                 | vstupní napětí „ztlumení“    | -0,3 V až V <sub>5</sub> +0,3 V         |
| ESD <sub>HBM</sub>   | ESD susceptibilita (pozn. 1) | pin 2, 30 1000 V<br>ostatní piny 2000 V |
| ESD <sub>MM</sub>    | ESD susceptibilita (pozn. 2) | 200 V                                   |
| T <sub>storage</sub> | teplota skladování           | -40 až 150 °C                           |
| T <sub>A</sub>       | pracovní teplota okolí       | -40 až 85 °C                            |
| T <sub>J</sub>       | max. teplota čipu            | 150 °C                                  |

**Tabulka 6.5:** Maximální hodnoty

při přesazení těchto hodnot může dojít k poškození nebo zničení obvodu

Pozn.1: Pro model lidského těla, 100pF, vybitý přes odpor 1,5 kΩ

Pozn.2: Strojový model, 220pF, vybitý přes všechny piny

Teplotní parametry

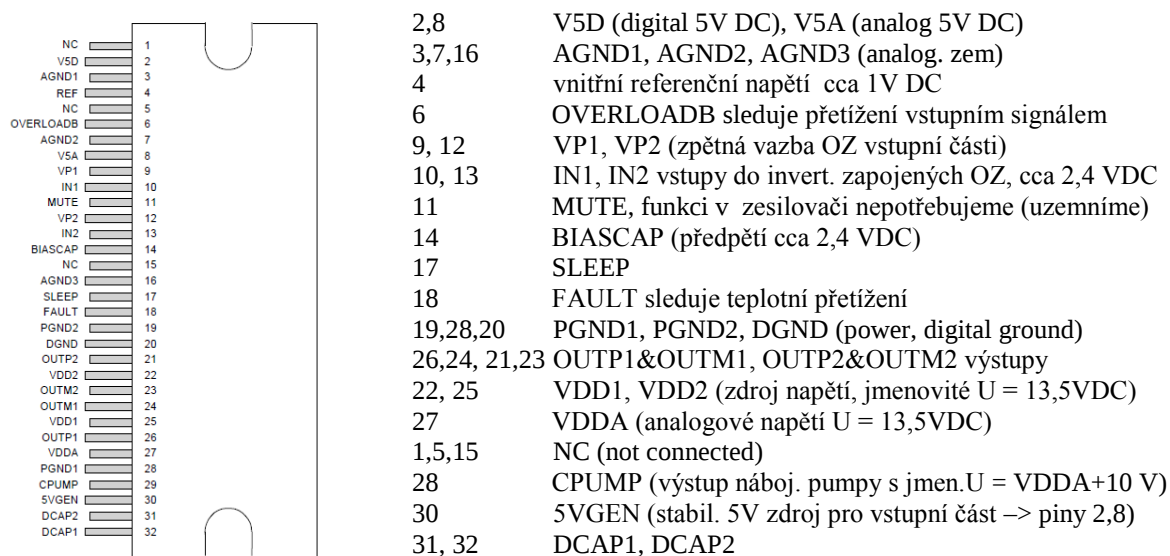
|                 |                             |          |
|-----------------|-----------------------------|----------|
| Θ <sub>JC</sub> | tepelný odpor čip - pouzdro | 3,5 °C/W |
| Θ <sub>JA</sub> | tepelný odpor čip - okolí   | 15 °C/W  |

**Tabulka 6.6:** Teplotní vlastnostiElektrické vlastnosti

Testovací obvod, pokud není specifikované jinak, V<sub>DD</sub> = 13,5 V, f = 1 kHz, šířka měřeného pásma je 22 kHz, zatěžovací impedance R<sub>L</sub> = 4 Ω

| Podmínky               |                                         |                                                    | MIN | TYP      | MAX |            |
|------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|-----|----------|-----|------------|
| P <sub>0</sub>         | výstupní výkon<br>(stálý poměr / kanál) | THD+N = 0,1%<br>THD+N = 10 %                       |     | 11<br>18 |     | [W]<br>[W] |
| I <sub>DD, MUTE</sub>  | proud MUTE                              | MUTE = V <sub>IH</sub>                             |     | 5,5      | 7   | [mA]       |
| I <sub>DD, SLEEP</sub> | proud SLEEP                             | SLEEP = V <sub>IH</sub>                            |     | 0,25     | 2   | [mA]       |
| I <sub>q</sub>         | klidový proud                           | V <sub>IN</sub> = 0 V                              |     | 64       | 75  | [mA]       |
| THD+N                  | celk. zkresl. (harm.+ šum)              | P <sub>0</sub> = 100 W / kanál                     |     | 0,03     |     | %          |
| IHF - IM               | Intermodulační zkreslení                | 19 kHz, 20 kHz, 1:1 IHF                            |     | 0,18     | 0,5 | %          |
| SNR                    | poměr signálu k šumu                    | P <sub>out</sub> = 1W, R <sub>L</sub> = 8 Ω        |     | 89       |     | dB         |
| CS                     | odstup kanálů                           | 0 dBr = 1W, f = 1kHz                               | 74  | 80       |     | dB         |
| PSRR                   | potlačení brumu z napájení              | V <sub>zvlnění</sub> = 100 mV                      | 60  | 80       |     | dB         |
| H                      | výkonová účinnost                       | P <sub>out</sub> = 12W/kanál, R <sub>L</sub> = 8 Ω |     | 88       |     | %          |
| V <sub>OFFSET</sub>    | offset výst. napětí                     | bez zátěže, MUTE = log. 0                          |     | 50       | 150 | mV         |
| V <sub>OH</sub>        | výstupní napětí - high level            |                                                    | 3,5 |          |     | V          |
| V <sub>OL</sub>        | výstupní napětí - low level             |                                                    |     |          | 1   | V          |
| e <sub>out</sub>       | výstupní šum. napětí                    | uzemněný AC vstup                                  |     | 100      |     | μV         |

**Tabulka 6.7:** Elektrické vlastnosti TA2020-020



Obr. 6.4: 32 pinové SSIP pouzdro

### 6.3. Napájení

K napájení zesilovače je třeba stabilizované vyfiltrované stejnosměrné napětí 13,5V (viz **tabulka 6.4**). Toto napětí je využito i jako napájení korekčního předzesilovače. Měření parametrů zesilovače probíhalo se stabilizovaným zdrojem 12,5V, který je na výkon 20W dostačující, avšak účinnost by byla větší a zkreslení při vysokých výkonech menší, kdyby byl použit zdroj s předepsanými hodnotami.

Celkový příkon zesilovače je 47W pro koncový stupeň a max. 1 W pro korekční předzesilovač (dle **tabulky 6.3**). Zdroj tedy musí být schopen dodávat stabilizované napětí alespoň do výkonu 48W. Maximální odebíraný proud ze zdroje bude ( $48 / 13,5$ ) 3,6 A.

Z důvodu bezpečnosti je napájení realizováno certifikovaným laboratorním zdrojem, nebo síťovým adaptérem pro daný výkon.

### 6.4. Zesílení

Přenos předzesilovače pro maximální hlasitost je 0 dB, tedy nezeslabuje ani nezesiluje, a na výstupu má signál o velikosti 225 mV, což je zvolená hodnota vstupního napětí. Na vstupu do koncového zesilovače je tedy 225 mV. Odpory R20, R21 a obdobně R22 a R23 slouží k nastavení zesílení koncového zesilovače pro levý a pravý kanál.

Je známo, že při výkonu 20W a zátěžové impedanci  $4\Omega$  bude na výstupu z koncového zesilovače napětí 8,944 V<sub>RMS</sub>.

Hodnota rezistorů R21 a R23 je 20k $\Omega$ . Podle vzorečku z datasheetu [7] vychází hodnoty rezistorů R20 a R22 na 75 k $\Omega$ .

## 6.5. Chlazení

Z teplotních charakteristik vyplývá, že tepelný odpor čip – okolí  $\Theta_{JA}$  je pouze  $15^{\circ}\text{C}/\text{W}$ . Dá se usuzovat, že účinnost pro zatěžovací impedanci  $4\Omega$  bude díky vyšším proudům nižší, než účinnost pro zatěžovací impedanci  $8\Omega$ , a to o 7%. Budeme tedy počítat s účinností zesilovače 81% [7].

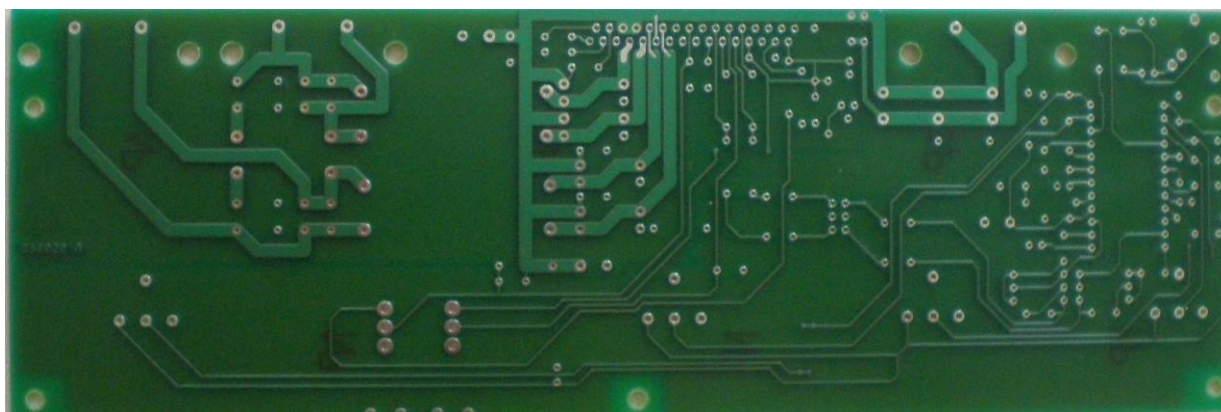
Příkon zesilovače ( $2 \cdot 20 / 0,81$ ) pak vychází 49,5 W. Na pouzdře bude tepelná ztráta cca 9,5 W. Vnitřní teplota čipu bude o ( $\Theta_{JA} \cdot 9,5$ )  $142,5^{\circ}\text{C}$  vyšší než teplota okolí. Pro teplotu okolí ( $25^{\circ}\text{C}$ ) bude teplota čipu  $167,5^{\circ}\text{C}$ , což je vyšší teplota, než hodnota tepelné pojistky ( $155^{\circ}\text{C}$ ). Z uvedeného je patrné, že konstrukce vyžaduje chladič.

