



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## NÁVRH MAGNETOPLANÁRNÍCH SLUCHÁTEK SE ZESILOVAČEM

DESIGN OF MAGNETOPLANAR HEADPHONES WITH AMPLIFIER

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Chyťá

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Josef Skácel

BRNO 2020

# Diplomová práce

magisterský studijní obor **Mikroelektronika**  
Ústav mikroelektroniky

**Student:** Filip Chyňa

**ID:** 186096

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Návrh magnetoplanárních sluchátek se zesilovačem

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte magnetoplanární sluchátka se zesilovačem. Porovnejte simulované zkresení zesilovače s jeho reálným zkresením. Změřte frekvenční rozsah magnetoplanárních sluchátek a porovnejte s jinými typy sluchátek.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

COLLOMS, Martin and Paul DARLINGTON. 2018. High performance loudspeakers: Optimizing high fidelity loudspeaker systems. 7th. New Jersey: John Wiley.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 19.5.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Josef Skácel

**doc. Ing. Lukáš Fujcik, Ph.D.**

*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá porovnáním jednotlivých typů elektroakustických měničů, jejich vlastnostmi a využitím v praxi. Dále návrhem a výrobou magnetoplanárního měniče, jeho integrací do sluchátek a výrobou sluchátkového zesilovače. První kapitola shrnuje všechny typy elektroakustických měničů, jejich vlastnosti, výhody, nevýhody a jejich využití v praxi. Druhá kapitola pojednává o třídách zesilovačů. Třetí kapitola se zabývá volbou návrhu magnetoplanárního měniče, sluchátek a zvoleným typem sluchátkového zesilovače. V poslední kapitole je popsán postup výroby jednotlivých částí sluchátek, měniče a zesilovače, včetně finálního měření.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Magnetoplanární, sluchátka, zesilovač, elektroakustické měniče

## **ABSTRACT**

This work deals with comparison of individual types of electroacoustic transducers, their properties and practical use. Furthermore, design and manufacture of a magnetoplanar transducer, its integration into headphones and the production of headphone amplifier. The first chapter summarizes all types of electroacoustic transducers, their properties, advantages, disadvantages, and their use in practice. The second chapter deals with the classes of amplifiers. The third chapter deals with the choice of design of a magnetoplanar transducer, headphones, and selected type of headphone amplifier. The last chapter describes the production process of individual parts of the headphones, transducer and amplifier, including the final measurement.

## **KEYWORD**

Magnetoplanar, headphones, amplifier, electroacoustic transducer

CHYŤA, Filip. Návrh magnetoplanárních sluchátek se zesilovačem. Brno, 2020.  
Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126947>.  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a  
komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Josef Skácel.

# Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu semestrální práce panu Ing. Josefu Skácelovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Bc. Filip Chyňa*

**VUT ID studenta:** *186096*

**Typ práce:** *Diplomová práce*

**Akademický rok:** *2019/20*

**Téma závěrečné práce:** *Návrh magnetoplanárních sluchátek se zesilovačem*

**I** *Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.*

**II** *Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.*

V Brně dne: *13. prosince 2019*

.....  
Podpis autora

# OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	7
SEZNAM TABULEK .....	9
ÚVOD.....	10
<b>1 TYPY ELEKTROAKUSTICKÝCH MĚNIČŮ.....</b>	<b>11</b>
1.1 ELEKTRODYNAMICKÝ MĚNIČ.....	11
1.2 TLAKOVÝ MĚNIČ.....	12
1.3 ELEKTROSTATICKÝ MĚNIČ .....	13
1.4 MAGNETOSTRIKČNÍ MĚNIČ.....	15
1.5 PIEZOELEKTRICKÝ MĚNIČ .....	15
1.6 ODPOROVÝ MĚNIČ.....	17
1.7 MAGNETOPLANÁRNÍ MĚNIČ.....	17
<b>2 SLUCHÁTKOVÉ ZESILOVAČE.....</b>	<b>22</b>
2.1 PRACOVNÍ TRÍDY ZESILOVAČŮ .....	22
2.2 DŮLEŽITÉ PARAMETRY AUDIO ZESILOVAČŮ .....	24
<b>3 NÁVRH MAGNETOPLANÁRNÍHO MĚNIČE, SLUCHÁTEK A ZESILOVAČE .....</b>	<b>28</b>
3.1 NÁVRH SLUCHÁTEK .....	28
3.1.1 Způsob návrhu a výroba .....	28
3.2 NÁVRH MAGNETOPLANÁRNÍHO MĚNIČE.....	30
3.2.1 Výběr materiálu pro membránu vytvoření motivu.....	30
3.2.2 Návrh motivu membrány .....	31
3.2.3 Rozložení magnetů a magnetické pole cívky.....	32
3.2.4 Výpočet impedance výsledného motivu.....	35
3.3 NÁVRH SLUCHÁTKOVÉHO ZESILOVAČE.....	36
<b>4 VÝROBA MAGNETOPLANÁRNÍHO MĚNIČE, SLUCHÁTEK A ZESILOVAČE .....</b>	<b>38</b>
4.1 VÝROBA TĚLA SLUCHÁTEK.....	38
4.2 VÝROBA MAGNETOPLANÁRNÍHO MĚNIČE.....	40
4.3 VÝROBA SLUCHÁTKOVÉHO ZESILOVAČE .....	42
<b>5 MĚŘENÍ SLUCHÁTEK A ZESILOVAČE.....</b>	<b>46</b>

5.1	MĚŘENÍ SLUCHÁTEK.....	46
5.2	MĚŘENÍ SLUCHÁTKOVÉHO ZESILOVAČE .....	50
5.3	MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE.....	54
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>57</b>
A.	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>59</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Elektrodynamický měnič [2].....	12
Obr. 1.2 Tlakový měnič [3].....	13
Obr. 1.3 Schéma elektrostatického měniče [10].....	14
Obr. 1.4 Magnetostrikční měnič [8].....	15
Obr. 1.5 Piezoelektrický měnič [6].....	16
Obr. 1.6 Uhlíkový mikrofon [7].....	17
Obr. 1.7 Magnetoplanární měnič se schématem membrány [11] .....	20
Obr. 1.8 Frekvenční odezva náhradního schématu měniče [9].....	21
Obr. 1.9 Náhradní zapojení magnetoplanárního měniče [9].....	21
Obr. 2.1 Graf závislosti šířky pásma na zesílení [13].....	25
Obr. 2.2 Graf závislosti frekvence na napěťovém zisku [14] .....	25
Obr. 3.1 Ukázka modelu vnitřní konstrukce včetně membrány v Solidworks..	29
Obr. 3.2 Membrána s motivem.....	32
Obr. 3.3 Horizontální umístění magnetů [17].....	33
Obr. 3.4 Simulace mag. pole s grafem působení síly [18].....	33
Obr. 3.5 Vertikální umístění magnetů [17] .....	34
Obr. 3.6 Simulace mag. pole s grafem působení síly [18].....	34
Obr. 3.7 Schéma zapojení zesilovače.....	36
Obr. 3.8 Graf simulace FFT z dat z programu LTspice.....	37
Obr. 4.1 3D Tiskárna využitá pro tisk [22].....	38
Obr. 4.2 Díly pro jednu stranu sluchátek .....	39
Obr. 4.3 Napnutá a přilepená membrána .....	40
Obr. 4.4 Membrána s nalepenou vrstvou mědí.....	41
Obr. 4.5 Vyleptaná membrána .....	42
Obr. 4.6 DPS zesilovače vytvořená v programu Eagle.....	42
Obr. 4.7 Krabíčka pro zesilovač.....	43

Obr. 4.8 vyrobená DPS zesilovače.....	43
Obr. 4.9 osazená DPS .....	44
Obr. 4.10 Přední panel zesilovače.....	45
Obr. 4.11 Zadní panel zesilovače.....	45
Obr. 5.1 Frekvenční charakteristika vyrobených měničů.....	46
Obr. 5.2 Frekvenční charakteristika Beyerdynamic DT 770 PRO .....	47
Obr. 5.3 Frekvenční charakteristika Bose QC35 .....	48
Obr. 5.4 Frekvenční charakteristika STAX SR-007MKII.....	48
Obr. 5.5 Měřicí stojan se sluchátky.....	49
Obr. 5.6 Měření CRS levý kanál.....	50
Obr. 5.7 Měření CRS pravý kanál.....	51
Obr. 5.8 Měření SNR zesílení 2 .....	52
Obr. 5.9 Měření SNR zesílení 6 .....	52
Obr. 5.10 Frekvenční charakteristika .....	53

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Impedance motivu.....	35
Tabulka 2: BOM.....	44
Tabulka 3: Přeslechy kanálů.....	50
Tabulka 4: Odstup signálu od šumu .....	51

## ÚVOD

Magnetoplanární měniče byly vynalezeny v roce 1969 firmou Magnepan, která začala vyrábět pomocí této technologie reproduktory. Později se začal tento typ měniče objevovat i ve sluchátkách. Jedná se však o nepříliš rozšířený produkt, zejména kvůli vysoké pořizovací ceně oproti klasickým dynamickým sluchátkům. Co se týče zvukového podání dosahují magnetoplanární měniče podstatně věrohodnější reprodukce napříč celým spektrem. Mezi výhody patří větší frekvenční rozsah, nižší zkreslení reprodukováného zvuku, přesnější podání nízkých frekvencí a další. Jelikož vlastností tohoto měniče je nízká impedance je potřeba na zesilovači vyšší napětí, není však náročný proudově, tudíž lze použít takřka jakýkoli zesilovač. Mezi nejznámější výrobce magnetoplanárních sluchátek patří Audeze, HiFiMAN a OPPO.

Cílem diplomové práce je provést rozbor elektroakustických měničů a porovnat jejich vlastnosti s magnetoplanárním měničem. Návrh a postup výroby magnetoplanárního měniče, včetně jeho integrace a konstrukce samotných magnetoplanárních sluchátek. Dále volba vhodného zesilovače pro tento typ sluchátek a opět návrh jeho konstrukce. Finální částí je změření parametrů navrhnutého zesilovače a porovnání frekvenční charakteristiky vyrobených sluchátek se sluchátky volně dostupnými k zakoupení.

V první kapitole jsou popsány druhy elektroakustických měničů a jejich přednosti či nevýhody. V další kapitole jsou popsány třídy zesilovačů a volba vhodného typu zesilovače. Kapitola číslo tři se zabývá problematikou návrhu magnetoplanárního měniče, těla sluchátek a zesilovače. Poslední kapitola pak popisuje samotnou výrobu jednotlivých částí sluchátek, výrobní proces měniče a sestavení zesilovače. Dále také obsahuje finální měření, zpracování a vyhodnocení získaných výsledků.

# 1 Typy elektroakustických měničů

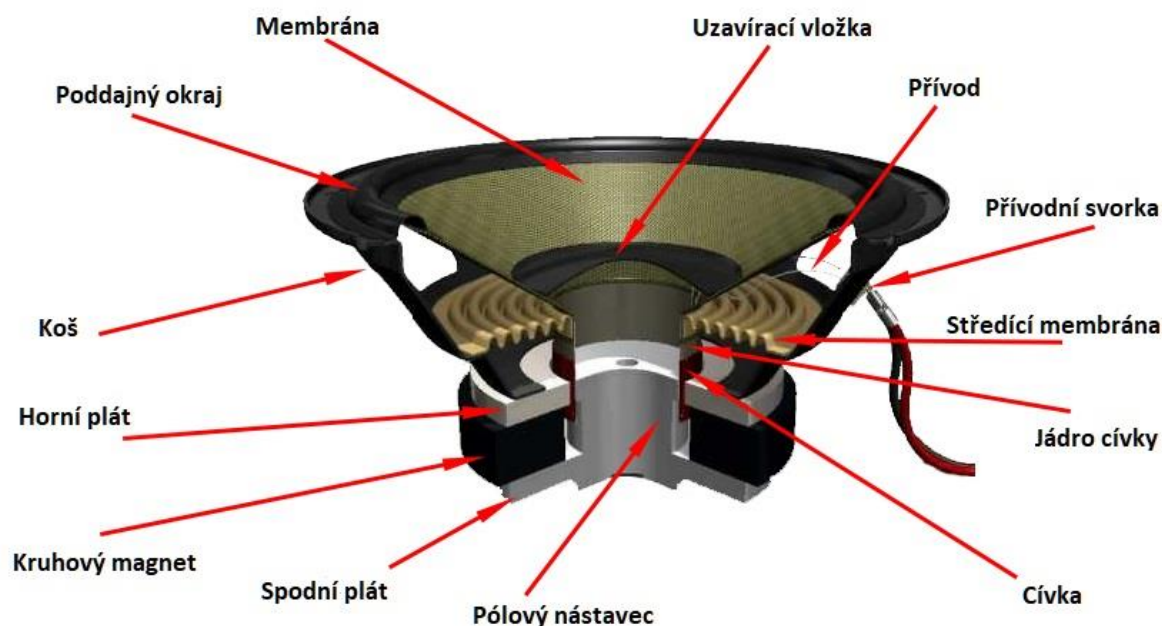
Měniče se rozdělují na několik typů dle jejich konstrukce a principu činnosti, které jsou popsány v této kapitole.

## 1.1 Elektrodynamický měnič

Jedná se o nejpoužívanější typ měniče nejen pro sluchátka, ale i pro klasické reproduktory. Měnič je zkonstruován z permanentního magnetu a cívky, která je umístěna ve vzduchové mezeře. Cívka je připevněna k membráně ve tvaru kužele. Tato membrána je spojena s košem reproduktoru pružným spojením umožňující pohyb ve vertikálním směru. Po přivedení střídavého signálu na kontakty cívky se vytvoří magnetické pole. Toto pole se navzájem ovlivňuje s polem permanentního magnetu. Působením těchto sil se membrána axiálně vychyluje. Membrána musí být lehká, pevná a zároveň i dostatečně pružná, aby nedošlo k její deformaci nebo protržení. Deformace membrány by měla za následek změnu frekvenční charakteristiky reproduktoru.

Mezi hlavní výhody této technologie se řadí dobré podání nižších frekvencí, hlavně díky schopnosti membrány uvést do pohybu větší objem vzduchu. Další výhodou je efektivita, díky které jsou měniče schopny dosahovat vysoké hlasitosti. V neposlední řadě díky jednoduchosti a dostupnosti jsou tyto měniče levné, a tudíž velice rozšířené.

Mezi nevýhody patří náchylnost měničů ke zkreslení, hlavně při vyšších hlasitostech. Tento jev je známý pod názvem „nelineární zkreslení“ a lze potlačit dobrým návrhem membrány, nelze mu však předejít úplně. Další nevýhodou je nelineární impedanční závislost. [1]



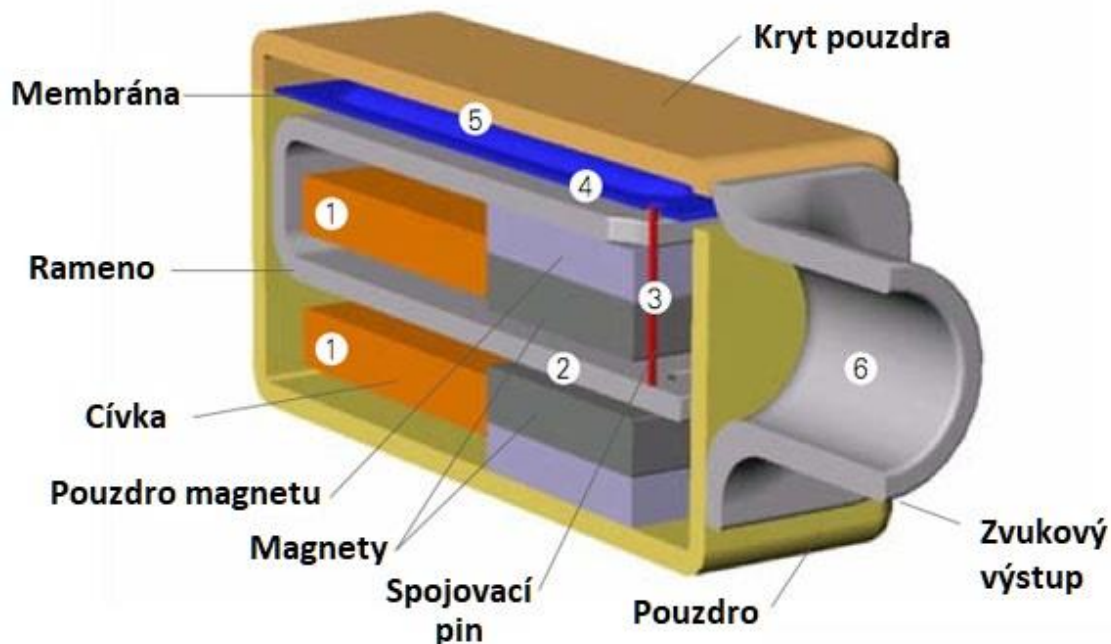
Obr. 1.1 Elektrodynamiccký měnič [2]

## 1.2 Tlakový měnič

Tento typ měniče může mít pouze mále fyzické rozměry jinak by nebyl schopen fungovat, proto se používá pouze do sluchátek určených do uší. Měnič se skládá z miniaturního ramene uvnitř cívky obklopené dvěma magnety. Tyto magnety zajišťují pohyb ramene. Pokud cívkou neprochází žádný proud rameno je vyvážené a je ve stejné vzdálenosti od obou magnetů. Rameno je spojeno s membránou. Když začne cívkou procházet proud rameno se natáčí blíž k jednomu nebo druhému magnetu a pomocí spojení s membránou dochází k jejímu pohybu a reprodukci zvuku.

Hlavní výhodou těchto měničů je možnost naladit je na přesný frekvenční rozsah, což je zároveň i jejich obrovskou nevýhodou, protože tento rozsah je velice úzký. Pro dosažení kompletního pokrytí celého rozsahu se používají až 4 měniče tohoto typu nebo se kombinují s měniči dynamickými. Měniče mají detailnější podání vysokých frekvencí oproti dynamickým měničům a miniaturní rozměry.

Nevýhodami jsou, jak již bylo zmíněno úzký frekvenční rozsah, nutnost použití většího množství měničů. Špatné podání nízkých frekvencí a vyšší cena spjatá se složitější konstrukcí. [1]



Obr. 1.2 Tlakový měnič [3]

### 1.3 Elektrostatický měnič

Měnič vytváří zvuk na základě působení elektrostatických sil. Skládá se ze tří hlavních součástí. Z membrány, podložky a statoru.

Membrána je velmi tenká plastová fólie a je napnutá. Její tloušťka se pohybuje od 0,5  $\mu\text{m}$  do 10  $\mu\text{m}$  podle celkové plochy měniče a jeho využití. Na membráně musí být nanesen povlak pro její správnou polarizaci a přivádí se na ní napětí v řádech stovek voltů až kilovoltů.

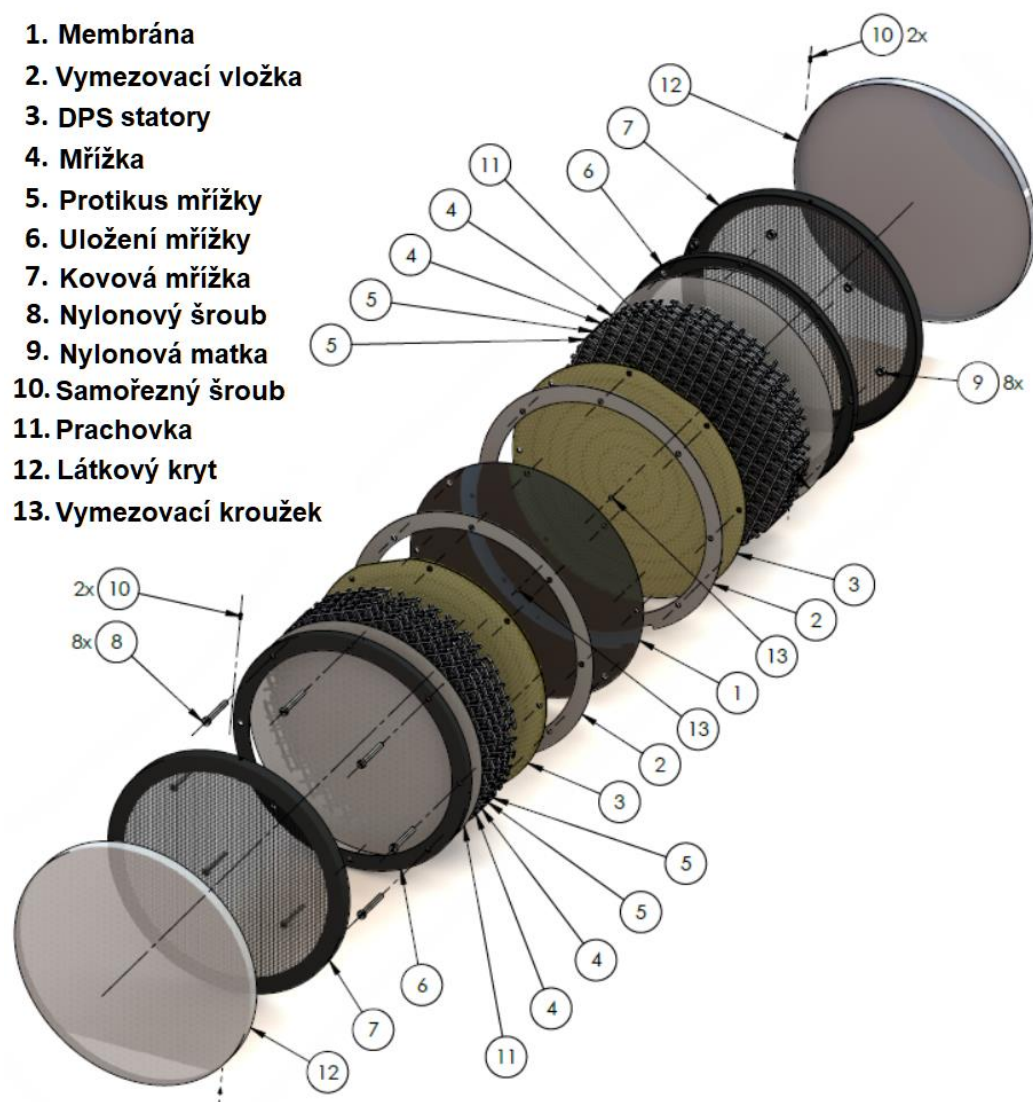
Statory jsou elektricky vodivé desky, které zajišťují pohyb membrány. Na statory je přiváděn střídavý signál o velké amplitudě, statory jsou proti sobě v opačné fázi.

Podložky slouží pouze k oddělení membrány od statoru.

Po sestavení těchto komponent vznikne nejvyužívanější rozložení, to je kombinace jedné membrány a dvou statorů tzv. push-pull panel. Membrána je uprostřed napnutá, polarizovaná a z obou stran obklopená podložkami. Na těchto podložkách jsou umístěny statory, které jsou v opačné fázi, tudíž jeden stator membránu odpuzuje zatím co ten druhý ji přitahuje. Díky tomuto jevu je měnič schopen vytvářet zvuk.

Hlavními výhodami této technologie jsou vyrovnaná frekvenční charakteristika a téměř nulové zkreslení. Tato technologie dokáže poskytnout nevěrohodnější zvukové podání oproti ostatním uvedeným technologiím.

Nevýhodami jsou nutnost použití speciálních zesilovačů, které dokáží poskytnout vysoké napětí potřebné pro tyto měniče. Jejich velikost, a ne příliš dobrá přenositelnost. Dále také složitost a náročnost výroby, které zapříčiňují vysokou cenu. [4]



Obr. 1.3 Schéma elektrostatického měniče [10]

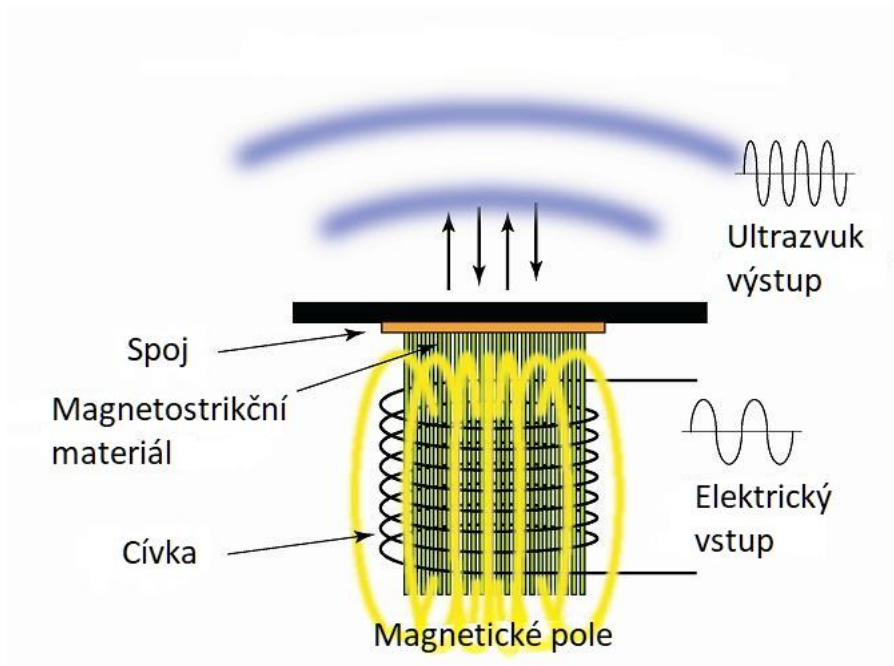


## 1.4 Magnetostrikční měnič

Vlivem magnetického pole dochází v některých feromagnetických látkách k jejich mechanické deformaci, Tohoto jevu využívá magnetostrikční měnič. Tento jev je nelineární. U některých látek dokonce bez ohledu na smysl magnetické indukce dochází k prodlužování nebo zkracování určitých rozměrů. Používají se zde před-magnetované materiály, ty jsou před-magnetovány stejnosměrným magnetickým polem s indukcí  $B$ .

Magnetostrikční měnič je tvořen tyčinkou z magnetostrikčního materiálu, na kterou je navinuta cívka. Dále je tvořen pólovými nástavci permanentního magnetu, kterými protéká magnetický tok do tyčinky přes vzduchové mezery.

V elektroakustice se pro malou účinnost příliš nevyužívá. Používá se častěji v oboru ultrazvuku, v magnetostrikčních zpožďovacích linkách, v elektromechanických filtrech apod.



Obr. 1.4 Magnetostrikční měnič [8]

## 1.5 Piezoelektrický měnič

Piezoelektrický měnič využívá ke své činnosti piezoelektrických vlastností krystalů některých látek. Nejčastěji je používána Seignettova sůl nebo silným elektrickým polem polarizovaná piezokeramika (titanát barya –  $\text{BaTiO}_3$ ).

Mechanickou deformací destičky, vyříznuté vhodným směrem ze základního krystalu, vzniká na jejích stěnách elektrický náboj úměrný působící síle, a tudíž při pružné deformaci i výchylce  $y$ .

Výstupní napětí odebírané z vodivých polepů vytvořených na stěnách, na kterých vzniká náboj, je roven:

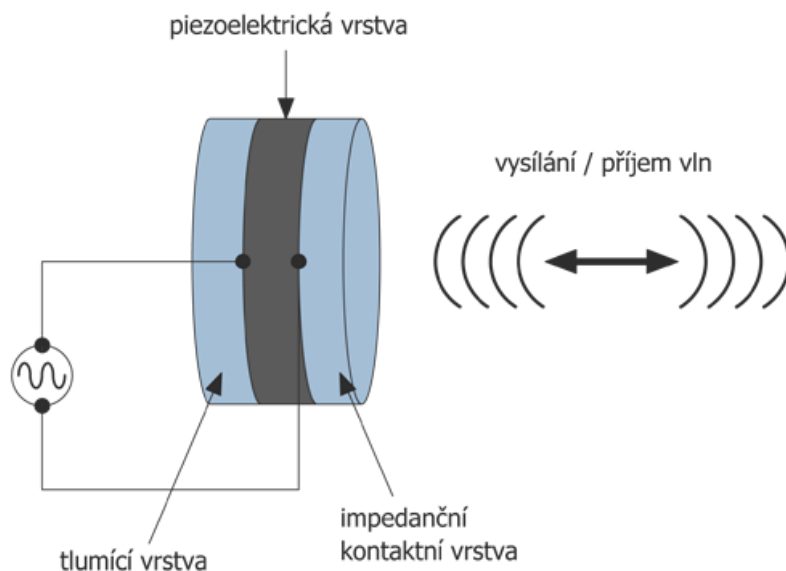
$$u = k * y [V] \quad r. 1$$

kde  $u$  – výstupní napětí,  $k$  – konstanta závislá na materiálu a rozměrech destičky,  $y$  – výchylka při deformaci.

Má stejnou velikost i pro obrácený jev, kdy působením elektrického pole dochází k deformaci krystalu. Vznikající síla  $F$  je úměrná napětí  $u$  přivedenému na polepy

$$F = k * u [N] \quad r. 2$$

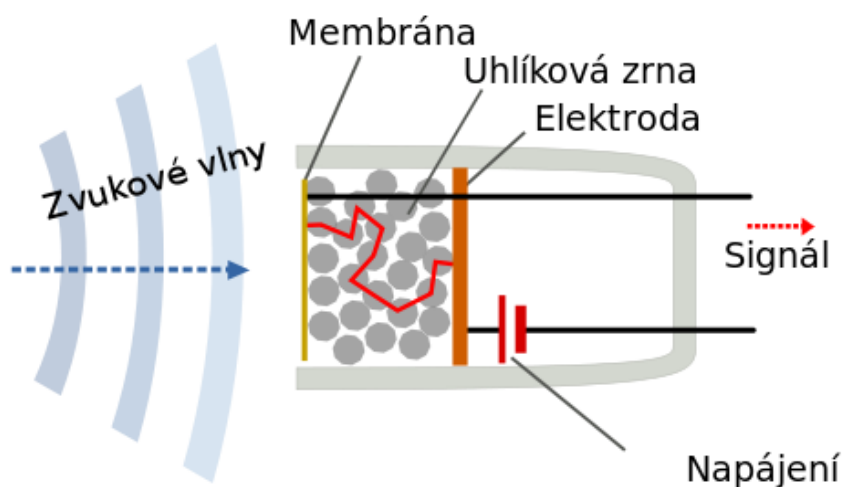
Pro zvětšení výstupního napětí nebo výchylky při obráceném použití se konstruuje dvojice destiček – dvojčata, jejichž výstupní napětí nebo výchylky se sčítají. Tento typ měnič lze tudíž použít jak pro vysílání zvuku tak i jeho příjem. [5]



Obr. 1.5 Piezoelektrický měnič [6]

## 1.6 Odporový měnič

Tento typ se používá pouze u mikrofonů. Činnost je založena na změně přechodového odporu mezi jednotlivými zrnky uhlíkového prachu, která jsou v rytmu působících zvukových vln k sobě více či méně stlačována, čímž se mění jejich odpor a stejnosměrné napětí připojené k měniči. Jedná se o přeměnu akustické energie na elektrickou nepřímo. Využití například jako mikrofony u telefonních sluchátek.



Obr. 1.6 Uhlíkový mikrofon [7]

## 1.7 Magnetoplanární měnič

Planární magnetická sluchátka nebo měniče využívají pro svojí funkci magnetické pole indukované kolem vodiče, kterým prochází elektrický proud. Tento vodič je na velice tenké membráně, která je umístěna v poli permanentních magnetů a pomocí nich je také vychylována. Tímto způsobem je reprodukován zvuk. Magnetoplanární měnič lze považovat za fúzi dvou technologií sluchátkových měničů, dynamického měniče a elektrostatického měniče. Podobně jako u elektrostatického měniče, membrána planárně magnetického měniče je tenká vrstva flexibilního průhledného filmu. K jejímu pohybu je použito magnetické pole permanentních magnetů jako u měničů dynamických. Můžeme setkat s různými pojmy, které popisují planárně magnetická sluchátka. Někdy bývají označovány jako izodynamická, magnetoplanární, magnetostatická nebo ortodynamická sluchátka.