Použijeme chladič s tepelným odporem cca  $4^{\circ}\text{C}/\text{W}$ . Výsledný tepelný odpor bude cca  $7,5^{\circ}\text{C}/\text{W}$  a při ztrátě 9,5 W bude teplota čipu obvodu cca ( $71,25 + 25$ )  $96,3^{\circ}\text{C}$ , tedy výrazně nižší než maximální povolená teplota čipu, což se projeví zlepšením spolehlivosti obvodu. Teplota chladiče bude asi ( $25 + 4 \cdot 9,5$ )  $63^{\circ}\text{C}$ .

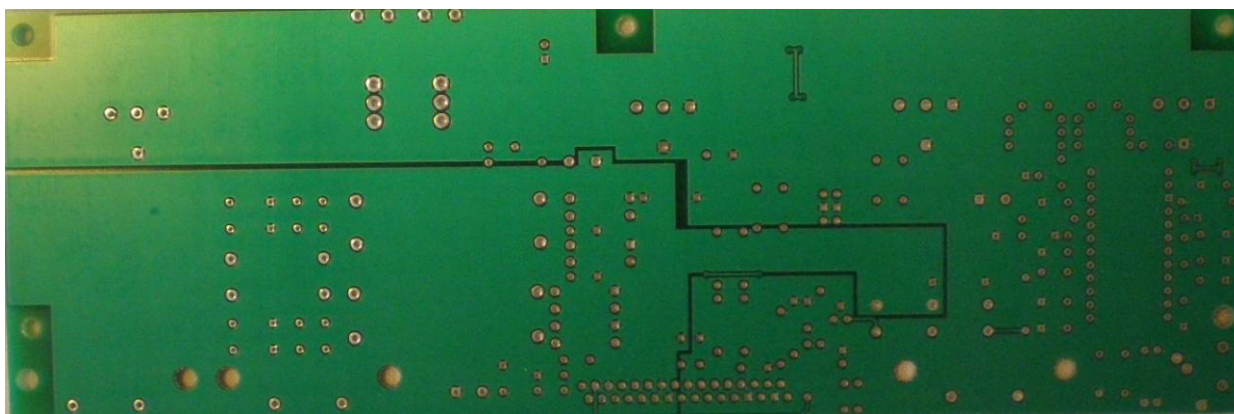
V praktickém návrhu je TA2020-020 obvod umístěn na kraji desky plošného spoje tak, aby bylo možné odvést teplo z obvodu do krytu zesilovače s příslušným tepelným odporem (chladiče).

## 6.6. Deska plošných spojů

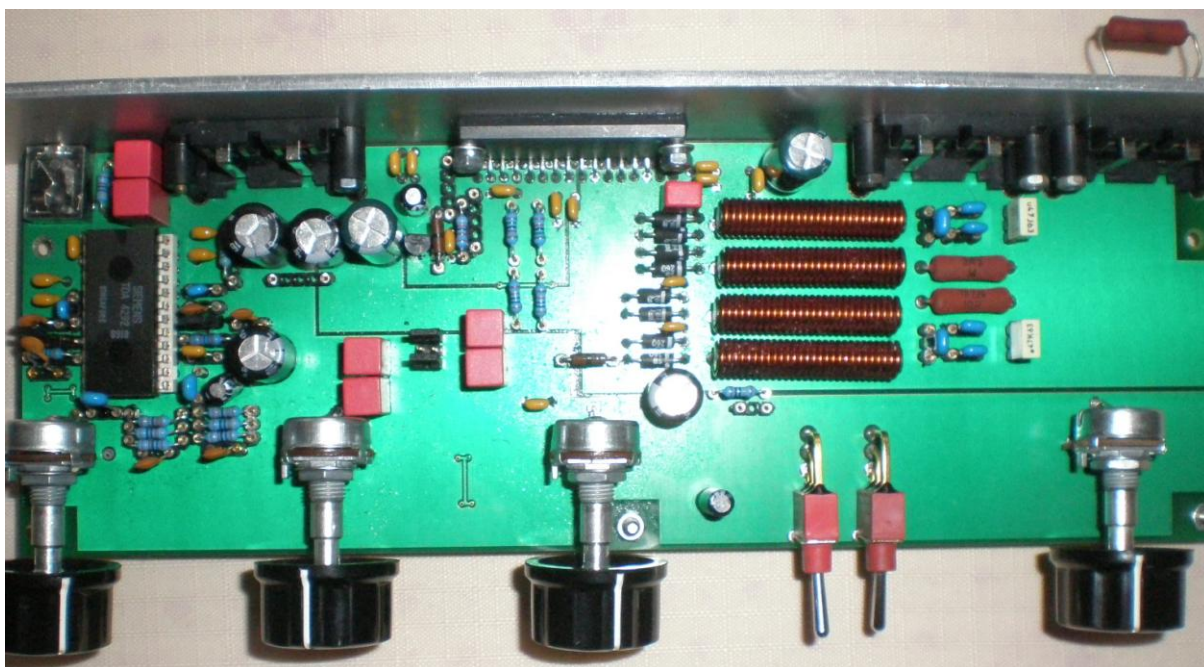
Deska plošných spojů musí být velmi dobře odrušena, vhodné je použít dvouvrstvou desku s prokovy a nepájivou maskou, pro ruční osazování. Tloušťka mědi alespoň  $105\mu\text{m}$ , tloušťka plošného spoje 1,5 mm. Konstrukční třída 4, materiál obyčejný ( SnPb ) HAL. Rozměry desky jsou 80x240 mm. V levé části desky je umístěn korekční předzesilovač a konektory na vstup audio signálu typu 3,5 jack a na napájení typu K282, které jsou zároveň uchyceny v zadním panelu. Před desku vpředu vyčnívají 4 potenciometry, které uživateli umožňují nastavení basů, výšek, rovnováhy kanálů a hlasitosti, a 2 přepínače, které umožňují zařízení přepnout do režimu mute nebo sleep. Ve středu desky je umístěn koncový zesilovač, který je připevněn vodivou pastou a šrouby k zadnímu panelu. Tento panel zároveň funguje jako dostatečný chladič integrovaného obvodu. V pravé části jsou upevněny v zadním panelu 2 konektory K282 pro výstup zesíleného audio signálu (pravý a levý kanál).