Přesnější popis funkce je, že před a za membránou je umístěna řada magnetů, takže vodiče na membráně jsou umístěny ve velmi rovnoměrném poli magnetického toku (izodynamické magnetické pole). Když proud prochází skrz vodiče, interaguje magnetické pole vytvořené proudovým tokem s izodynamickým polem vytvořeným permanentními magnety, což způsobuje pohyb vodičů, a tím i membrány. Důležitost izodynamického pole je zajistit, aby vztah proudu k síle vyvíjené na membránu byl konstantní bez ohledu na polohu vodiče na membráně a v magnetickém poli. Kvalita izodynamického pole částečně určuje linearitu, a proto přispívá k obsahu harmonického zkreslení reprodukováného zvuku.

Hlavní výhody:

- Vysoce detailní

Planární magnetické měniče jsou jako elektrostatické stejné v tom, že pohybující se membrána je extrémně tenká a lehčí dokonce než vzduch, který se pohybuje. Může být tedy řízena s vysokou jemností a přesností, aniž by docházelo k jejím překmitům, rozmazání zvuku a nadměrné setrvačnosti.

- Spolehlivější

Planární magnetické měniče mají oproti tradičním dynamickým měničům obrovskou výhodu v tom, že cívka je rozprostřena na velké ploše, spíše než stlačena do úzké mezery v masivním kusu kovu. V důsledku toho mohou planární magnetické měniče účinně odvádět teplo, které by se jinak vytvořilo v tradiční cívce. Planární magnetické měniče ve skutečnosti pro danou plochu povrchu dokážou zvládnout mnohokrát větší výkon než tradiční dynamické měniče.

- Nenáročné pro zesilovače

Dobře navržené planární magnetické měniče představují téměř dokonale odporovou zátěž pro zesilovače, protože cívka je v podstatě velmi dlouhý, tenký vodič. Funguje jako jednoduchý odpor. To je v podstatě nejjednodušší možné zatížení pro zesilovače a srovnatelné s tím, co výrobci elektroniky používají při měřeních, která ukazují, jak úžasné jsou jejich výrobky. Z tohoto důvodu lze počítat s tím, že zesilovač bude znít nejlépe.

- Dipól i monopól

Povaha magnetoplanárních měničů umožňuje konstrukci buď dipólovou jako elektrostatické měniče (hrají stejně jak před membránou, tak i za ní) nebo monopólovou (hrají pouze v jednom směru podobně jako dynamické měniče).

- Vysoká citlivost

Závisí především na intenzitě magnetického pole použitých magnetů. Čím vyšší intenzita tím vyšší citlivost.

- Hrají hlasitěji a nižší frekvence

Silnějším magnety umožňují umístění ve větší vzdálenosti od membrány a tím zvětšení prostoru pro její pohyb. Tato modifikace zajistí, že membrána hraje hlasitěji a zároveň podává lépe nižší frekvence než srovnatelně velká membrána u elektrostatického měniče.

Nevýhody:

- Tlumení

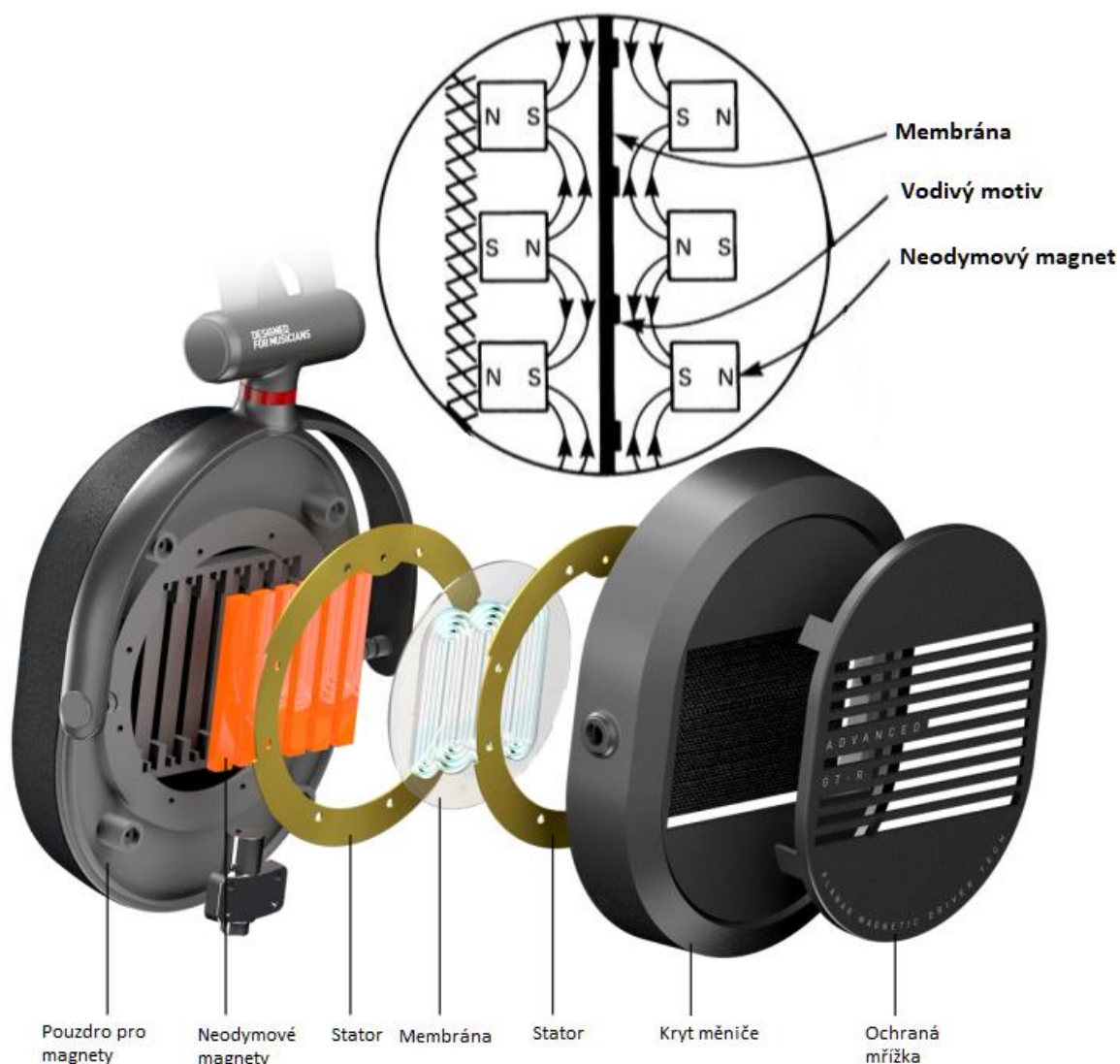
Membrána reprodukující zvuk je obklopena z jedné nebo z obou stran magnety, které mohou bránit průchodu vzduchu. V tomto často velkém objemu vzduchu může často docházet i k rezoncím a problémům se zkreslením. Důležitý je tedy správný design sluchátkového měniče, aby byly tyto nežádoucí jevy odstraněny.

- Hmotnost

Kvůli použití neodymových magnetů, jejich množství a velikosti, bývají z pravidla sluchátka velké a těžká. Potencionálně tak mohou být nepohodlná nebo nevhodná k přenášení.

- Cena

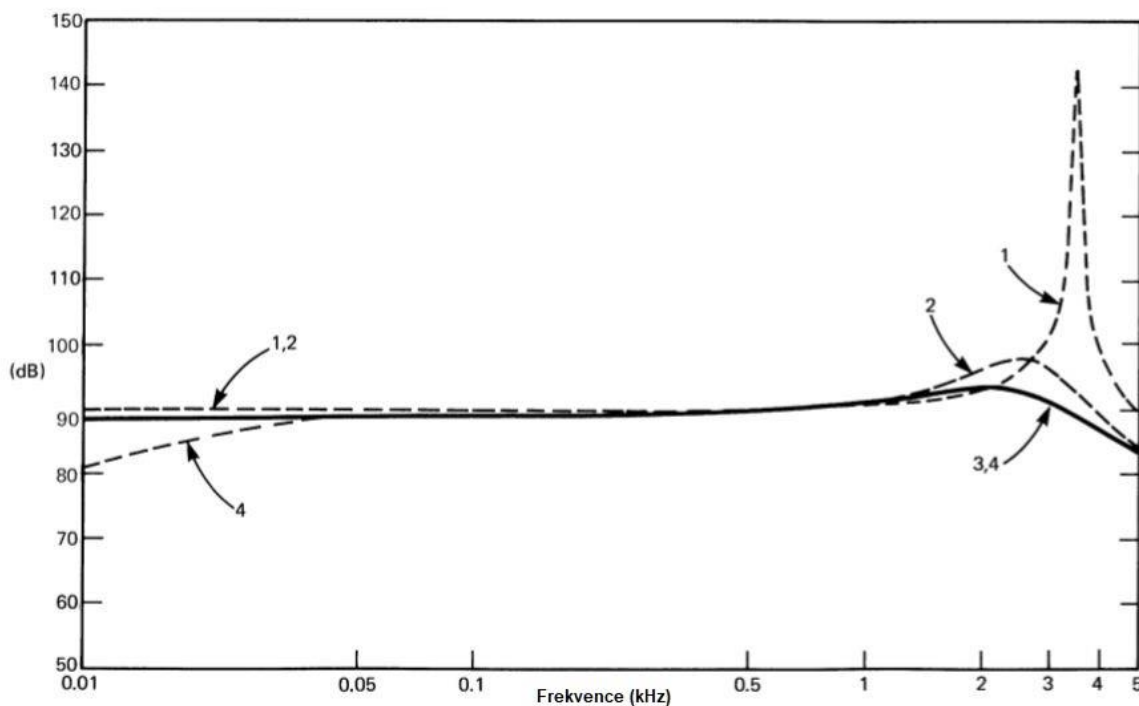
Složitost výroby membrány a zachování jejich parametrů ve velkém počtu kusů zvyšuje cenu magnetoplanárního měniče. Dalšími důvody nadsazené ceny je malé portfolio výrobců vyrábějících sluchátka s těmito měniči a také jejich zařazení do prémiové třídy.



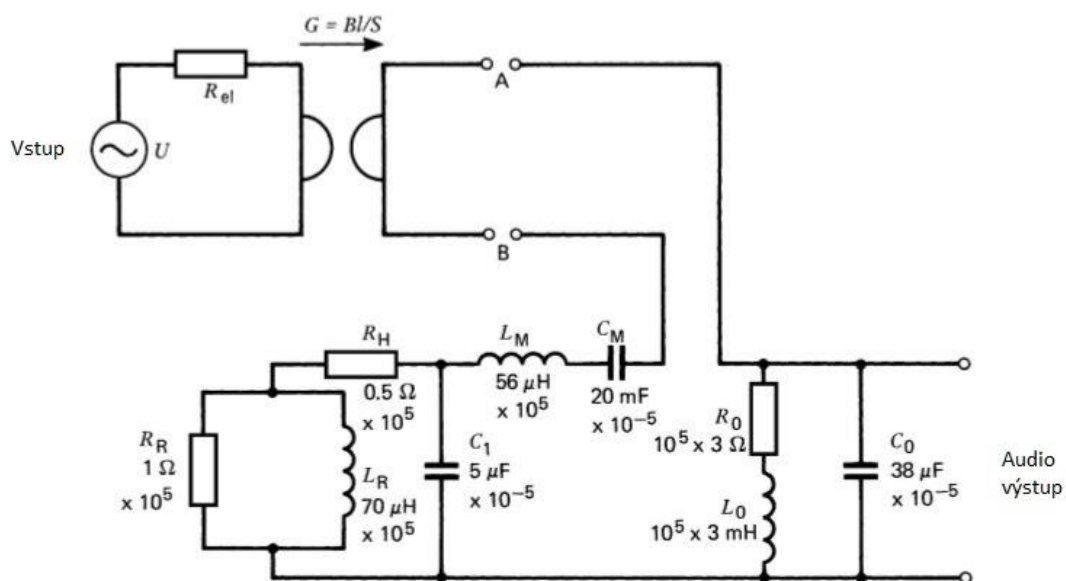
Obr. 1.7 Magnetoplanární měnič se schématem membrány [11]

Vliv membrány na akustiku toho typu měniče je především určen akustickou hmotou membrány  $L_m$ . Nízké mechanické napětí membrány má za následek její nízkou rezonanci menší než 200 Hz, což se však ve výsledné frekvenční odezvě neprojeví, protože dominantní akustická poddajnost,  $C_o$  ve vzduchu je mnohem menší než u membrány. Výsledkem je sériový rezonanční obvod  $L_m$  s  $C_o$ , který má rezonanci cca 4 kHz. Obrázek Obr. 1.8 (křivka 1) ukazuje odezvu pro ekvivalentní obvod (Obr. 1.9) vynechávající všechny akustické odpory s výjimkou impedance úniku  $R_0$  a  $L_0$ . Pro dosažení dobré frekvenční odezvy, musí být tato rezonance téměř zcela utlumena. Přirozený tlumicí účinek radičního odporu  $RR$  je znázorněn na křivce 2. Tato křivka však stále není dostatečná a snažíme se dosáhnout, pokud možno maximální linearitu. Na křivce 3 je vidět přidání porézní rezistence  $RH$  do náhradního obvodu

magnetoplanárního měniče. Křivka 4 zobrazuje vliv tuhosti membrány na frekvenční charakteristiku. Membrána je zde 10x tužší, čímž měnič přichází o schopnost reprodukovat nízké frekvence. Závěrem by se dalo říct, že nejdůležitějšími parametry, které ovlivní zvuk membrány a jsou jednoduše ovlivnitelné je její hmotnost, tuhost (tloušťka) a její napnutí. Pokud membrána bude příliš napnutá, klesá opět její schopnost reprodukovat nízké frekvence. [9]



Obr. 1.8 Frekvenční odezva náhradního schématu měniče [9]



Obr. 1.9 Náhradní zapojení magnetoplanárního měniče [9]

## 2 Sluchátkové zesilovače

U sluchátkových zesilovačů je hlavně kladen důraz na vysoce jakostní reprodukci zvuku. Důraz se klade na nízké zkreslení při zatížení různými typy sluchátek. Výstup je vyhodnocován měřením nebo subjektivním hodnocením na sluchátkách různých druhů. Většina spotřební elektroniky má zvukový výstup 1 V<sub>rms</sub> a profesionální 2 V<sub>rms</sub>, zatímco produkčně vyráběné sluchátkové zesilovače mají výstup pohybující se v rozmezí cca 1–9 V<sub>rms</sub>. Dovolující zesílení v řádu 5–20 dB. Hlavní využití mají tyto zesilovače především pro studiová, profesionální nebo jiná sluchátka, která mají vysoké nároky na zdroj signálu. [21]

### 2.1 Pracovní třídy zesilovačů

Obecně je zesilovač tvořen zesilovacím prvkem (tranzistorem nebo elektronkou) a pomocnými obvody zajišťujícími nastavení a stabilizaci pracovního bodu. Často bývá v zařízeních použita kombinace zesilovačů – předzesilovač, zesilovač, výkonový zesilovač. Podle pracovního bodu (ve které části pracovní charakteristiky zesilovací prvek pracuje) rozdělujeme zesilovače do tzv. tříd. Z tříd potom vycházejí jejich základní zapojení, výhody i nevýhody. Třídy jsou A, B, AB, C, D, E, F atd. [19]

- Třída A

Zesilovače ve třídě A mají velké zesílení a vysokou linearitu (malé zkreslení). Pracovní bod je umístěn v lineární části své charakteristiky. Většinou uprostřed. Zesilovací prvky jsou sepnuty po celou dobu periody, což znamená že zesilovač je aktivní po celou dobu průchodu signálu a využívá kompletní vstupní signál. Proto mají zesilovače ve třídě A vysokou stabilitu zpětnovazební smyčky a vysokofrekvenční stabilitu. Další výhodou je jednoduchá konstrukce a malé množství součástek. Nevýhodou je malá účinnost (25–40 %). Jsou proto vhodné pro nízké zesílení signálů nebo nízkou úroveň výstupního výkonu. [19]

- Třída B

Zesilovače ve třídě B jsou tvořeny pomocí dvou aktivních prvků, kde každý prvek vede polovinu periody, což je 180°. Jeden prvek zesiluje pozitivní část sinusového průběhu a druhý tu negativní. Výstup je potom kombinací těchto dvou zesílených signálů. Protože každý zesilovací prvek je aktivní pouze polovinu cyklu pohybuje se účinnost mezi 60 až 75 %. Tento typ však má velké



přechodové zkreslení v oblasti, kde výstupní signál prochází nulou. Toto zkreslení je způsobeno tím, že jakmile jeden prvek dokončí svoji část cyklu, druhý musí okamžitě přejít z neaktivního stavu a poskytnout stejný výstupní výkon přesně v čase skončení prvního prvku. Zde dochází ke zpoždění a již výše uvedené chybě a zkreslení signálu. Právě pro tuto limitaci a velké zkreslení není tento typ vhodný pro zesilování audio signálu. [19] [20]

- Třída AB

Tato třída zesilovače je kompromisem mezi dvěma předchozími třídami. Charakterizuje ji větší účinnost než ve třídě A a nižší zkreslení než ve třídě B. Tohoto je dosaženo za pomoci posunutí pracovního bodu obou zesilujících prvků tak, aby vedly i v oblasti minimálních amplitud, kde zesilovače třídy B vykazují nelinearity. To znamená aktivitu obou prvků i v případě malých signálů (třída A). Při větších amplitudách je jeden z prvků po část periody zcela uzavřen. Dosahují účinnosti kolem 75 %. [19] [20]

- Třída C

Využití této třídy pro zesilování nízkofrekvenčních signálů nemá význam. Používá se ve vysokofrekvenční technice a má uplatnění pro AM a FM vysílání. Pracovní bod C se pohybuje v aktivní oblasti po mnohem kratší dobu, než je  $180^\circ$  a nachází se na „prodloužené“ převodní charakteristice. Vzniklé zkreslení je velké nehraje však roli je-li v kolektoru vysokofrekvenční rezonanční obvod. Zesilovač vyžaduje větší budící signál, ale zároveň pracuje s nejvyšší účinností, která může být až 90 %. [19] [20]

- Třída D

Zesilovače třídy D pracují v pulsním režimu podobně jako spínané napájecí zdroje s využitím PWM. Spínaný signál pro koncový stupeň se získá pomocí pulzně šířkové modulace nebo delta modulace. Na výstupu je použita dolní propust pro odfiltrování složek s vysokými kmitočty. Hlavní výhodou celé konstrukce je účinnost, která často přesáhne i 90 %, protože výstupní tranzistory jsou během své činnosti buď zcela sepnuty nebo úplně nevodivé. Tímto způsobem se vyloučí situace, kdy tranzistor vede částečně, kdy při poměrně velkém proudu na něm vzniká velký úbytek napětí, takže se velké množství energie musí proměnit na teplo. Pro vyšší frekvence však není příliš

vhodný, kvůli limitované šířce pásma, která závisí na dolní propusti a modulu převodního signálu.[19] [20]

- Ostatní třídy

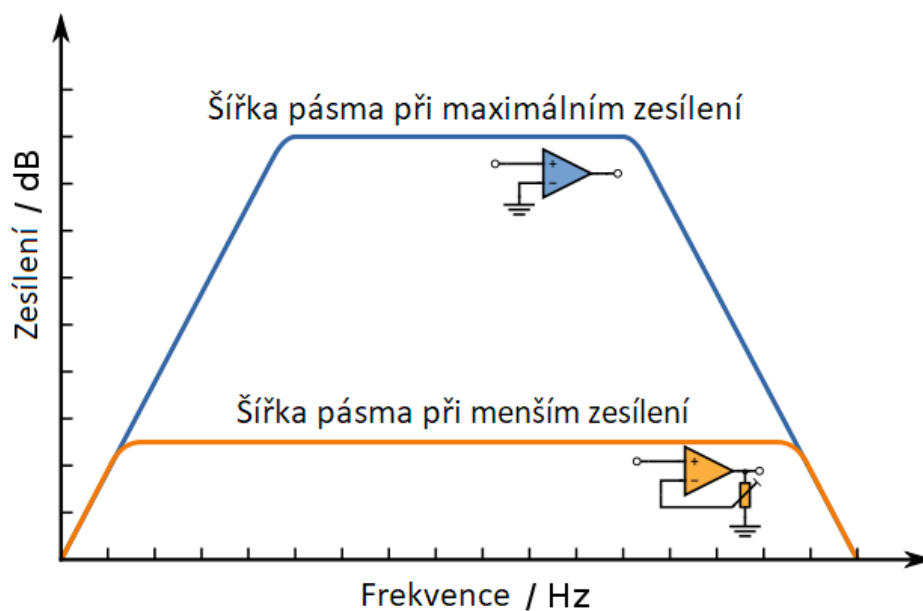
Mezi další třídy patří například E, F, G a H. Zesilovače třídy E jsou vysoce účinné výkonové zesilovače, které využívají spínací topologie a pracují v rádiových frekvencích. Třída F jsou zesilovače s velice vysokou impedancí a mohou být poháněny čtvercovým nebo sinusovým signálem. Pro sinusový vstup může být tento zesilovač vyladěn pomocí induktoru a může být použit ke zvýšení zisku. Třída G využívá více napájecích hladin. Pokud je potřeba zpracovat malé signálové úrovně, zesilovač zvolí nižší napájení. Třída H je další vylepšenou verzí třídy G s ještě komplexnější možností nastavení napájecího napětí. [19] [20]

## 2.2 Důležité parametry audio zesilovačů

Existuje mnoho parametrů, kterými lze porovnávat výkon, stabilitu nebo kvalitu reprodukce zesilovače. Většina těchto parametrů platí i pro výkonové zesilovače určené pro reproduktory. V této podkapitole je popsáno pouze několik nejdůležitějších parametrů.

- Gain Bandwidth Product

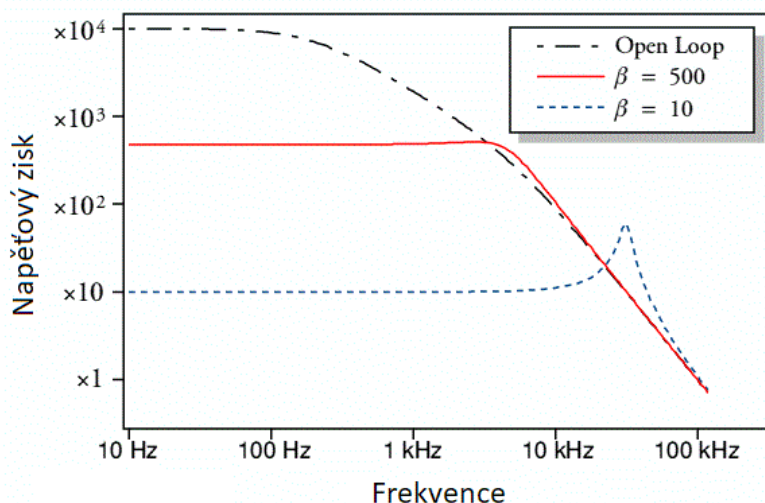
Dále označované jako GBWP pomáhá indikovat jaká bude šířka pásma zesilovače při různých zesíleních. Čím větší tím lepší vlastnosti zesilovače ve vysokých frekvencích. Vyšší GBWP však obvykle znamená větší odběr energie a potencionální nestabilitu. Pro nízké zkreslení při 20 kHz by mělo být alespoň 5 MHz pro  $G = 1$ . Aby se dalo GBWP porovnávat mezi různými zesilovači je třeba jej specifikovat pro určitý stupeň zesílení. Například při zesílení 1, 10 apod. Většina výrobců poskytuje i graf měření při určitých zesíleních. [12]



Obr. 2.1 Graf závislosti šířky pásma na zesílení [13]

- Open-loop gain

Zisk zesilovače s otevřenou smyčkou je zisk získaný, když v obvodu není použita žádná celková zpětná vazba. Zisk otevřené smyčky v některých zesilovačích může být mimořádně vysoký. Ideální operační zesilovač má nekonečný zisk v otevřené smyčce. Obecně platí čím vyšší tím lepší, ale nejméně by měl být 90 dB. Nejlepší sluchátkové zesilovače mají open-loop gain 140 dB. [12]



Obr. 2.2 Graf závislosti frekvence na napěťovém zisku [14]

- Slew Rate

Tzv. „rychlost přeběhu“ dále jako SR je definována jako změna napětí nebo proudu za jednotku času. V zesilovačích může nedostatečná schopnost reagovat na změny signál vést k nelineárním efektům v signálu a zkreslení. U sinusového signálu, musí SR splnit tuto podmínku ve všech bodech křivky signálu:

$$SR \geq 2\pi f V_{pk} \quad r. 3$$

Kde  $f$  je frekvence signálu a  $V_{pk}$  jeho amplituda. Při poslechu hudby též hraje roli kvalita přehrávané skladby. Například nahrávka nahraná v 16 bit a 44 kHz má periodu cca 22  $\mu$ s. Tudíž nejhorší stav, který může v případě této nahrávky nastat je maximální napěťové zesílení zesilovače poděleno 22  $\mu$ s. Pokud budeme brát maximální napětí, které dokáže zesilovač vyprodukovat 20 V tak SR bude 0,9 V/ $\mu$ s. S rostoucí kvalitou nahrávek pak také rostou nároky na SR. Dostačující rozsah SR je mezi 2,5 – 5 V/ $\mu$ s. [12]

- Total Harmonic Distortion

Dále jako THD je míra harmonického zkreslení přítomného v signálu a je definována jako poměr součtu výkonů všech harmonických složek k výkonu základní frekvence. V audio systémech čím menší THD tím je výstupní signál méně zkreslený a systém podává věrohodnější přednes zvuku. Profesionální zesilovače mají THD v tisícinách procent. V praxi se THD testuje pomocí audio analyzáru. Kde na ose x je frekvence a na ose y zkreslení. Výsledné křivky v grafu se poté měří pro různé zatížení na výstupu, které může nastat podle připojeného typu sluchátek a různá zesílení. Výsledkem je graf, ze kterého lze říct, jak velké je zkreslení při určité zátěži, zesílení a frekvenci. [12]

- Common Mode Rejection Ratio

Dále jako CMRR je vlastnost operačního zesilovače potlačit vstupní signály, které se objeví současně na obou vstupech a jsou ve fázi. Jak již vyplývá z názvu diferenční zesilovač vstupy se odečítají a výstup by měl být nulový. Ideální diferenční zesilovač má CMRR nekonečné. V reálných podmínkách je ideální CMRR pro audio zesilovač +100 dB. Nejhorší však 80 dB. [12]

- Power Supply Rejection Ratio

Dále jako PSRR je schopnost zesilovače potlačit jakékoli zákmity na zdroji napájení, které mohou proniknout do výstupního signálu. Pokud je tento parametr dostatečně vysoký není třeba používat komplikované zdroje napájení s překompenzovanou filtrací, jelikož je zesilovač schopen potlačit zákmity sám o sobě. Zde opět platí již výše zmíněné hodnoty jako u CMRR kde 100+ dB je naprosto dostačující hodnota PSRR. [12]

- Signal-to-Noise Ratio

Dále jako SNR je parametr, který porovnává úroveň požadovaného signálu oproti úrovni šumu na pozadí. SNR je definován jako poměr výkonu signálu k výkonu šumu, vyjádřený v decibelech. Poměr větší než 1:1 (větší než 0 dB) označuje více signálu než šum. [15]

- Nízký šum

Existuje několik druhů šumů např. napěťový, proudový, Johnsonův atd. Platí čím menší šum tím lépe, ale například napěťový a proudový šum jsou provázené. Čím menší jeden tím větší druhý a naopak. Tyto šumové parametry se dají najít v datasheetech operačních zesilovačů. Správným výběrem vhodného operačního zesilovače můžeme výrazně snížit šum celého zařízení. Toto tvrzení platí i pro ostatní parametry, kdy vhodná volba může celkově zlepšit reprodukováný zvuk, avšak záleží i na návrhu ostatních obvodů zesilovače a jejich rozložení. [12]

- Crosstalk

Neboli takzvané „přeslechy“ je nežádoucí jev, kdy signál na jednom kanálu zesilovače proniká do kanálu druhého. Tímto dochází ke špatné separaci sterea a při poslechu hudby mohou být v jednom kanálu slyšet ozvěny s druhého. Přeslech je obvykle způsoben nežádoucí kapacitní, induktivní nebo vodivou vazbou z jednoho obvodu nebo kanálu do druhého. Opět platí čím větší separace kanálu tím lepší reprodukováný zvuk. [15]

## 3 Návrh magnetoplanárního měniče, sluchátek a zesilovače

Tato kapitola se zabývá návrhem a designem sluchátek. Použitými materiály na výrobu magnetoplanárního měniče, který bude následně umístěn do těla sluchátek. Dále pak volbou a návrhem zesilovače k takto vytvořeným sluchátkům.

### 3.1 Návrh sluchátek

Při návrhu těla sluchátek byla využita inspirace jinými konvenčně vyráběnými sluchátky. Sluchátka se skládají ve své podstatě ze dvou hlavních částí. První částí je hlavový most, na kterém jsou umístěny měniče v pouzdrech s náušníky, které doléhají na uši. Hlavním účel tohoto mostu je držet měniče na správném místě a poskytnout dostatečný přítlak, aby sluchátka nepadala a přiléhala k uším. Druhou částí jsou pouzdra na měniče, která zabezpečují ochranu elektroakustickým měničům, upevnění k hlavovému mostu. Dále jsou na nich umístěny náušníky, které poskytují utěsnění uší od okolního hluku a zároveň také aby reprodukováný zvuk sluchátky neunikal do okolí.

#### 3.1.1 Způsob návrhu a výroba

Návrh samotné konstrukce sluchátek probíhá za pomoci 3D modelovacího programu Solidworks, ve kterém budou vytvořeny jednotlivé konstrukční části sluchátek. Tyto části budou poté vytištěny za pomoci 3D tiskárny. Mezi nejpoužívanější materiály používané pro tisk patří ABS, PLA a PET-G.

- PLA

Jedná se o materiál biologického původu. Z výše uvedené trojice materiálu je nejjednodušší na tisk. Potřebuje nejnižší teplotu tisku a je méně náchylný na chyby v průběhu tisku. Jeho nevýhodou je nepříliš vysoká mechanická pevnost a pružnost. Kvůli jeho biologickému původu také mnohem rychleji degraduje působením vnějších vlivů. [16]

- ABS

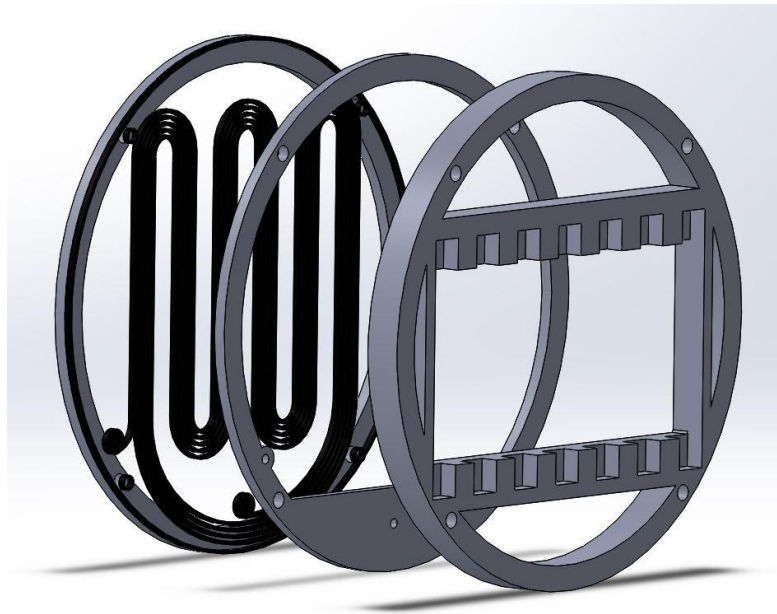
Je to amorfní termoplast, který je velice tuhý a houževnatý. Má tudíž dobré mechanické vlastnosti a pevnost. Dobře odolává vnějším vlivům. Z uvedené trojice je však nejnáročnější pro tisk, kvůli vysoké teplotě, která je potřebná v

průběhu tisku a pomalé chladnutí výtisku. Také by zbytečně navyšoval hmotnost již tak těžkých sluchátek. [16]

- PET-G

Je to opět termoplast. Z pohledu vlastností se jedná o kombinaci předchozích dvou materiálů. Má vysokou pevnost, pružnost a odolává dobře vnějším vlivům. Teplota tisku je podobná jako u ABS není však potřeba pomalé chlazení výtisku. [16]

Na výrobu konstrukce bude použit materiál PET-G, kvůli jeho vhodnému poměru kladných a záporných vlastností a jeho relativně bezproblémovému tisku.