Obr. 6.5: Horní strana DPS



**Obr. 6.6:** Spodní strana DPS – výkonová a signálová zem

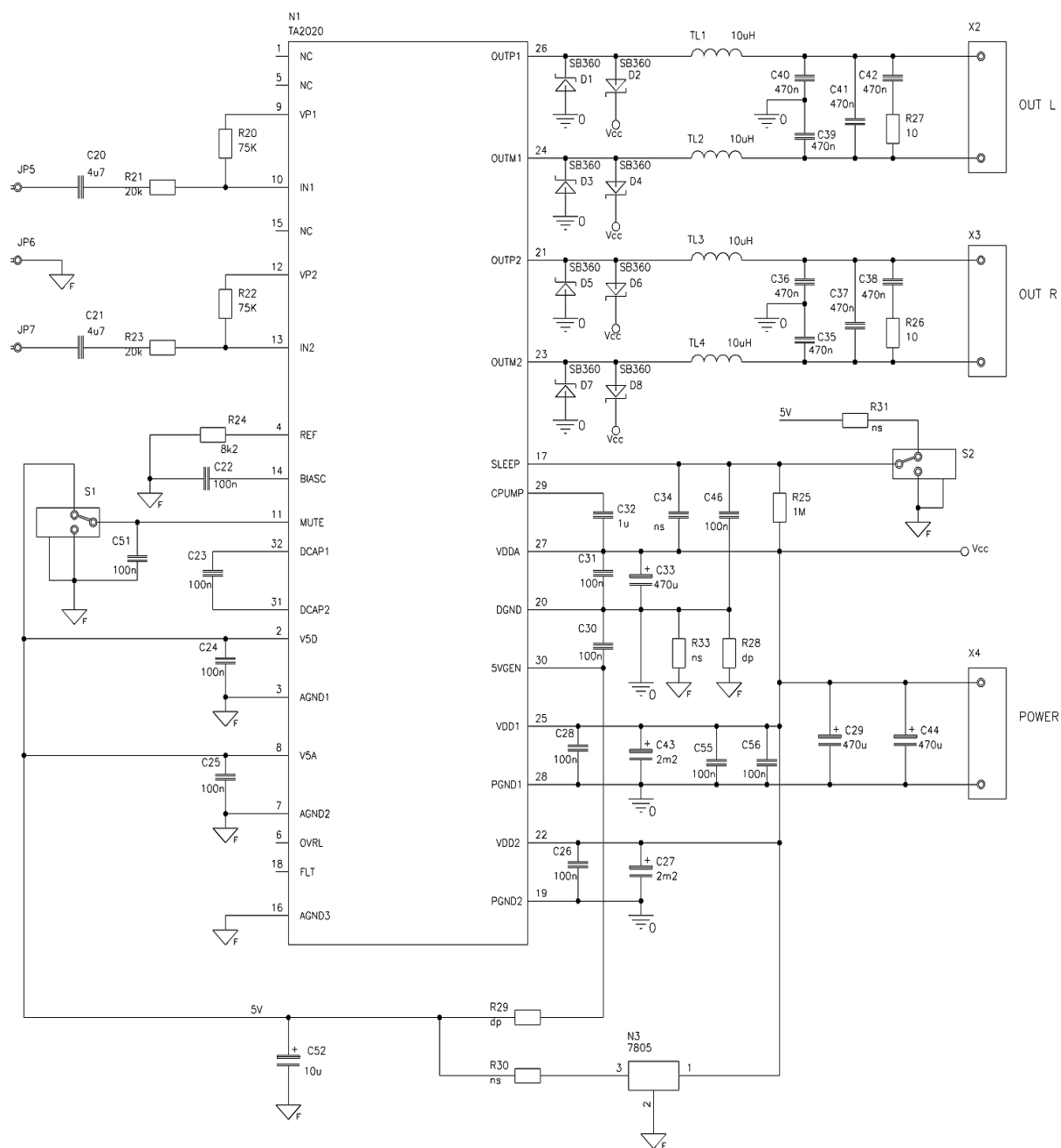


**Obr. 6.7:** Osazená DPS

### 6.7.1. Korekční předzesilovač



### 6.7.2. Koncový zesilovač



**Obr. 6.9:** schéma zapojení TA2020-020 s externími součástkami

## 6.8. Seznam součástek

### 6.8.1. Korekční předzesilovač

|    |               |                              |
|----|---------------|------------------------------|
| 4x | 4,7 $\mu$ F   | C1, C2, C53, C54             |
| 1x | 22 $\mu$ F    | C3                           |
| 2x | 22 nF         | C4, C10                      |
| 2x | 1,8 nF        | C5, C9                       |
| 2x | 68 nF         | C6, C8                       |
| 1x | 10 $\mu$ F    | C7                           |
| 2x | 3,3 nF        | C13, C11                     |
| 2x | 330 nF        | C14, C12                     |
| 6x | 0.1 $\mu$ F   | C15, C17, C47, C48, C49, C50 |
| 1x | 470 $\mu$ F   | C16                          |
| 1x | TDA4292       | N2                           |
| 4x | 25 k $\Omega$ | P1, P2, P3, P4               |
| 2x | 47 k $\Omega$ | R1, R2                       |
| 2x | 15 k $\Omega$ | R3, R4                       |
| 2x | 22 k $\Omega$ | R8, R5                       |
| 2x | 820 $\Omega$  | R9, R6                       |
| 2x | 1 k $\Omega$  | R10, R7                      |
| 1x | 56 $\Omega$   | R32                          |

### 6.8.2. Koncový zesilovač

|     |                |                                                            |
|-----|----------------|------------------------------------------------------------|
| 1x  | 10 $\mu$ F     | C52                                                        |
| 2x  | 4,7 $\mu$ F    | C20, C21                                                   |
| 12x | 0,1 $\mu$ F    | C22, C23, C24, C25, C26, C28, C30, C31, C46, C51, C55, C56 |
| 2x  | 2,2 mF         | C27, C43                                                   |
| 1x  | 1 $\mu$ F      | C32                                                        |
| 8x  | 0,47 $\mu$ F   | C35, C36, C37, C38, C39, C40, C41, C42                     |
| 3x  | 470 $\mu$ F    | C29, C44, C33                                              |
| 8x  | SB360          | D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8                             |
| 1x  | TA2020         | N1                                                         |
| 2x  | 20 k $\Omega$  | R21, R23                                                   |
| 2x  | 75 k $\Omega$  | R20, R22                                                   |
| 2x  | 10 $\Omega$    | R26, R27                                                   |
| 1x  | 8,2 k $\Omega$ | R24                                                        |
| 1x  | 1 M $\Omega$   | R25                                                        |
| 4x  | 10 $\mu$ H, 3A | L1, L2, L3, L4                                             |
| 2x  |                | S1, S2                                                     |

2vrstvá DPS  
TDA4292  
TA2020-020

1x konektor SCJ0354  
3x konektor K282  
stabilizátor 7805

4x kryt na potenciometr  
4x potenciometr PC1621NBK025  
4 ohmová reproduktory

## 7. Parametry realizovaného T zesilovače

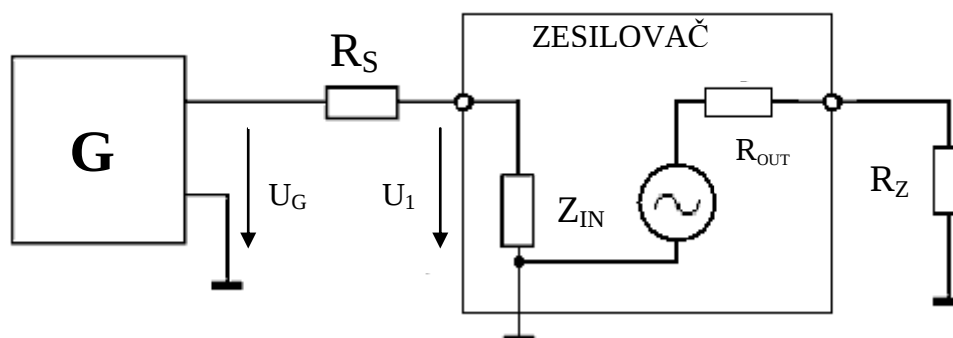
Měření parametrů NF výkonového zesilovače

### 7.1. Absolutní hodnota vstupní impedance zesilovače

Vstupní impedance nf zesilovače  $Z_{IN}$  je dána poměrem střídavých složek vstupního napětí a proudu. Praktické požadavky redukuje potřebu měření těchto veličin na měření jejich reálné části.

Je založen na měření napětí před a za pomocným sériovým odporem  $R_S$ , připojeným mezi vstup zesilovače a generátor. Pro měřený vstupní odpor  $R_{IN}$  platí za předpokladu zanedbatelné vstupní kapacity zesilovače tyto vzorce:

$$U_1 = U_G \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_S} \Rightarrow R_{IN} = R_S \frac{U_1}{U_G - U_1}$$



Obr. 7.1: blokové zapojení zesilovače při měření vstupní impedance

$U_G$  - efektivní hodnota výstupního napětí generátoru

$U_{1p,l}$  - efektivní hodnota vstupního napětí pravého, levého kanálu

$R_S$  - hodnotu v měřicím zapojení je volena srovnatelně s předpokládanou hodnotou měřeného vstupního odporu a tím je dosaženo dobré přesnosti měření.

Podmínkou správnosti měření je malá hodnota vstupního napětí  $U_1$  volená tak, aby v žádném stupni zesilovače nedošlo k přebuzení.

$$f = 1 \text{ kHz}$$

$$U_{1p} = 165 \text{ mV}$$

$$U_{1l} = 165 \text{ mV}$$

$$U_G = 320 \text{ mV}$$

$$P = 1 \text{ W}$$

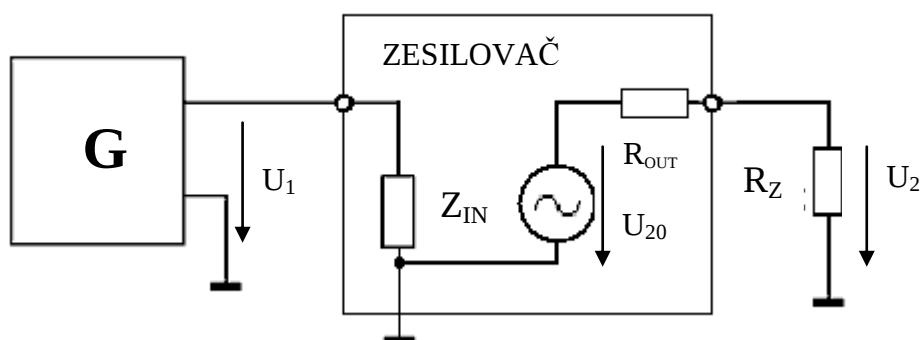
$$R_{IN} = 10000 \cdot \frac{0,165}{0,320 - 0,165} = 10,65 \text{ k}\Omega$$

Vstupní odpor zesilovače je 10,65  $\Omega$ .

## 7.2. Absolutní hodnota výstupní impedance zesilovače

Výstupní impedance nízkofrekvenčních zesilovačů je vnitřní impedance měřená na výstupních svorkách zesilovače při normálních provozních podmínkách. Bude opět hledána pouze její reálná složka. Princip měření je založen na vyhodnocení výstupního napětí zesilovače naprázdno  $U_{20}$  a výstupního napětí  $U_2$  při zatížení výstupu známým zatěžovacím odporem  $R_Z$ .

$$U_2 = U_{20} \frac{R_Z}{R_Z + R_{OUT}} \Rightarrow R_{OUT} = R_Z \frac{U_{20} - U_2}{U_2}$$



Obr. 7.2: blokové zapojení zesilovače při měření výstupní impedance

$R_{OUT}$  - výstupní impedance (odpor) zesilovače

$R_Z$  - ohmická zátěž

$U_{20\text{ p,l}}$  - nízkofrekvenční střídavé napětí při odpojené zátěži  $R_Z$  pravého, levého kanálu

$U_2$  - nízkofrekvenční střídavé napětí při připojené zátěži  $R_Z$

$U_1$  - vstupní nf napětí, kmitočet 1 kHz

$f = 1 \text{ kHz}$

$U_2 = 2,03 \text{ V}$

$U_{20\text{ p,l}} = 2,08 \text{ V}$

$R_Z = 4 \Omega$

$P = 1 \text{ W}$

$$R_{OUT} = 4 \cdot \frac{0,05}{2,03} = 0,1 \Omega$$

Výstupní odpor zesilovače je  $0,1 \Omega$ .

## 7.3. Napěťové zesílení

$U_{2L} = 7,22 \text{ V}$

$A_L = 42 \text{ V}$

$U_{2R} = 7,19 \text{ V}$

$A_R = 41,8 \text{ V}$

$U_{IN} = 172 \text{ mV}$

Napěťové zesílení na 1 kanál je 42.

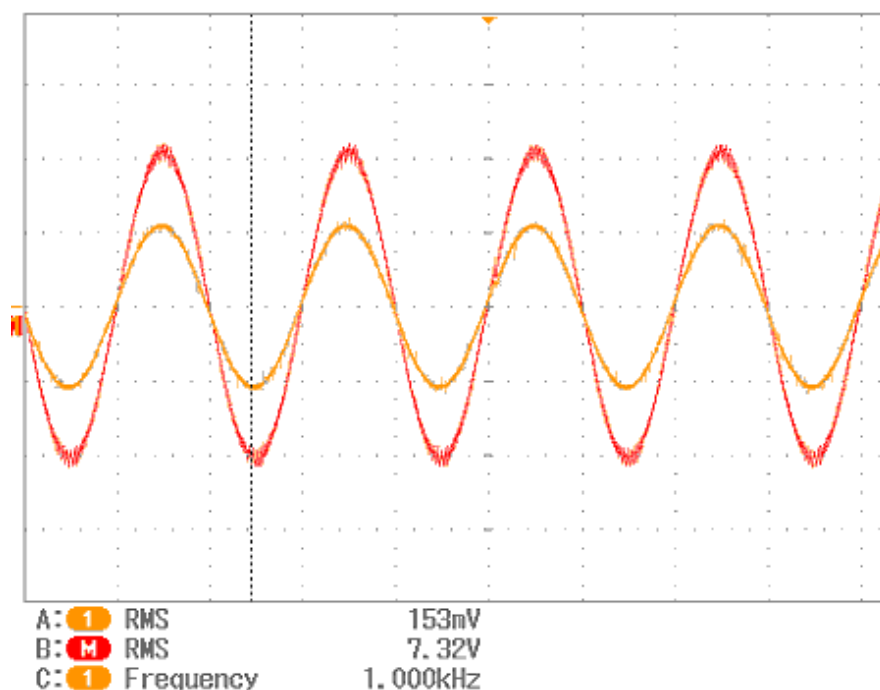
### 7.3.1. Maximální výstupní sinusový výkon

Maximální výstupní sinusový výkon při dané velikosti přípustného nelineárního zkreslení se určuje z naměřeného maximálního výstupního napětí dle vztahu:

$$P_{\max} = \frac{u_{2\max}^2}{R_z} \quad [P] = W$$

Velikost činitele nelineárního zkreslení se měří při daném výkonu měřičem nelineárního zkreslení nebo alespoň odhaduje pomocí výstupního průběhu zobrazeného na stínítku osciloskopu. Výstup zesilovače musí být zatížen jmenovitou hodnotou zatěžovacího odporu.

$$P_{\max} = \frac{7,32^2}{4} = 13,4 \text{ W}$$



Obr. 7.3: Maximální výstupní napětí při přípustném zkreslení (0,3% THD+N)

### 7.3.2. Napět'ový zisk

Napět'ový zisk zesilovače odpovídá napět'ovému zesílení vyjádřenému v dB dle vztahu:

$$U_{2L} = 7,22 \text{ V}$$

$$U_{2R} = 7,19 \text{ V}$$

$$U_{IN} = 172 \text{ mV}$$

$$A_U = 20 \log \frac{U_2}{U_1} \quad [A_U] = dB$$

$$A_{L[dB]} = 32,5 \text{ dB}$$

$$A_{R[dB]} = 32,4 \text{ dB}$$

$$A_U = 20 \log \frac{7,22}{0,172} = 32,46 \text{ dB}$$

Napět'ový zisk zesilovače je 32,5 dB na kanál.

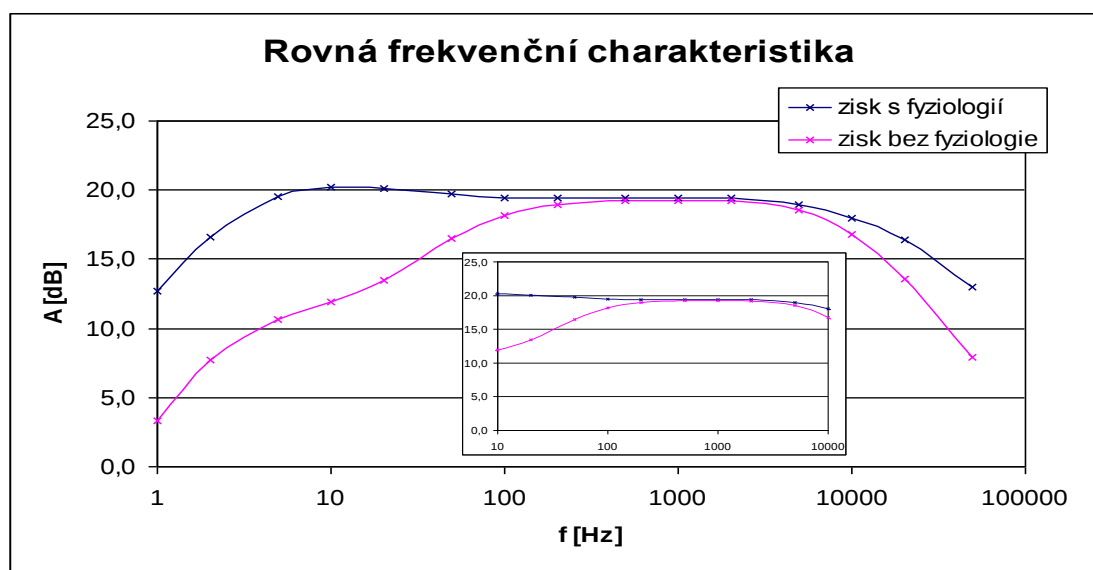
## 7.4. Frekvenční charakteristika

Frekvenční charakteristika vyjadřuje závislost napěťového zisku na kmitočtu. Měří se tzv. rovná charakteristika zesilovače, odpovídající poloze regulátorů hloubek a výšek na nule, a průběh charakteristiky při maximálně zdůrazněných a potlačených hloubkách a výškách.

➤ rovná charakteristika zesilovače,  $U_{IN} = 225 \text{ mV}$

| f[Hz]              |                | 1    | 2    | 5    | 10   | 20   | 50   | 100  | 200  | 500  | 1k   | 2k   | 5k   | 10k  | 20k  | 50k  |
|--------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| U <sub>2</sub> [V] | s<br>fyziol.   | 0,97 | 1,53 | 2,13 | 2,31 | 2,27 | 2,18 | 2,11 | 2,10 | 2,10 | 2,10 | 2,10 | 2,0  | 1,79 | 1,49 | 1,00 |
|                    | bez<br>fyziol. | 0,33 | 0,55 | 0,77 | 0,89 | 1,06 | 1,50 | 1,83 | 2,0  | 2,06 | 2,06 | 2,05 | 1,9  | 1,55 | 1,07 | 0,56 |
| A[dB]              | s<br>fyziol.   | 12,7 | 16,7 | 19,5 | 20,2 | 20,1 | 19,7 | 19,4 | 19,4 | 19,4 | 19,4 | 19,4 | 19,0 | 18,0 | 16,4 | 13,0 |
|                    | bez<br>fyziol. | 3,3  | 7,8  | 10,7 | 11,9 | 13,5 | 16,5 | 18,2 | 19,0 | 19,2 | 19,2 | 19,2 | 18,5 | 16,8 | 13,5 | 7,9  |

Tabulka 7.1: Rovná frekvenční charakteristika



Obr. 7.4: Rovná frekvenční charakteristika s fyziologií a bez fyziologie

Na **obrázku 8.5** je znázorněn průběh vstupního a výstupního signálu v závislosti na čase, který byl zaznamenán během měření frekvenční charakteristiky zesilovače na frekvenci 50 kHz při odpojené fyziologii. **Obrázek 8.6** znázorňuje průběh těchto signálů při aktivní fyziologii na frekvenci 1 kHz při výkonu 21,07 W, kde můžeme pozorovat zkreslené výstupní napětí, dosahující maximální hodnoty 9,18 V.