Obr. 3.1 Ukázka modelu vnitřní konstrukce včetně membrány v Solidworks

## 3.2 Návrh magnetoplanárního měniče

Princip funkce magnetoplanárního měniče byl popsán v podkapitole 1.7. Pro správnou funkci jsou zapotřebí dva hlavní komponenty. Jedním je tenká fólie s pokoveným motivem tvořícím cívku, ve které se bude indukovat magnetické pole při průchodu proudem. Druhým komponentem jsou permanentní neodymové magnety, které budou generovat magnetické pole se kterým bude interagovat pole vytvořené průchodem proudem v cívce na fólii.

Při návrhu měniče byl brán ohled na jeho fyzické rozměry a vhodnost jeho aplikace pro sluchátka. Po důkladném průzkumu byl zvolen kruhový tvar měniče. Používají se také měniče obdélníkového tvaru. Ty byly však zavrhnuty z důvodu špatné ergonomie výsledných sluchátek a jejich velikosti. Rozdíl v kvalitě reprodukováného zvuku mezi těmito měniči nebylo možné z průzkumu určit, tudíž byl zvolen konvenční tvar sluchátek s lepší ergonomií a komfortem.

### 3.2.1 Výběr materiálu pro membránu vytvoření motivu

Fólie, která bude tvořit membránu musí být co nejtenčí a nejlehčí. Její tloušťka (tuhost) a hmotnost přímo ovlivňují zvukové vlastnosti měniče. Pro dosažení optimálního zvukového projevu, proto musí materiál fólie mít tyto parametry, pokud možno co nejlepší.

Dalším kritériem je nutnost vytvoření kovového motivu na povrchu membrány. Tento motiv bude tvořit cívku, kterou bude procházet proud a bude se kolem ní indukovat magnetické pole. Nejvhodnější metodou výroby, kterou jsem zvolil v ohledu na dostupné možnosti je leptání motivu cívky přímo na fólii, která je již celá pokovená.

Výše zmíněným kritériím, které byly zvoleny, odpovídá několik typů materiálů lišících se v tloušťce, použitém podkladovém materiálu a pokovené vrstvě. Dalším aspektem, který hrál při finálním výběru roli byla dostupnost materiálu a jeho pořizovací cena.



Přehled materiálů:

- Mylar pokovený hliníkem

Jedná se v podstatě o velice tenkou fólii s PET (polyethylentereftalátu). Její tloušťka se může pohybovat až do jednotek mikronů. Varianta pokovená hliníkem má tloušťku 5 um. Fólie je volně dostupná ke koupi a to i v malém množství. Cena za 1 m<sup>2</sup> se pohybuje mezi 150–200 Kč. Při prvních pokusech s leptáním se však ukázalo, že nanosená vrstva hliníku je po celé ploše značně nerovnoměrná. Jeho další použití tudíž zůstává otázkou.

- Pyralux

Materiál určený pro výrobu flexibilních desek plošných spojů. Základní materiál je polyimid nejmenší vyráběné tloušťky 25 um a pokovená vrstva je z mědi. Ač má tento materiál vyšší tloušťku jeho výhodou je rovnoměrná vrstva mědi. Dále také jeho určení přímo pro výrobu plošných spojů, tudíž leptání motivu by mělo být bezproblémové. Bohužel není volně dostupný ke koupi v menším množství

Existuje několik dalších materiálů podobných vlastností, které jsou deriváty výše uvedených materiálů.

Motiv byl na membránu vytvořen pomocí leptání, jak již bylo zmíněno výše v této kapitole. Bude použit stejný princip jako u DPS. Nanesení fotocitlivého laku, osvětlení motivu pomocí UV výbojky, poté odstranění laku pomocí hydroxidu sodného a následné vyvolání v chloridu železitém.

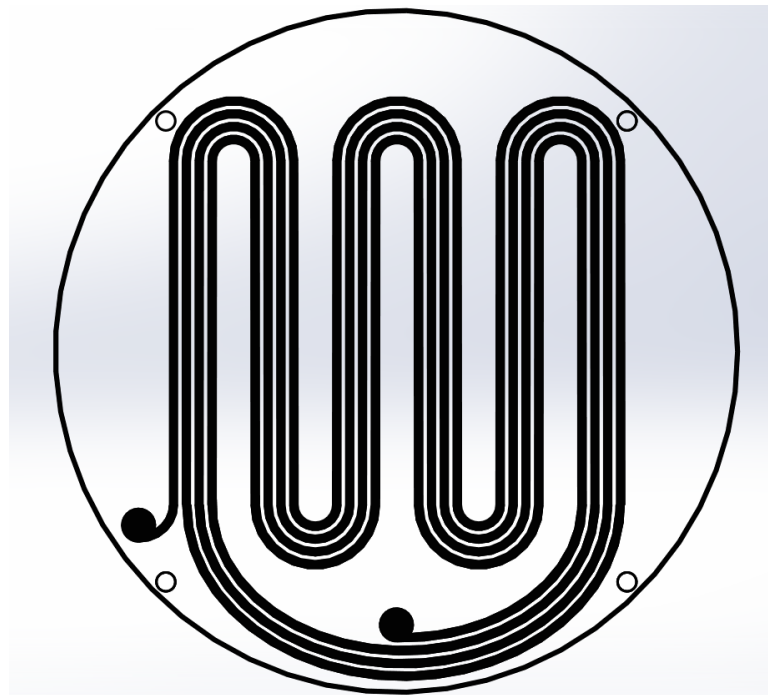
### 3.2.2 Návrh motivu membrány

Kovový motiv na membráně musí tvořit cívku, která bude indukovat magnetické pole. Toto magnetické pole musí být rovnoměrně rozložené, pokud možno po co největší ploše membrány se stejným magnetickým tokem. Takto vzniklé pole se nazývá izodynamické. Odsud také pochází jeden z několika názvů měniče.

Na začátku kapitoly 3.2 byl zdůvodněn výběr kruhového tvaru membrány. Motiv bude vytvořen na membránu o průměru 80 mm. Tento rozměr byl zvolen s ohledem na ostatní konvenčně vyráběná sluchátka. Dalším důvodem pro zvolení tohoto rozměru

byla maximalizace aktivní plochy membrány, kvůli finálnímu zvukovému projevu a stále zachování relativně kompaktních rozměrů.

Tvar cívky byl vytvořen po důkladném průzkumu dalších konvenčně vyráběných měničů a několika uvolněných patentů na Google patents. Dále s ohledem na finální impedanci návrhu a dostupnost neodymových magnetů s určitými rozměry.

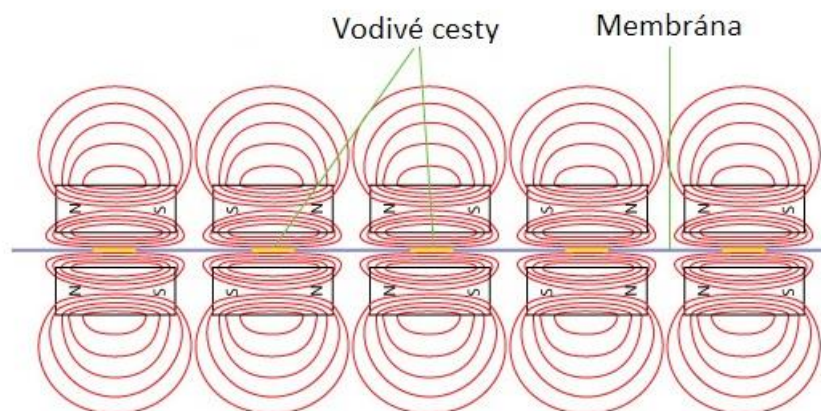


Obr. 3.2 Membrána s motivem

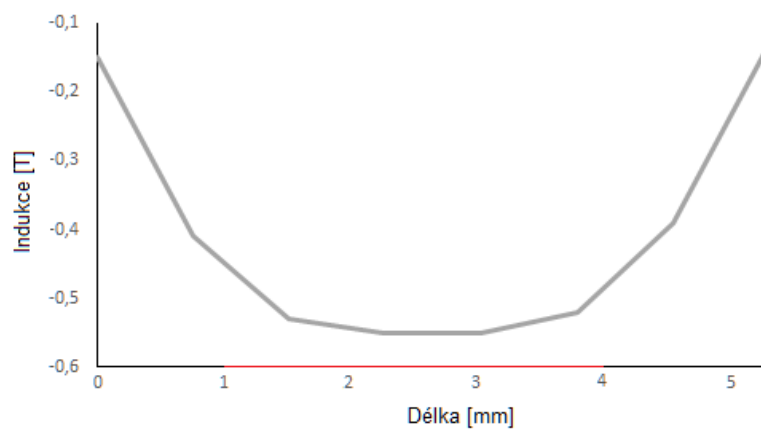
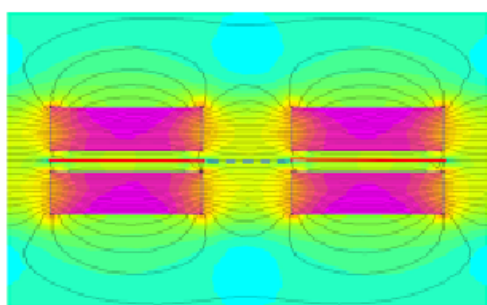
### 3.2.3 Rozložení magnetů a magnetické pole cívky

Magnetické pole indukované v kovovém motivu se řídí stejnými zákony jako pole, které by procházelo stejně rozmístěnými vodiči. Proud prochází stejným směrem ve všech vodičích. V oblasti mezi vodiči jdou siločáry obou magnetických polí proti sobě a pole se zeslabuje, v oblasti vně vodičů mají siločáry obou polí stejný směr a pole se zesiluje, což je jev, který je žádoucí. Toto pole totiž bude interagovat s polem neodymových magnetů.

Neodymové magnety lze rozmístit dvěma způsoby, aby vytvořily izodynamické magnetické pole. Prvním způsobem je umístění pólů magnetů horizontálně, kde sousední magnety mají shodné póly viz. obr. 3.3.

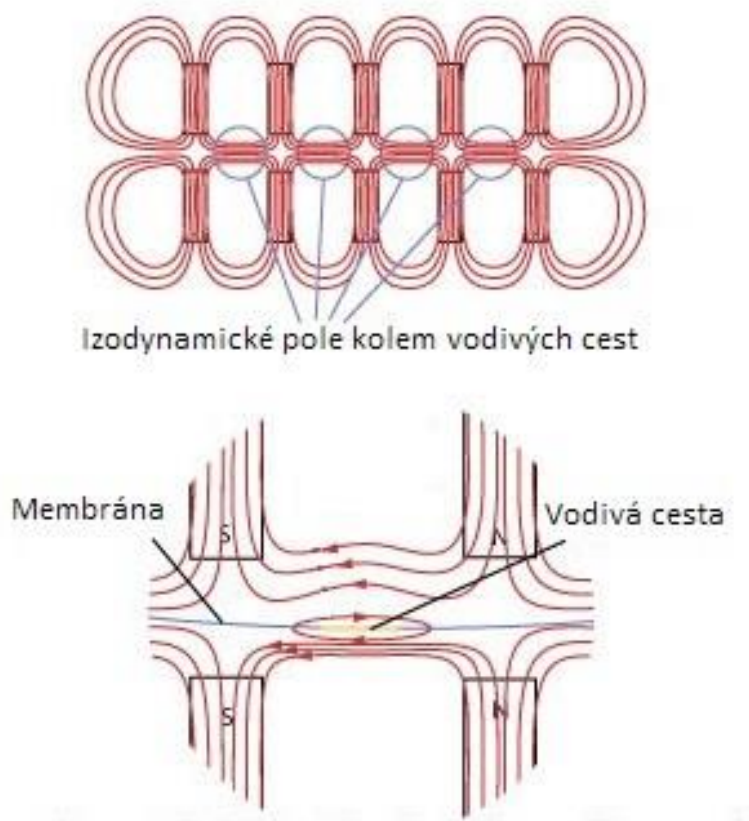


Obr. 3.3 Horizontální umístění magnetů [17]

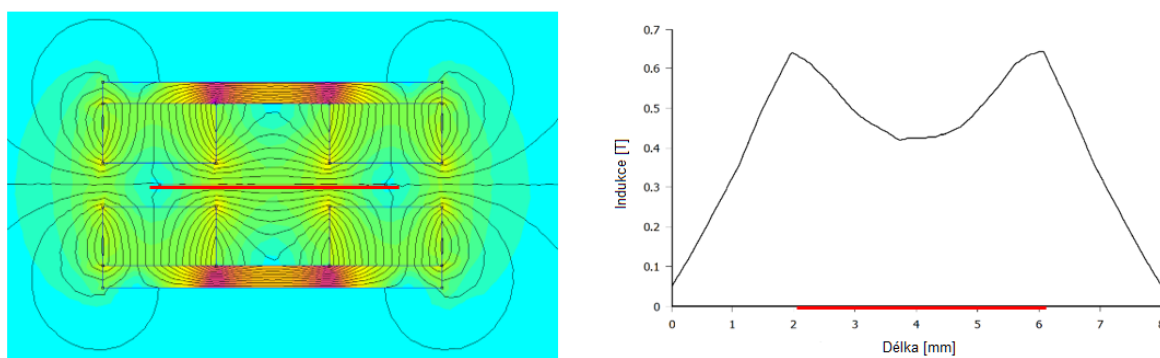


Obr. 3.4 Simulace mag. pole s grafem působení síly [18]

Síla dle simulace působící na vodivou cestu je 0,5 T. Druhou možností je umístění magnetů a jejich pólů vertikálně. Toto rozložení je více využívané.



Obr. 3.5 Vertikální umístění magnetů [17]



Obr. 3.6 Simulace mag. pole s grafem působení síly [18]

V případě toho rozmístění sice není síla rovnoměrně rozložena na celou vodivou cestu homogenně, je však větší. Po krajích cesty působí síla přes 0,6 T a na středu vodivé cesty to je přibližně 0,45 T.

Použité rozložení magnetů bude kombinací těchto dvou způsobů. Magnety budou polarizovány vertikálně budou však fyzicky širší a umístěny víc nad vodivou cestou, aby nedocházelo k tak velkému propadu magnetické indukce ve středu cesty.

### 3.2.4 Výpočet impedance výsledného motivu

Pro materiál mylar s naneseným hliníkem jsou známy pouze hodnoty množství hliníku na plochu tj. 6,8g/m<sup>2</sup>. Pro výpočet tloušťky vrstvy musí být použita rovnice *r. 4*.

$$d = \frac{V}{S} = \frac{m}{\rho \cdot S} \quad r. 4$$

Po výpočtu je tloušťka vrstvy 0,025 μm. Tloušťka pro materiál Pyralux je daná datasheetem a pohybuje se v rozmezí 5–35 μm. Výpočet impedance motivu cívky na membráně je vypočten z rovnice *r. 5*.