➤ maximálně potlačené hloubky i výšky  $U_{IN} = 225\text{ mV}$

| f[Hz]           | 1    | 2    | 5    | 10   | 20   | 50   | 100  | 200  | 500  | 1k   | 2k   | 5k   | 10k  | 20k  | 50k  |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $U_2[\text{V}]$ | 0,11 | 0,18 | 0,25 | 0,29 | 0,36 | 0,63 | 1,0  | 1,5  | 1,95 | 2,0  | 1,88 | 1,3  | 0,72 | 0,33 | 0,1  |
| A[dB]           | -6,2 | -1,9 | 0,9  | 2,2  | 4,1  | 8,9  | 13,0 | 16,5 | 18,8 | 19,0 | 18,4 | 15,2 | 10,1 | 3,3  | -7,0 |

**Tabulka 7.2:** Frekvenční charakteristika, basy i výšky potlačeny

➤ maximálně zdůrazněné hloubky i výšky  $U_{IN} = 225\text{ mV}$

| f[Hz]           | 1 | 2 | 5    | 10   | 20   | 50   | 100  | 200  | 500  | 1k   | 2k   | 5k   | 10k  | 20k  | 50k  |
|-----------------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $U_2[\text{V}]$ | - | - | 7,32 | 8,8  | 9,29 | 8,15 | 4,77 | 3,04 | 2,33 | 2,3  | 2,41 | 3,22 | 4,72 | 5,43 | 5,43 |
| A[dB]           | - | - | 29,2 | 30,8 | 31,2 | 30,1 | 25,4 | 21,5 | 19,2 | 19,1 | 19,5 | 22,0 | 25,3 | 26,6 | 26,6 |

**Tabulka 7.3:** Frekvenční charakteristika, basy i výšky zdůrazněny

➤ maximálně potlačené hloubky, maximálně zdůrazněné výšky  $U_{IN} = 225\text{ mV}$

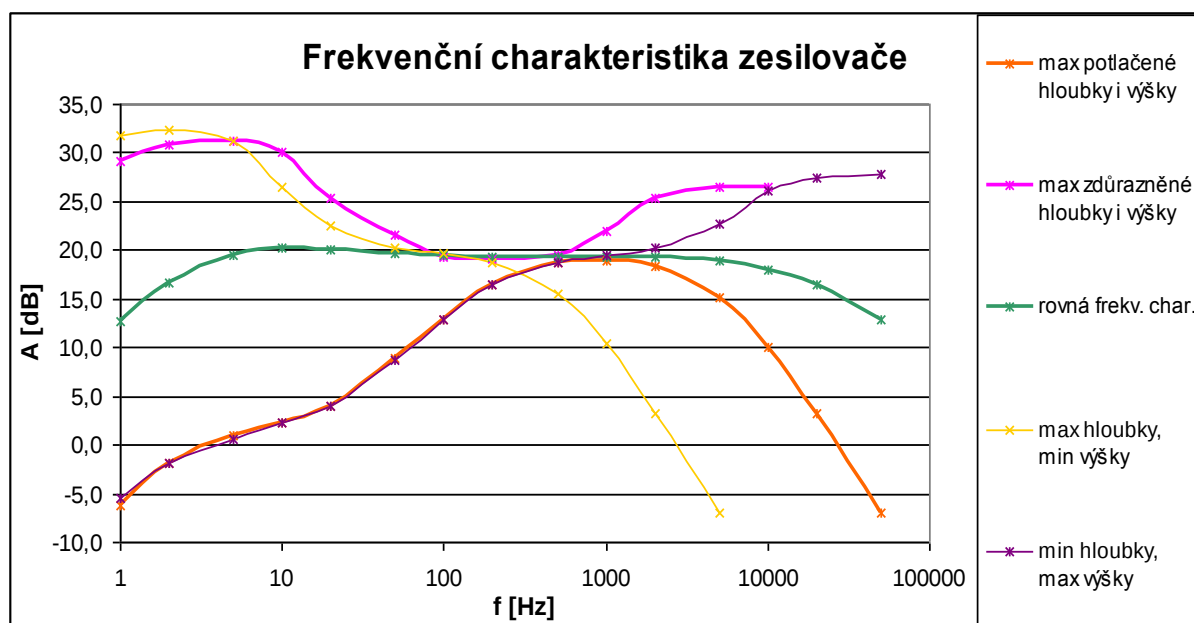
| f[Hz]           | 1    | 2    | 5    | 10   | 20   | 50   | 100  | 200  | 500  | 1k   | 2k   | 5k   | 10k  | 20k  | 50k  |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $U_2[\text{V}]$ | 0,12 | 0,18 | 0,24 | 0,29 | 0,36 | 0,62 | 1,0  | 1,5  | 1,96 | 2,13 | 2,3  | 3,1  | 4,55 | 5,3  | 5,58 |
| A[dB]           | -5,5 | -1,9 | 0,6  | 2,2  | 4,1  | 8,8  | 13,0 | 16,5 | 18,8 | 19,5 | 20,2 | 22,8 | 26,1 | 27,4 | 27,9 |

**Tabulka 7.4:** Frekvenční charakteristika, basy potlačeny, výšky zdůrazněny

➤ maximálně zdůrazněné hloubky, maximálně potlačené výšky  $U_{IN} = 225 \text{ mV}$

| f[Hz]    | 1 | 2 | 5 | 10   | 20   | 50   | 100  | 200  | 500  | 1k   | 2k   | 5k   | 10k  | 20k  | 50k  |
|----------|---|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $U_2[V]$ | - | - | - | 8,73 | 9,33 | 8,2  | 4,8  | 3,03 | 2,34 | 2,15 | 1,95 | 1,33 | 0,74 | 0,33 | 0,1  |
| A[dB]    | - | - | - | 31,8 | 32,4 | 31,2 | 26,6 | 22,6 | 20,3 | 19,6 | 18,8 | 15,4 | 10,3 | 3,3  | -7,0 |

**Tabulka 7.5:** Frekvenční charakteristika, basy zdůrazněny, výšky potlačeny



**Obr. 7.7:** Frekvenční charakteristika zesilovače

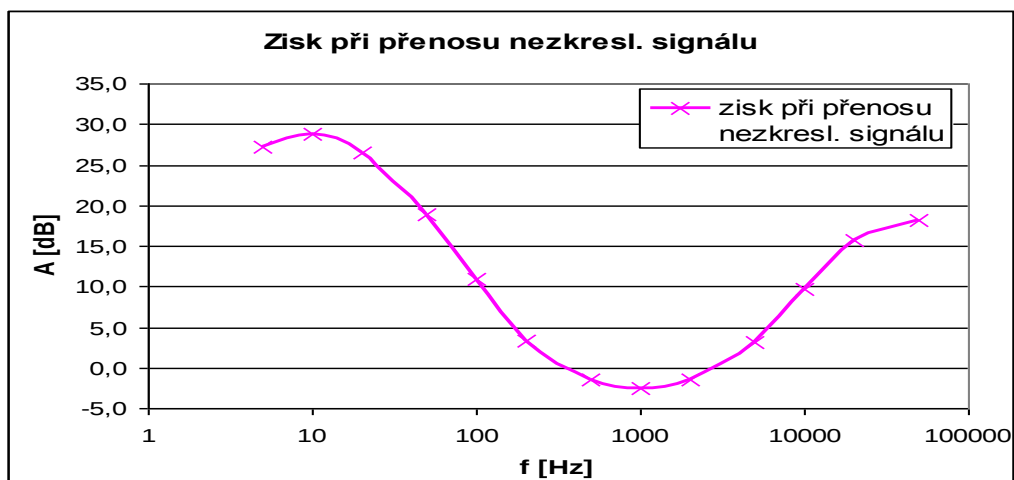
Šedě podbarvené buňky v tabulce značí, že funkce zesilovače byla již zkreslená, že byl signál na výstupu přebuzený.

Jestliže má být signál na výstupu nezkreslený i při maximálně zdůrazněných hloubkách i výškách, bude výstupní výkon při frekvenci 1 kHz a vstupním napětí 225 mV roven přibližně 10 mW.

➤ maximálně zdůrazněné hloubky i výšky  $U_{IN} = 225 \text{ mV}$

| f[Hz]    | 1 | 2 | 5    | 10   | 20   | 50   | 100  | 200  | 500  | 1k   | 2k   | 5k   | 10k  | 20k  | 50k  |
|----------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $U_2[V]$ | - | - | 5,2  | 6,22 | 4,74 | 2    | 0,79 | 0,33 | 0,19 | 0,17 | 0,19 | 0,32 | 0,68 | 1,36 | 1,83 |
| A[dB]    | - | - | 27,3 | 28,8 | 26,5 | 19,0 | 10,9 | 3,3  | -1,5 | -2,4 | -1,5 | 3,1  | 9,6  | 15,6 | 18,2 |

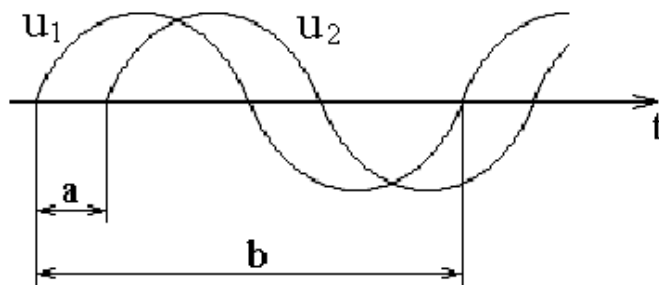
**Tabulka 7.6:** Frekvenční charakteristika, nezkreslený výstup



Obr. 7.8: Zisk při přenosu nezkresleného signálu

## 7.5. Fázová charakteristika

Fázová charakteristika zesilovače vyjadřuje závislost fázového posuvu  $\varphi$  výstupního napětí vůči vstupnímu na kmitočtu. Fázový posuv lze měřit dvoukanálovým osciloskopem buď pomocí rozdílného posuvu průběhů, nebo metodou elipsy. Měření  $\varphi$  pomocí dvoukanálového osciloskopu při zapnuté časové základně:

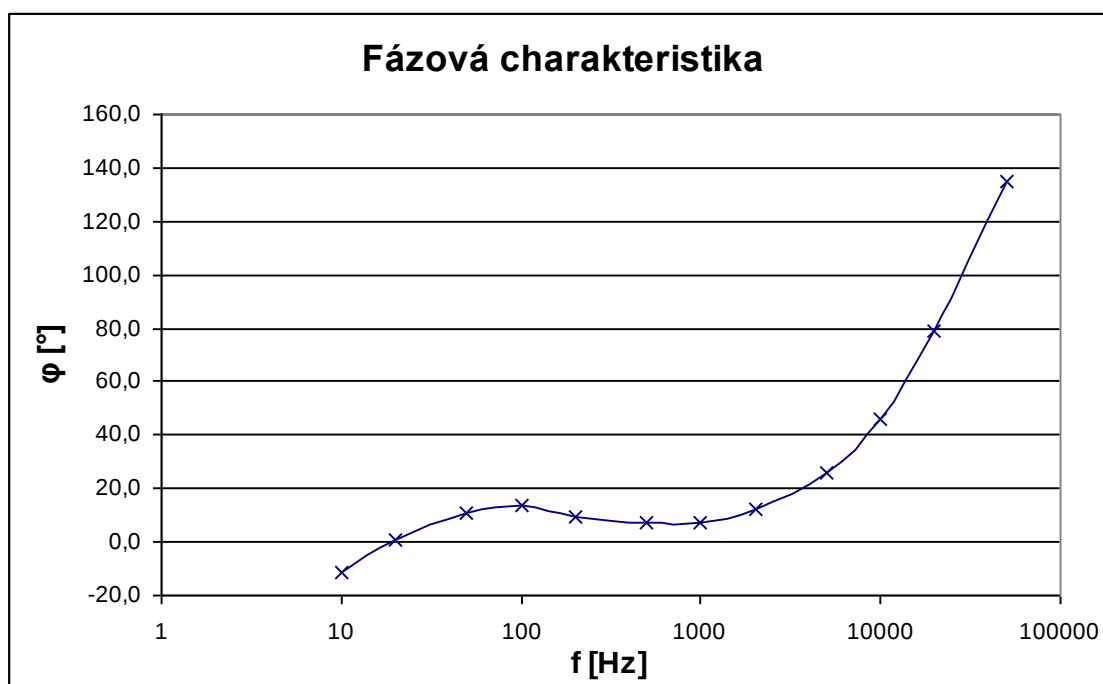


$$\varphi = \frac{360}{b} \cdot a \text{ [}^\circ\text{]}$$

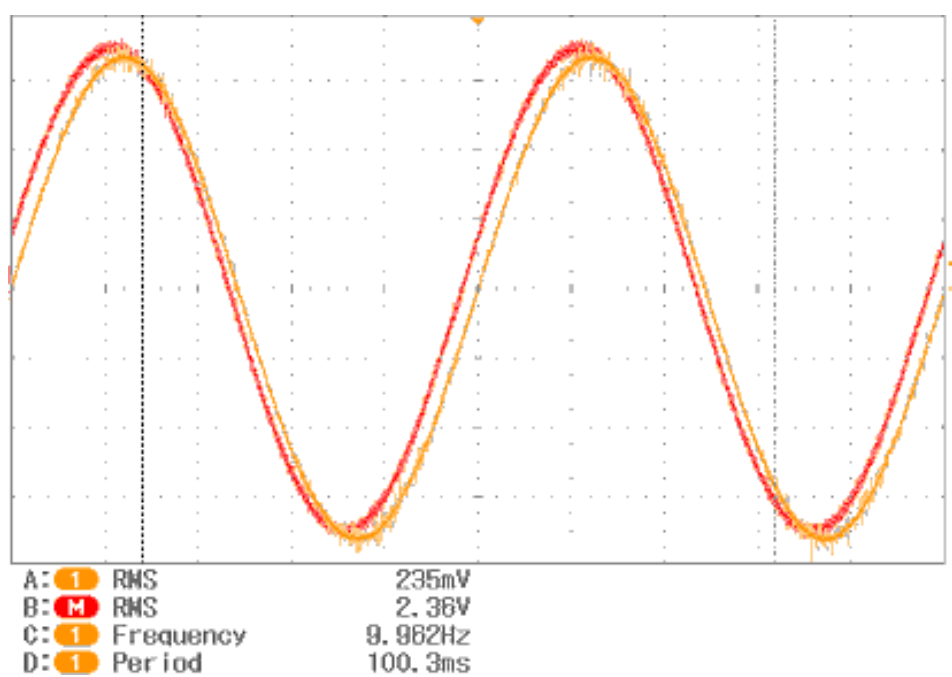
Obr. 7.9: Posun průběhů vstupního a výstupního signálu

| f [Hz]        | 10    | 20    | 50    | 100   | 200  | 500  | 1k   | 2k   | 5k   | 10k  | 20k  | 50k   |
|---------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| a [-]         | -3,2  | 120   | 620   | 380   | 128  | 41   | 20   | 17,2 | 14,4 | 12,8 | 11   | 7,5   |
| b [-]         | 100   | 50000 | 20000 | 10000 | 5000 | 2000 | 1000 | 500  | 200  | 100  | 50   | 20    |
| $\varphi$ [°] | -11,5 | 0,9   | 11,2  | 13,7  | 9,2  | 7,4  | 7,2  | 12,4 | 25,9 | 46,1 | 79,2 | 135,0 |

Tabulka 7.7: Fázová charakteristika



Obr. 7.10: Fázová charakteristika

Obr. 7.11: Fázová charakteristika při  $f = 10$  Hz

## 7.6. Přeslech

Přeslech mezi kanály stereofonního zesilovače vyjadřuje velikost vzájemného působení kanálů mezi sebou, tzn. pronikání signálu z jednoho kanálu do druhého. Je způsoben nežádoucími vazbami mezi kanály, představovanými především parazitními kapacitami. Vyjadřuje se jako poměr výstupního napětí  $U_{2V}$  výstupu kanálu vybuzeného na jmenovitý výkon k výstupnímu napětí  $U_{2N}$  kanálu nevybuzeného. Oba koncové stupně musí zatíženy jmenovitou zatěžovací impedancí.

Přeslech z levého do pravého kanálu:

$$D_{LP} = 20 \log \frac{U_{2VL}}{U_{2NP}} \text{ dB}$$

$$f = 1 \text{ kHz} \quad P = 1 \text{ W}$$

Přeslech z pravého do levého kanálu:

$$D_{PL} = 20 \log \frac{U_{2VP}}{U_{2NL}} \text{ dB}$$

➤ S korekčním zesilovačem:

$$\begin{aligned} U_{2VP} &= 2,02 \text{ V} & U_{2VL} &= 2,01 \text{ V} \\ U_{2NP} &= 0,015 \text{ V} & U_{2NL} &= 0,016 \text{ V} \end{aligned}$$

$$D_{LP} = 20 \log \frac{2,01}{0,015} = 42,54 \text{ dB}$$

$$D_{PL} = 20 \log \frac{2,02}{0,016} = 42,03 \text{ dB}$$

➤ Bez korekčního zesilovače:

$$\begin{aligned} U_{2VP} &= 2,001 \text{ V} & U_{2VL} &= 2,02 \text{ V} \\ U_{2NP} &= 0,014 \text{ V} & U_{2NL} &= 0,014 \text{ V} \end{aligned}$$

$$D_{LP} = 20 \log \frac{2,02}{0,014} = 43,18 \text{ dB}$$

$$D_{PL} = 20 \log \frac{2,001}{0,014} = 43,1 \text{ dB}$$

## 7.7. Šumové vlastnosti zesilovače

| hloubky | výšky | sleep | mute | hlasitost | $U_{\text{výst}} [\text{mV}]$ | S/N [dB] |
|---------|-------|-------|------|-----------|-------------------------------|----------|
| střed   | střed | ano   | ano  | min       | 0,05                          | 103,19   |
| střed   | střed | ne    | ne   | min       | 2,9                           | 67,92    |
| střed   | střed | ne    | ne   | max       | 6,6                           | 60,78    |
| min     | min   | ne    | ne   | max       | 5,1                           | 63,02    |
| max     | max   | ne    | ne   | max       | 10,4                          | 56,83    |
| min     | max   | ne    | ne   | max       | 9,8                           | 57,35    |
| max     | min   | ne    | ne   | max       | 6,9                           | 60,40    |
| střed   | střed | ne    | ne   | P = 1 W   | 4,4                           | 53,15    |