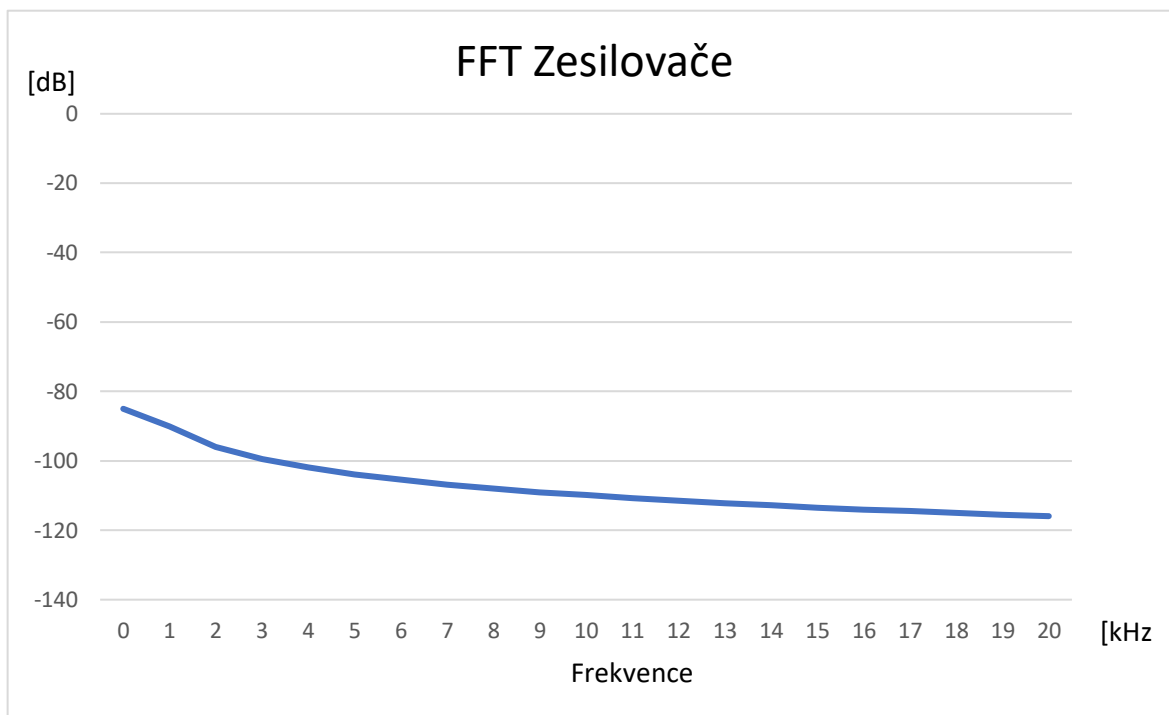
$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad r. 5$$

Z vypočtených hodnot pro mylar s hliníkem byla zjištěna příliš vysoká impedance 7 kΩ. Tento materiál s příliš malou vrstvou hliníku není vhodný. Pro Pyralux s tloušťkou mědi 5 um vyšla impedance cca 45 Ω, což je očekávaná hodnota pro sluchátkový měnič. Mylar se stejně tlustou vrstvou hliníku by měl hodnotu 70 Ω. Hodnota typická pro magnetoplanární měniče je 30–80 Ω, tudíž tento motiv s dostatečnou vrstvou mědi nebo hliníku je z hlediska impedance přizpůsobení vhodný. Jak je vidět v následující tabulce s rostoucí tloušťkou vrstvy materiálu klesá impedance motivu. Hodnoty platí pro motiv obr. 3.2.

Impedance motivu		
Materiál	Tloušťka [μm]	Impedance [Ω]
Hliník	5-10	69–35
Měď	3-7	75–32

Tabulka 1: Impedance motivu





Obr. 3.8 Graf simulace FFT z dat z programu LTspice

Výsledné THD vyšlo 0,0024 %. Což je hodnota adekvátní, jakou mají profesionální sluchátkové zesilovače.

## 4 Výroba magnetoplanárního měniče, sluchátek a zesilovače

V této kapitole je popsán postup výroby jednotlivých komponent magnetoplanárních sluchátek s měničem a postup výroby příslušného zesilovače.

### 4.1 Výroba těla sluchátek

Tělo sluchátek a uložení pro měniče bylo navrženo pomocí programu Solidworks. Jednotlivé díly byly navrženy a vymodelovány s ohledem na součásti používající se u sluchátek, která jsou volně dostupná na trhu. Například rozměr uložení pro měnič, aby bylo možno použít pěnové náušníky o rozměru 100 mm, které se používají. Náhlavní most byl použit z nespifikovaného modelu sluchátek značky Pioneer z důvodu složitosti vytvoření tohoto dílu a také jeho celkové strukturální pevnosti, která by nemusela být pomocí 3D tisku dostatečně zabezpečena.

Jak bylo vysvětleno v podkapitole 3.2.1 pro výrobu byl zvolen materiál PET-G. Byla vybrána černá barva především kvůli estetickému dojmu z finálního produktu. Filament pochází od výrobce Devil Design.

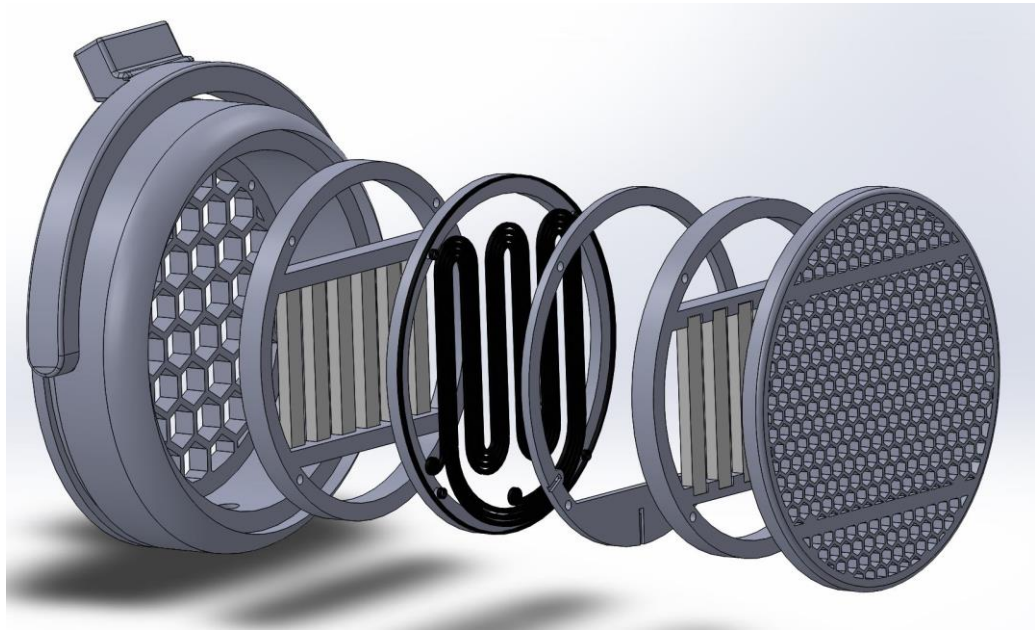
Pro tisk byla použita domácí 3D tiskárna od výrobce Creality konkrétně model Ender 3. Jedná se o stavebnici. Tiskárna však byla v průběhu stavby značně modifikována pro maximalizaci kvality výstupního tisku.



Obr. 4.1 3D Tiskárna využitá pro tisk [22]



Jedna strana sluchátek se celkem skládá ze sedmy nezávisle vytištěných dílů. Jednotlivé díly do sebe pasují pomocí sofistikovaně navrženého tvaru a zbytek je spojen pomocí šroubů. Na jednu stranu bylo použito celkem pět šroubů. Jeden šroub M5 x 5 mm pro připevnění k náhlavnímu mostu a dále čtyři šrouby M2 x 28 mm, které procházejí skrz celé tělo a drží celé uložení membrán pohromadě. Do plastového těla byly zataveny závity, aby metrické šrouby mohli být správně uchyceny.



Obr. 4.2 Díly pro jednu stranu sluchátek

Vytištění díly bylo nutné po tisku očistit a opracovat. Například díry pro šrouby nebyly dokonale vytištěny, takže bylo nutné je provrtat vrtákem velikosti M2. Dále obvody kruhů jemně zabrousit brusným papírem, aby do sebe jednotlivé části hladce zapadly. Do těla sluchátek byl poté implementován magnetoplanární měnič, což zahrnovalo nalepení neodymových magnetů na vytištěné držáky. Pro zabránění poškození měniče vniknutím větších mechanických částí, prachu a potu byly obě mřížky utěsněny pomocí speciální tkaniny. Jedná se o akusticky průzvučnou potahovou tkaninu určenou na potahování reproduktorů, která nijak nezkrusí procházející zvuk. Poslední částí jsou generické náušníky, které se pouze nasadí na tělo.

## 4.2 Výroba magnetoplanárního měniče

Výroba magnetoplanárního měniče byla nesložitější ze všech ostatních součástí. Bylo potřeba vyrobit tenkou membránu o určitém napětí na které je vytvořený kovový motiv s předem určeným tvarem. Membrána musí být pokud možno co nejtenčí, aby byla dodržena co nejnižší hmotnost a zároveň musí mít dostatečnou pružnost. Kovový motiv musí mít také určitou tloušťku vrstvy kvůli impedančnímu přizpůsobení výsledného měniče.

Na membránu byl použit materiál Mylar o tloušťce 1  $\mu\text{m}$ . Jedná se v podstatě o fólie PET (polyethylentereftalát). Tato fólie byla napnutá, poté na vzniklou plochu byly přilepeny vytištěné plastové podložky, které tvoří hlavní podkladový materiál pro



Obr. 4.3 Napnutá a přilepená membrána

měníč. Byly přilepeny pomocí chemoprenu. Chemopren byl zvolen kvůli jeho schopnosti i po zatuhnutí si udržet pružné vlastnosti a dále také jeho vysoké přilnavosti. Po zaschnutí byla totiž podložka s membránou oddělena od napnuté plochy a bylo zapotřebí, aby chemopren udržel membránu napnutou. Na takto vytvořenou membránu byla poté nalepena měděná páska. K tomuto řešení bylo nutné přistoupit v důsledku vzniklé situace a znemožnění přístupu do školní laboratoře kdy by jinak tato vrstva mědi byla naprášena.



Obr. 4.4 Membrána s nalepenou vrstvou mědi

Na měděnou vrstvu byla nanесena vrstva pozitivního fotorezistu POSITIV 20. Po aplikaci bylo nutno nechat lak zaschnout. Leptání probíhalo jako u desek plošných spojů. Na membránu byla přiložena šablona s motivem, která byla osvícena pomocí UV osvitky. Dále byla takto osvícená membrána ponořena do hydroxidu sodného, kde byl odplaven fotorezist a poté do chloridu železitého kde byla odplavena přebytečná měď. Tento proces bylo nutné opakovat několikrát, než se podařilo vytvořit membránu, která byla funkční. Bylo potřeba správně odhadnout vrstvu fotorezistu, čas v osvitce a dobu leptání, aby se membrána nepodleptala nebo naopak nevyleptala málo. Kvůli možnosti poškození membrány nebylo možné provádět na povrchu po leptání žádné zásahy a pokusy o opravy. Komplikací byla lepená vrstva mědi, pokud by tato vrstva byla naprášena podle původního plánu, motiv by bylo snažší vyleptat a nedocházelo by tak často k podleptání. Potencionálními komplikacemi, které mohou nastat je odlepení motivu, v důsledku vibrací při reprodukci zvuku.

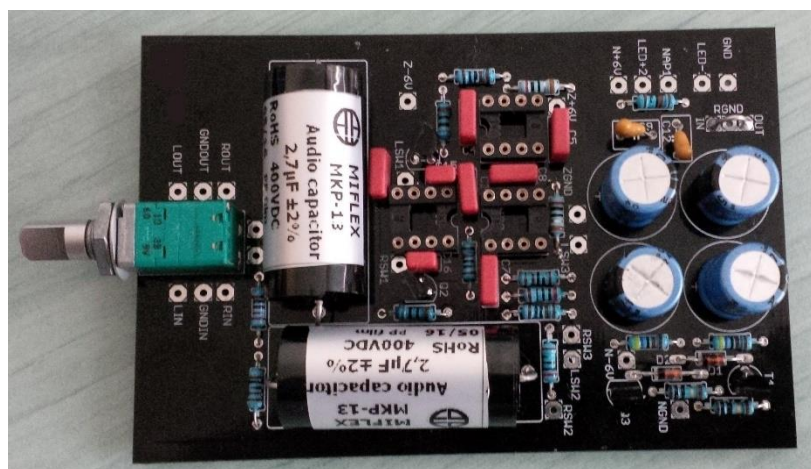




Název	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
C1, C2	2,7uF	C375-155X418	polypropylen
C2, C3, C4, C5, C7, C8	100nF	C050-030X075	fóliový
C9, C12	100nF	C050-045X075	tantalový
C10, C11, C13, C14	470uF	E5-13	elektrolytický
C15, C16	220pF	C025-025X050	fóliový
D1, D2	1N4148	DO35-10	-
R1, R7	10k $\Omega$	0207/10	1/4 W
R2, R5, R9, R11	510 $\Omega$	0207/10	1/4 W
R3, R10	220 $\Omega$	0207/10	1/4 W
R6, R8	680 $\Omega$	0207/10	1/4 W
R4, R12	2 $\Omega$	0207/10	0,6 W
R13	1k $\Omega$	0207/10	1/4 W
R14, R15	4,7k $\Omega$	0207/10	1/4 W
R16, R17	10 $\Omega$	0207/10	1/4 W
Q1, Q2	J106	TO92	-
Q3	2N3906	TO92	-
T1	2N3904	TO92	-
IC1, IC2	BUF634	DIL08	-
IC4	OPA1612	DIL08	-
RPOT ALPS	10k $\Omega$	RK0971221Z05	-

Tabulka 2: BOM

Při osazování desky byla zjištěna chyba v layoutu. Konkrétně se jednalo o model tranzistoru v programu Eagle, který měl rozdílné uspořádání báze, kolektoru a emitoru. Díky využití THT součástek byl tento problém vyřešen jednoduše pootočením součástky a úpravou tvaru vývodů. Součástka tak byla zapájena přímo do DPS bez nutnosti složitějších úprav.



Obr. 4.9 osazená DPS

Zesilovač je napájen pomocí adaptéru s napětím 12 V a výstupním proudem 1 A, což je z hlediska výkonu naprosto dostačující. Osazená a otestovaná deska byla umístěna do již výše zmíněné hliníkové krabičky viz. Obr. 4.7., na kterou byly umístěny ovládací prvky jako například přepínač na zesílení nebo kolečko potenciometru, který zároveň plní funkci vypínače. Dále vstupní a výstupní 3,5 mm jack konektor pro vstup a výstup audio signálu. Napájecí konektor a v neposlední řadě stavová LED dioda indikující zapnutí. Finální podoba zesilovače jeho předního a zadního panelu je na Obr. 4.1010 a Obr. 4.1111.



Obr. 4.10 Přední panel zesilovače



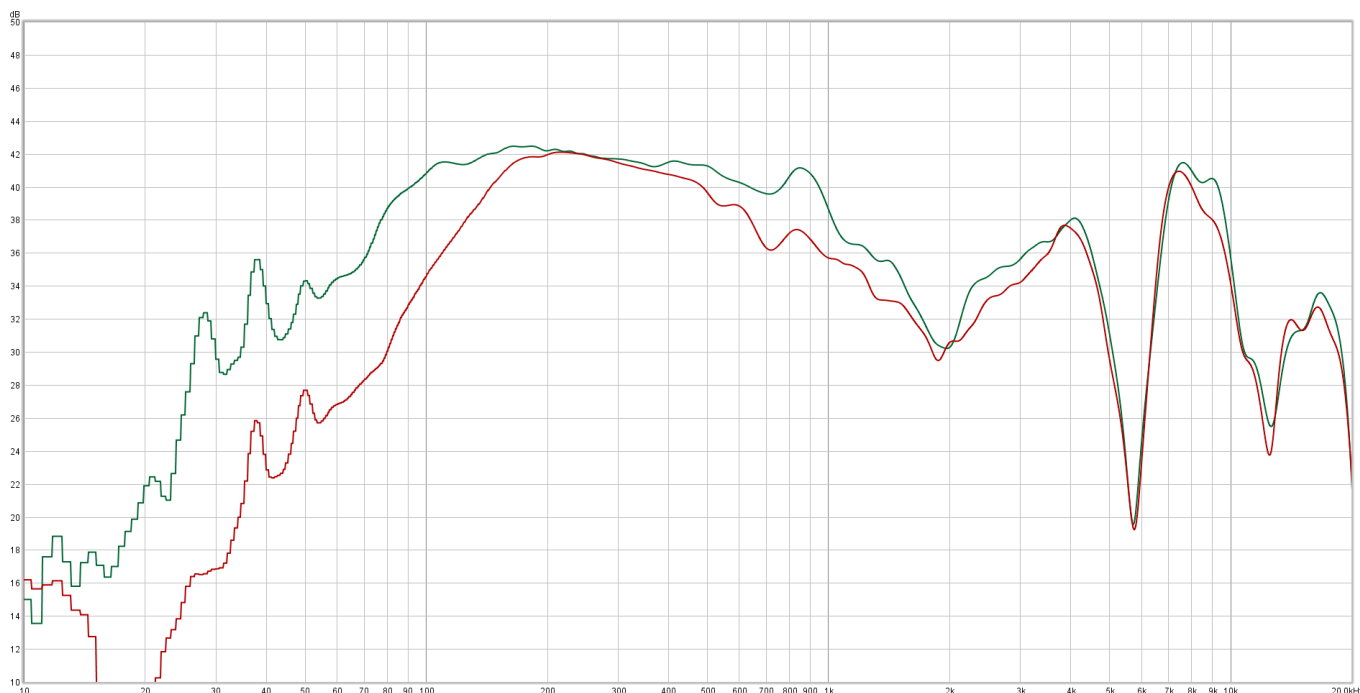
Obr. 4.11 Zadní panel zesilovače

## 5 Měření sluchátek a zesilovače

Tato kapitola se věnuje měření vyrobených sluchátek a zesilovače. Jsou zde uvedeny příklady výpočtů a postupy měření. Konstatování dosažených parametrů a jejich porovnání s parametry simulovanými a s parametry sluchátek a zesilovačů volně dostupných na trhu.