Tabulka 7.8: Šumové vl. zesilovače

## 7.8. Účinnost zesilovače

$$U_{\text{nap}} = 12,4 \text{ V}$$

$$I_{\text{nap}} = 0,105 \text{ A}$$

$$P = \frac{U^2}{4} \text{ W}$$

$$U = \sqrt{P \cdot R}$$

➤ Pro 1 kanál

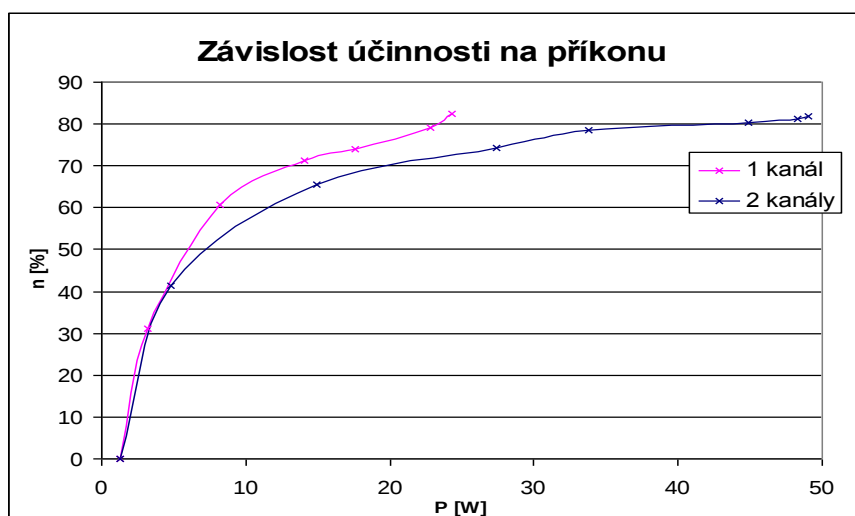
|            |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $U_1$ [V]  | 12,4  | 12,3  | 12,3  | 12,3  | 12,2  | 12,2  | 12,2  |
| $U_2$ [V]  | 0     | 2     | 4,47  | 6,32  | 7,29  | 8,5   | 8,85  |
| $P_1$ [W]  | 1,3   | 3,2   | 8,24  | 14,02 | 17,57 | 22,8  | 24,28 |
| $P_2$ [W]  | 0,00  | 1,00  | 5,00  | 10,00 | 13,00 | 18,00 | 20,00 |
| $I_1$ [A]  | 0,105 | 0,26  | 0,67  | 1,14  | 1,44  | 1,87  | 1,99  |
| $\eta$ [%] | 0,00  | 31,25 | 60,70 | 71,30 | 74,00 | 79,00 | 82,40 |

**Tabulka 7.9:** Účinnost zesilovače pro 1 kanál

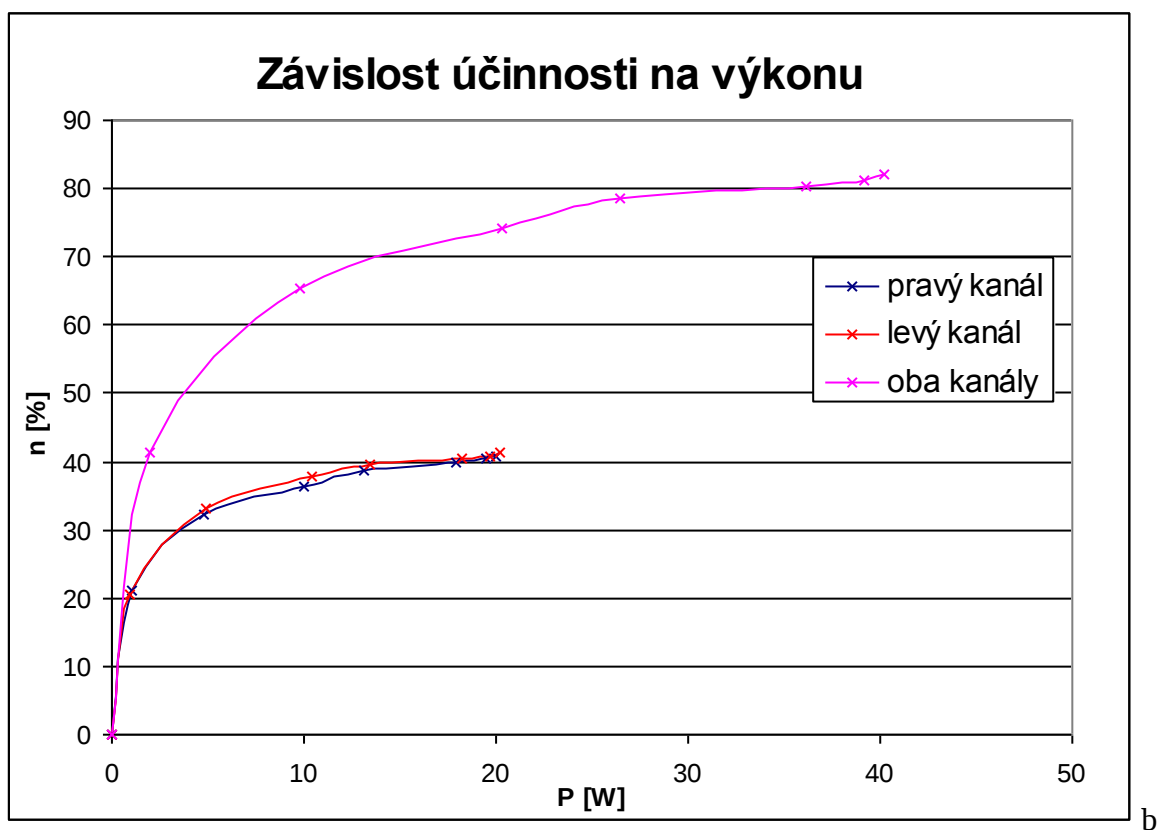
➤ Pro oba kanály

|              |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $U_1$ [V]    | 12,4  | 12,3  | 12,3  | 12,3  | 12,2  | 12,2  | 12,2  | 12,1  |
| $I_1$ [A]    | 0,105 | 0,39  | 1,21  | 2,23  | 2,77  | 3,68  | 3,96  | 4,05  |
| $P_1$ [W]    | 1,3   | 4,8   | 14,88 | 27,43 | 33,79 | 44,9  | 48,31 | 49,01 |
| $U_{2P}$ [V] | 0,00  | 2,01  | 4,39  | 6,32  | 7,24  | 8,47  | 8,83  | 8,94  |
| $U_{2L}$ [V] | 0,00  | 1,98  | 4,44  | 6,44  | 7,32  | 8,53  | 8,88  | 8,99  |
| $P_{2P}$ [W] | 0,00  | 1,01  | 4,82  | 9,99  | 13,10 | 17,94 | 19,49 | 19,98 |
| $P_{2L}$ [W] | 0,00  | 0,98  | 4,93  | 10,37 | 13,40 | 18,19 | 19,71 | 20,21 |
| $\eta$ [%]   | 0,00  | 41,46 | 65,50 | 74,20 | 78,43 | 80,46 | 81,15 | 82,00 |

**Tabulka 7.10:** Účinnost zesilovače pro 2 kanály



**Obr. 7.12:** Závislost účinnosti na příkonu



Obr. 7.13: Závislost účinnosti na výkonu

## 7.9. THD+N zkreslení

Total Harmonic Distortion + Noise – Harmonické zkreslení + šum

Zkreslení generátoru bylo 0,019%.

$f = 1 \text{ kHz}$

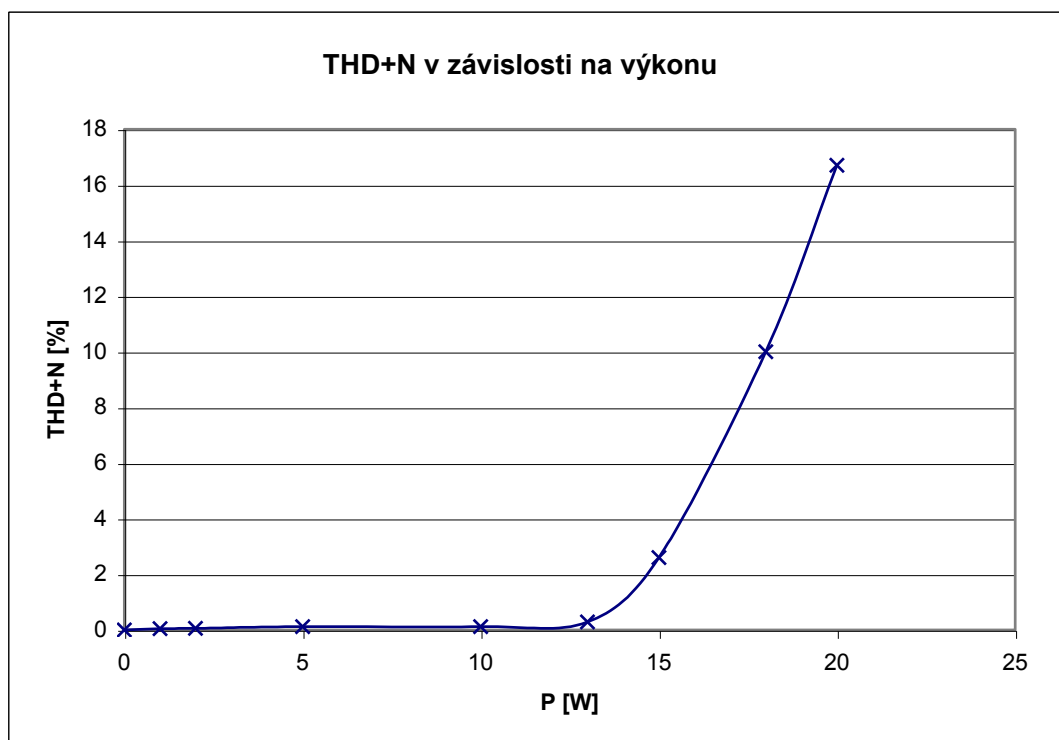
|          |   |       |       |       |       |      |      |      |      |
|----------|---|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| U [V]    | 0 | 2     | 2,87  | 4,65  | 6,39  | 7,22 | 7,76 | 8,45 | 8,95 |
| P [W]    | 0 | 1     | 2     | 5     | 10    | 13   | 15   | 18   | 20   |
| THD+N[%] | 0 | 0,052 | 0,062 | 0,115 | 0,125 | 0,29 | 2,6  | 10   | 16,7 |

Tabulka 7.11: THD+N zkreslení v závislosti na výkonu

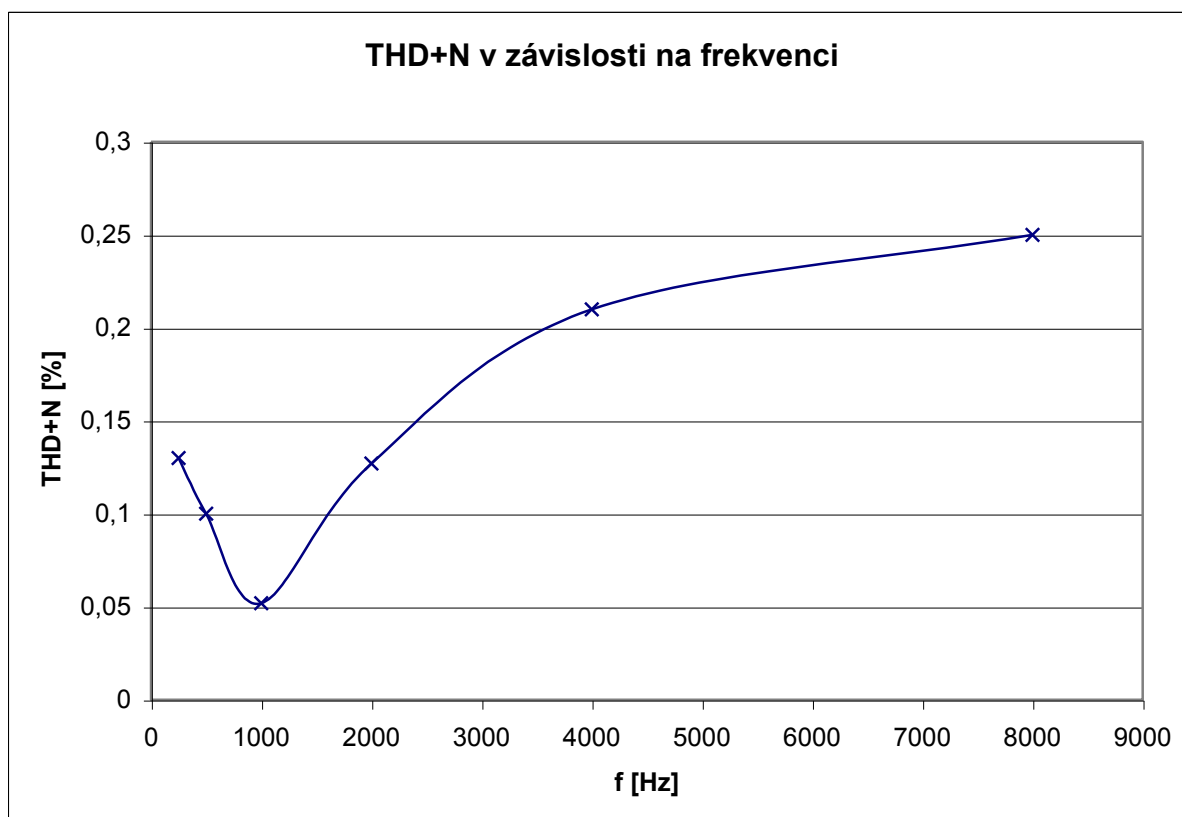
$P = 1 \text{ W}$

|          |      |      |       |       |      |      |
|----------|------|------|-------|-------|------|------|
| f [Hz]   | 250  | 500  | 1000  | 2000  | 4000 | 8000 |
| THD+N[%] | 0,13 | 0,10 | 0,052 | 0,127 | 0,21 | 0,25 |

Tabulka 7.12: THD+N zkreslení v závislosti na frekvenci



Obr. 7.14: Závislost THD+N na výkonu



Obr. 7.15: Závislost THD+N na frekvenci

## **7.10. Přístroje použité při měření**

ampérmetr – digitální multimetr MASTECH M3900

nízkofrekvenční milivoltmetr DF2175A

osciloskop LECROY WaveJet 314

nízkofrekvenční generátor Agilent 33250A

měřič THD+N zkreslení

## 8. Závěr

V první části řešení bakalářské práce je popsán základní princip zesilovačů různých tříd.

Zesilovače třídy T se vyznačují vysokou účinností, na kterou se v poslední době klade velká důležitost. Pro realizaci výkonového nízkofrekvenčního audio zesilovače 2x20W byl z dostupných obvodů firmy Tripath vybrán integrovaný obvod TA2020-020 a proveden návrh zapojení s korekčním předzesilovačem TDA4292, který reguluje zesílení basů a výšek, hlasitost, a vyváženost kanálů, a přivedený audiosignál přenáší se zesílením 0 dB. Zesílení signálu je realizováno až koncovým zesilovačem.

Výhodou zesilovače je, že při malém napájecím napětí dodává velký výstupní výkon, a signály dokáže zpracovat s velmi malým zkreslením a vysokou dynamikou.

Deska plošných spojů obsahuje dva typy zemí, které musí být propojeny v jediném bodě. Odrušovací kondenzátory musí být umístěny co nejbližší integrovaného obvodu, aby kvalitně filtrovaly nepatřičné impulzy. Konektory pro napájení a oba kanály výstupního signálu byly voleny univerzálně tak, aby se daly připojit reproduktory a napájecí zdroj i bez konektorů.

Charakteristiky vyrobeného zesilovače odpovídají teoretickým hodnotám z datasheetu součástky TA2020-020 [7]. Proměřeny byly frekvenční a fázová charakteristika, vstupní a výstupní impedance zesilovače, napěťové zesílení, přeslech, šumové vlastnosti zesilovače, účinnost a THD+N zkreslení. Vstupní impedance zesilovače je 10,65 k $\Omega$ , při měření výstupní impedance byla změřena hodnota 0,1  $\Omega$ . Při výkonu 20 W byla naměřena účinnost 82,4 %, což je velice dobrý výsledek. Výkon výrobku 13,4W byl naměřen při takovém zesílení, aby zkreslení výstupního signálu nepřesáhlo toleranci, tj 0,3 %. Přeslech mezi kanály celého stereofonního zesilovače dosáhl hodnoty 42 dB, šumové vlastnosti zesilovače jsou dobré. Hodnota odstupu signálu od šumu zařízení v neaktivním stavu byla 103,2 dB a v aktivním stavu, při maximální hlasitosti a vycentrovaných výškách a basech, 60,8 dB.

Frekvenční charakteristika zesilovače znázorňuje šířku pásma zesilovače od 2 Hz do 50 kHz, což ukazuje na relativní široký rozsah zesilovaných frekvencí zesilovačem. Fázová charakteristika je zajímavá především na nízkých kmitočtech (10 Hz), kdy je možné pozorovat předbíhání vstupního signálu signálem výstupním. Fázově téměř nezkreslený výstupní signál je možné pozorovat do frekvence cca 2 kHz. Hodnota zkreslení THD+N s rostoucím výkonem stoupala, naměřené hodnoty na frekvenci 1 kHz byly srovnatelné s hodnotami uvedenými výrobcem, ke zkreslení 0,3% dochází při výkonu 13 W, a při 20 W je hodnota THD+N rovna 16,7%. V závislosti na frekvenci bylo nejmenší zkreslení naměřeno na 1 kHz a do 8 kHz nepřesáhlo hodnotu 0,3%.

Vyroběný zesilovač je navržen tak, aby vyhovoval požadavkům výrobců integrovaných obvodů a jeho funkce byla co nejkvalitnější. Předpokladem je, že bude sloužit jako zesilovač hudby v domácím prostředí. S parametry tohoto zařízení by měl být průměrný uživatel spokojen. Přípravek byl vyroben za účelem vlastní potřeby.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] NOVÁK, Karel. Slabikář radioamatéra, SNTL, Praha, 1975, 264 s.
- [2] ČERMÁK, Jindřich. Tranzistory v radioamátrově praxi, SNTL, Praha, 1981, 244 s.
- [3] Knihnice Svazarmu. Čtení o HIFI, Naše Vojsko, Praha, 1976, 288 s.
- [4] SMETANA, Ctirad, a kolektiv. Praktická elektroakustika, SNTL / ALFA, Praha, 1981, 692 s.
- [5] JURKOVÍČ, Kamil. ZODL, Ján, Příručka nízkofrekvenční obvodové techniky, ALFA, Bratislava, 1985, 688 s.
- [6] KRAUS, Alan. Digitální zesilovače třídy T, Amatérské Radio, 2001, vydání č. 11, 12, AMARO spol. s.r.o.
- [7] Datasheet TA2020-020, TRIPATH
- [8] Datasheet TDA4292, SIEMENS
- [9] Datasheet TA1101B, TRIPATH
- [10] Datasheet TA2022, TRIPATH
- [11] Datasheet TA3020, SIEMENS
- [12] Datasheet TDA1524, SIEMENS
- [13] <http://www.profusionplc.com>
- [14] [http://www.belcantodesign.com/pdfs/WP\\_eVo.pdf](http://www.belcantodesign.com/pdfs/WP_eVo.pdf)
- [15] <http://www.sweb.cz/moryst/elt2>
- [16] [http://www.sweb.cz/elnika/zesilovace/tridy\\_vykon\\_zes.htm](http://www.sweb.cz/elnika/zesilovace/tridy_vykon_zes.htm)
- [17] <http://www.zesilovace.cz/view.php?cislocclanku=2002122410>