### 5.1 Měření sluchátek

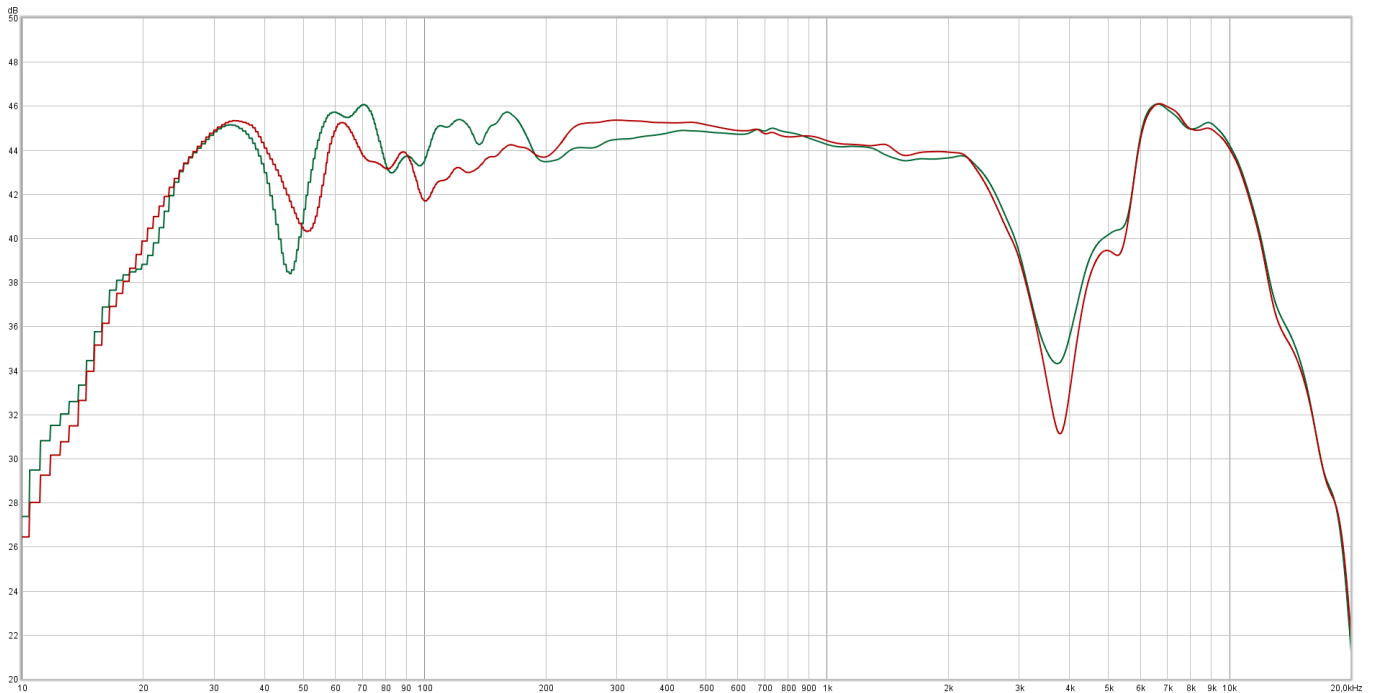
U vyrobených sluchátek byl měřena jejich frekvenční charakteristika. Tato charakteristika byla také naměřena u několika dalších typů sluchátek pro možnost srovnání výstupu a přesnější vyhodnocení kvality vyrobeného měniče. Měření probíhalo na speciálním stojanu s kalibrovaným mikrofonem. K měření byl použit software REW. Jedná se o software určený pro měření a analyzování zvuku. Tento software přímo obsahuje analýzu a vykreslení frekvenční charakteristiky zvuku snímaného mikrofonem. Pro zvukový výstup byla použita funkce „linear sweep“ zabudovaná v programu, která přehraje signál od 1 Hz do 20 kHz. Ten byl přiveden vždy do jednoho sluchátka, které bylo měřeno a snímáno pomocí mikrofonu. Do jednoho grafu byly naměřeny hodnoty levého i pravého kanálu pro možnost porovnání výstupu do levého a pravého ucha. Měření do 100 Hz může být zkresleno unikáním zvuku kolem těsnění mikrofonu nebo malý přitlakem sluchátek.



Obr. 5.1 Frekvenční charakteristika vyrobených měničů

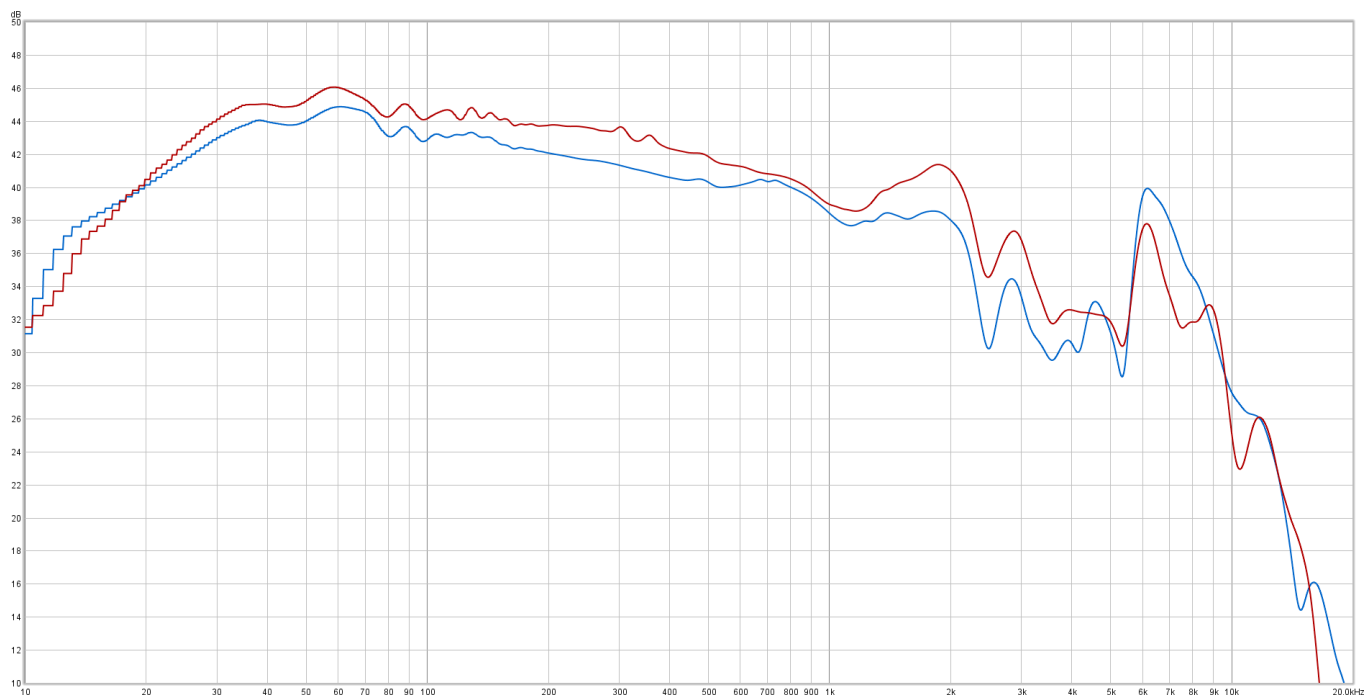


Na Obr. 5.1 lze vidět naměřenou frekvenční charakteristiku vyrobených měničů. Velikost popisků os v grafu je bohužel pevně nastavena při exportu z programu. Tento obrázek i všechny následující mají na ose x rozsah 10 Hz – 20 kHz a na ose y 10 dB – 50 dB. První informace, kterou lze s grafu vyčíst je u jednoho měniče horší podání především nízkých frekvencí. Tento defekt mohl vzniknout například přílišným napnutím této membrány.



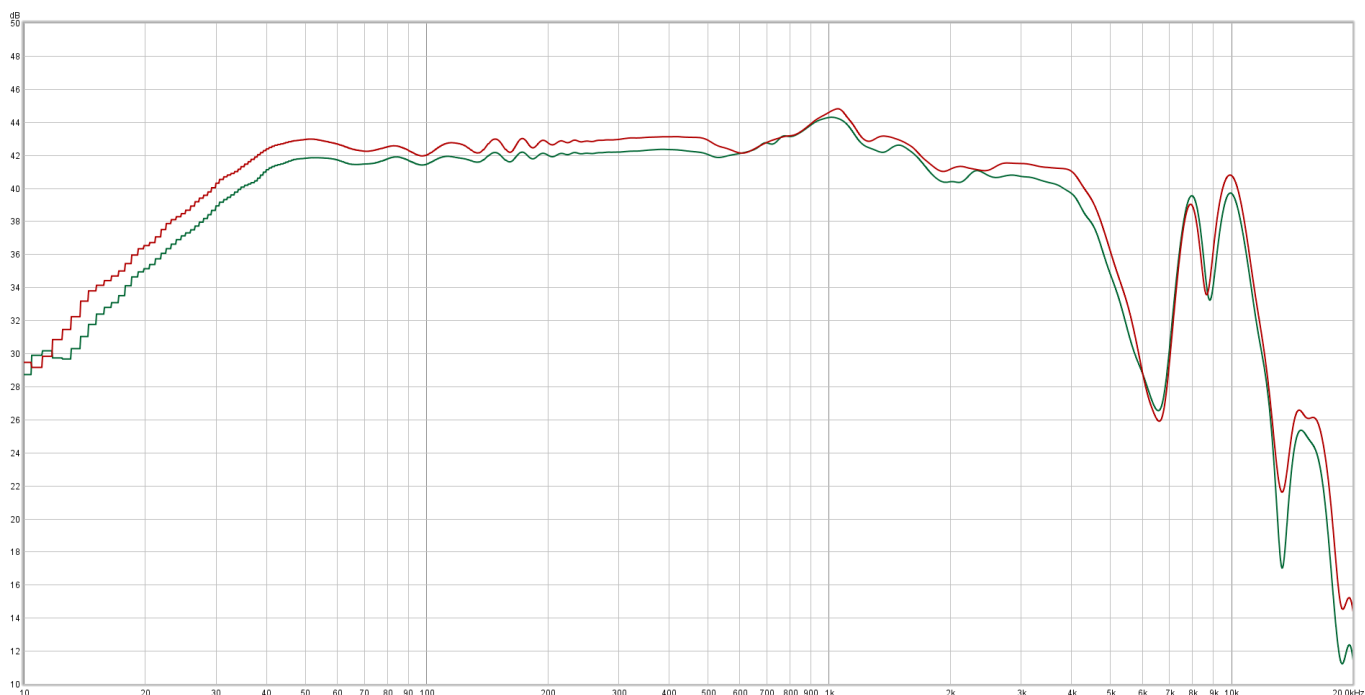
Obr. 5.2 Frekvenční charakteristika Beyerdynamic DT 770 PRO

Na Obr. 5.2 je změřená charakteristika profesionálních studiových dynamických sluchátek. Při srovnání grafů lze vidět, že sluchátka DT 770 mají hlasitější podání nízkých frekvencí. Co se týče frekvencí od 100 Hz do 2 kHz mají vyrobené měniče pokles v hlasitosti. Od 2 kHz do 4 kHz opět následuje nárůst. V pásmu vysokých frekvencí je zřetelný velký propad, který se ukázal jako normální jev pro všechna měřená sluchátka. Rozdíl byl pouze v rozsahu frekvencí, mezi kterými k tomuto propadu došlo.



Obr. 5.3 Frekvenční charakteristika Bose QC35

Dalšími měřeními sluchátky byla opět dynamická sluchátka. Nejednalo se však o profesionální studiová sluchátka, nýbrž o sluchátka zaměřená na běžného zákazníka. Jak je vidět z charakteristiky měniče použité v těchto sluchátkách mají vysokou hlasitost nízkých frekvencí. S frekvencí má jejich hlasitost však klesající charakter. Poslechově se dají ohodnotit jako „přebasovaná“ nabízející ne příliš věrohodnou reprodukci, která je však poslechově příjemná z toho vyplývá i jejich zacílení na zákaznickou základnu.



Obr. 5.4 Frekvenční charakteristika STAX SR-007MKII

Poslední měřená sluchátka disponovala elektrostatickými měniči. Jedná se o sluchátka s cenou přesahující 50 tisíc korun. Elektrostatické měniče by dle teorie měli nabídnout nejlepší reprodukci zvuku což se potvrdilo i v praxi. Vytvořené magnetoplanární měniče se kvalitativně měli pohybovat mezi dynamickými a elektrostatickými měniči. Kvůli metodě výroby však mají problémy s nízkými frekvencemi. Pokud by byla použita původně zamýšlená metoda nanesení mědi, vytvořená vrstva by byla homogenní a s podstatně nižší hmotností než měď lepená. Tato přidaná hmotnost s nejvyšší pravděpodobností zapříčinila nízkou hlasitost ve spektru do 100 Hz.

S následujícími grafy nelze posoudit reálný zvukový projev sluchátek. Záleží také na jedinci poslouchající sluchátka jedná se tak o subjektivní prožitek. S vlastní zkušenosti mohu popsat vytvořená sluchátka jako skvělá hrající. Nehodí se však na poslech hudby, kde se vyskytuje hodně nízkých frekvencí, jelikož jsou dost utlumené. V porovnání s dynamickými sluchátky nejsou tak uzavřená a nabízí větší detail ve středních a vysokých frekvencích. Rozdílné podání nízkých frekvencí mezi měniči není sluchem rozpoznatelné.



Obr. 5.5 Měřicí stojan se sluchátky

## 5.2 Měření sluchátkového zesilovače

Na sluchátkovém zesilovači byly změřeny následující parametry:

- THD (Total Harmonic Distortion)

Tento parametr byl také simulován, takže lze porovnat přesnost simulace s reálným zkrusením zesilovače. Výsledná hodnota ze simulace byla 0,0024 % hodnota naměřená na vyrobeném zesilovači byla 0,002 %. Použitý měřicí přístroj byl schopen měřit harmonické zkrusení pouze v řádu tří desetinných, tudíž nelze tvrdit, že hodnota ze simulace odpovídá přesně hodnotě změřené. Odchyłka od simulované hodnoty může být maximálně -0,0004 % až 0,0005 %. Měření probíhalo při maximální amplitudě signálu na výstupu při kmitočtu 1 kHz.

- SNR (Signal-to-Noise Ratio) a Crosstalk (přeslechy)

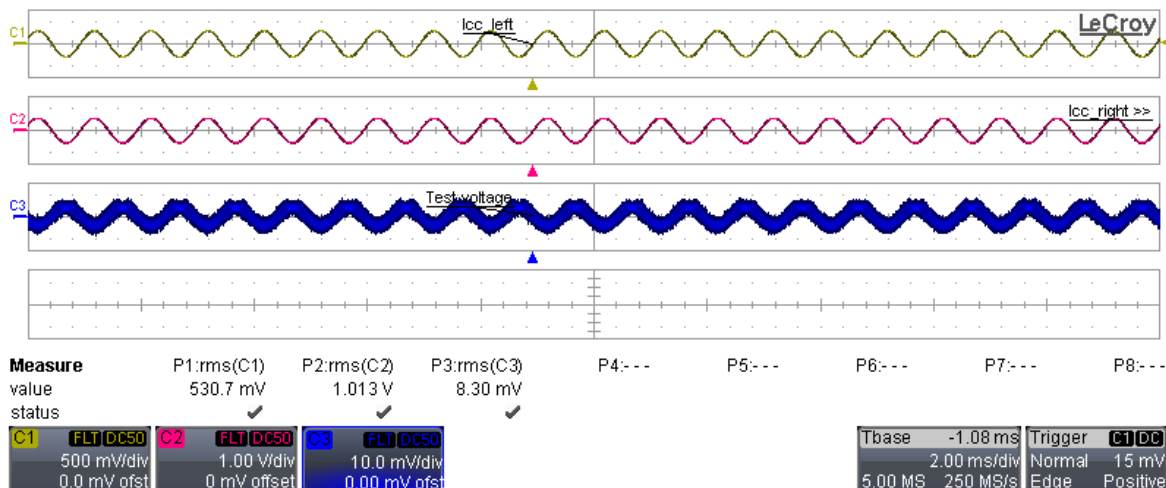
Pro měření přeslechů se vstupní sinusový signál připojí na jeden kanál zesilovače a druhý se uzemní. Následně se měří velikost napětí na výstupu uzemněného kanálu. Měření bylo provedeno pro levý i pravý kanál.

Kanál	$U_{min}$ [mV]	$U_{max}$ [mV]	SNR [dB]
Levý	8,3	1013	41,73
Pravý	5,4	1002	45,37

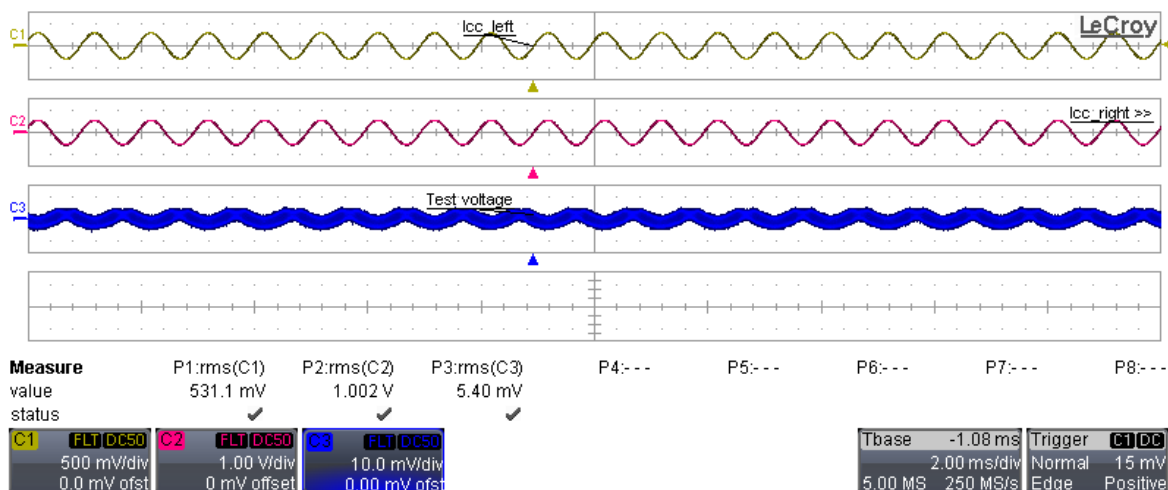
Tabulka 3: Přeslechy kanálů

$$CRS = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{max}}{U_{min}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{1013}{8,3}\right) = 41,73 [dB] \quad r. 4$$

Kde,  $U_{max}$  je amplituda výstupu kanálu s přivedeným signálem,  $U_{min}$  je hodnota napětí na výstupu uzemněného kanálu, CRS je velikost přeslechu.



Obr. 5.6 Měření CRS levý kanál



Obr. 5.7 Měření CRS pravý kanál

Šum změřený na levém kanálu je větší než na pravém. Toto může být způsobeno rozdílným vedením cest jednotlivých kanálu DPS nebo rozdílným šumem součástek v jednotlivých kanálech.

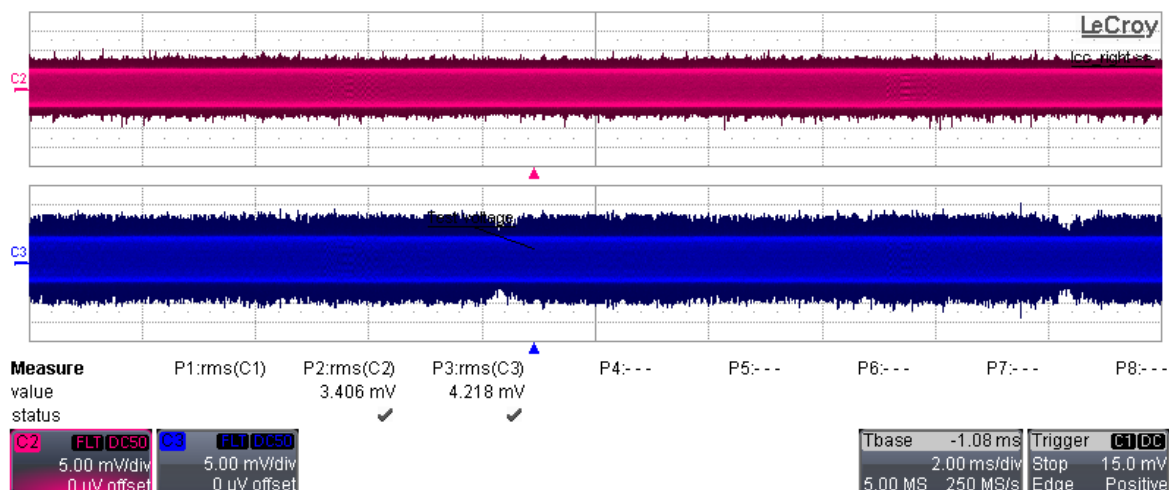
Pro měření odstupu signálu od šumu se uzemní všechny vstupy a měří se napětí na výstupu zesilovače. Měření bylo provedeno při zesílení 2 a při druhém režimu zesilovače kdy je zesílení 6.

Režim zesílení 2			
Kanál	$U_{noise}$ [mV]	$U_{max}$ [V]	SNR [dB]
Levý	3,4	10	69,37
Pravý	4,2	10	67,53
Režim zesílení 6			
Levý	2,2	10	73,15
Pravý	2,6	10	71,70

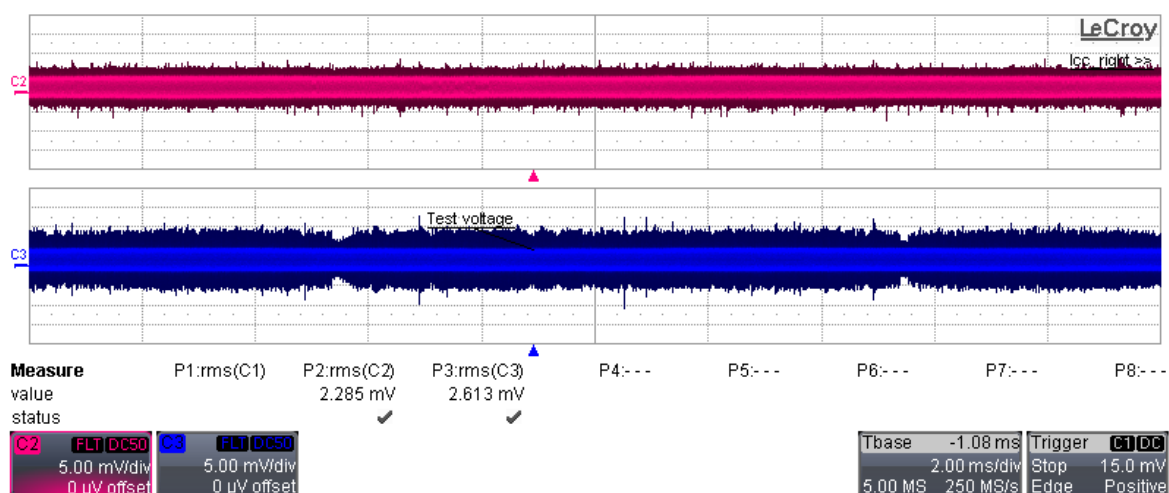
Tabulka 4: Odstup signálu od šumu

$$SNR = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{max}}{U_{noise}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{10}{3,4 \cdot 10^{-3}}\right) = 69,37 [dB] \quad r. 5$$

Kde,  $U_{max}$  je maximální amplituda výstupu zesilovače,  $U_{noise}$  je hodnota napětí na výstupu kanálů, SNR je odstup signálu od šumu.



Obr. 5.8 Měření SNR zesílení 2



Obr. 5.9 Měření SNR zesílení 6

- Slew Rate (rychlost přeběhu)

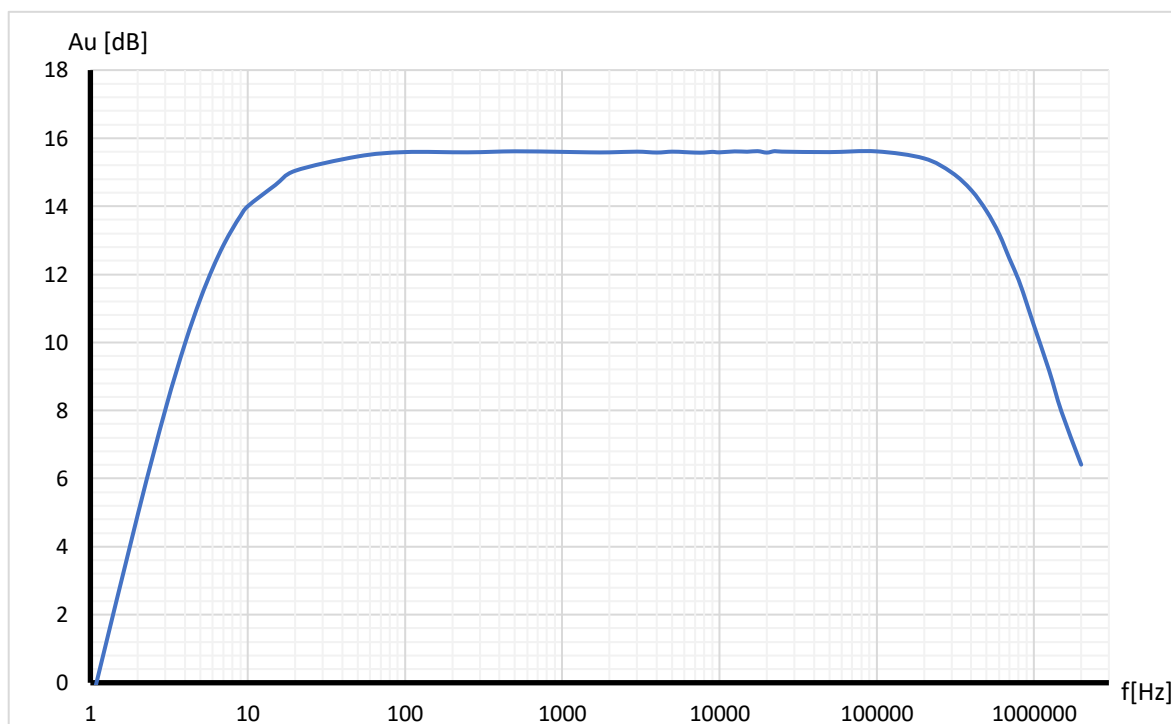
Měření rychlosti přeběhu pomohlo analyzovat, jestli je zesilovač schopen reagovat na rychlé změny ve skladbách, jak je popsáno v teoretické části. Dostačující rozsah byl stanoven mezi 2,5 - 5 V/ $\mu$ s. Odečtené hodnoty z osciloskopu byly dosazeny do rovnice.

$$SR = \frac{\delta V}{\delta t} = \frac{2,84}{0,42} = 6,76 \text{ V}/\mu\text{s} \quad r. 6$$

Výsledná rychlost přeběhu je vyšší než stanovený dostačující rozsah, tudíž zesilovač je schopen zvládnout rychlé změny v dynamicky náročných nahrávkách.

- Gain Bandwidth Product

Pomocí tohoto měření byla zjištěna šířka pásma zesilovače při definovaném zesílení. Měření probíhalo v tomto případě při maximálním zesílení zesilovače, což 6. Použité měřicí přístroje nebyly schopny změřit šířku pásma automaticky, tudíž měření bylo prováděno ručně za pomoci osciloskopu a generátoru. Změřené hodnoty byly přepočteny na zesílení v decibelech. Z vypočtených hodnot byl poté vytvořen graf závislosti zesílení na průběhu frekvence.



Obr. 5.10 Frekvenční charakteristika

Zesilovač začíná zesilovat frekvence přibližně od 15 Hz kde je zesílení cca 15,5 dB tento trend pokračuje přibližně až do 700 kHz kde je pokles zesílení už o 3 dB. Změřený frekvenční rozsah je naprosto dostačující pro audio aplikace, kde se většina skladeb pohybuje do 20 kHz a lidské ucho není schopno takto vysoké frekvence stejně rozlišit.

- Výstupní výkon a impedance

Změřený výstupní výkon byl vypočten pomocí vzorce:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{2,37^2}{32} = 176 \text{ mW} \quad r. 7$$

Kde P je výkon,  $V^2$  je napětí na výstupu zesilovače změřené na prázdko bez zátěže a R je odpor zátěže. Maximální výstupní výkon zesilovače je 176 mW do sluchátek s 32  $\Omega$  měniči.

Výstupní impedance zesilovače byla vypočtena pomocí vzorce:

$$Z_o = \frac{R_z(V-V_z)}{V_z} = \frac{100(2,37-2,28)}{2,28} = 3,95 \Omega \quad r. 8$$

Kde  $Z_o$  je výstupní impedance,  $R_z$  je odpor zvolené zátěže, V je napětí na prázdko a  $V_z$  je napětí na zátěži. Všechna měření byla prováděna při maximálním zesílení zesilovače a při frekvenci vstupního signálu 1 kHz.

### 5.3 Měřicí přístroje

Pro měření frekvenční charakteristiky sluchátek bylo použito:

- Lexicon Omega (zvuková karta) [23]
  - 24bitový A/D převodník
  - Vstupní impedance 600  $\Omega$  pro mikrofonový vstup
  - THD+N <0,005 % pro šířku pásma 20 Hz až 20 kHz
- PUI Audio mikrofon
- PC s měřícím softwarem REW

Pro měření parametrů zesilovače bylo použito:

- Funkční generátor Yokogawa FG300 [24]
  - Výstupní impedance 50  $\Omega$
  - Maximální chyba amplitudy  $\pm 0,8$  % nastavení + 14 mV<sub>rms</sub>
  - Maximální chyba frekvence  $\pm 0,002$  %



- Osciloskop LeCroy 64MXi-A [25]
  - Vstupní impedance 1 M $\Omega$  a 0,9 pF
  - Přesnost  $\pm 1,5$  % z celého rozsahu až do 10 mV/div
- Osciloskop Rohde & Schwarz RTO2014 [26]
  - Vstupní impedance 1 M $\Omega$
- Osciloskop Hantek DSO5102P [27]
  - Vstupní impedance 1 M $\Omega$  a 20 pF
  - Přesnost  $\pm 3$  % pro 5 V/div až do 10 mV/div
- Multimetr Elecall EM15A

## ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala problematikou elektroakustických měničů, sluchátkovými zesilovači a jejich vlastnostmi. Dále také návrhem sluchátek, magnetoplanárního měniče se sluchátkovým zesilovačem a jejich realizací.

Počátek je věnován různým typům elektroakustických měničů. Je zde popsána jejich konstrukce a hlavní výhody a nevýhody. Z toho se dále odvíjí jejich použití v různých typech zařízení.

Dále pak pojednává o sluchátkových zesilovačích a obecně o pracovních třídách zesilovačů. Jsou zde porovnány jejich provozní vlastnosti a typy použití. Dále jsou v této kapitole popsány některé nejdůležitější parametry a vlastnosti, které hrají roli u sluchátkových zesilovačů.

Poté je popsán návrh konstrukce a výroba samotného těla sluchátek. Dále návrh magnetoplanárního měniče pro tyto sluchátka. Popis materiálů vhodných na výrobu membrány a nastínění její výroby. S membránou související motiv, který na ní bude vyleptán a výpočet jeho impedance. Poslední částí této kapitoly je volba zesilovače a ukázka zapojení s první simulací zkruslení.

V praktické části je popsána skutečná výroba jednotlivých komponent sluchátek, měniče a také zesilovače, kde největší výzvou se ukázala být výroba membrány pro měnič v domácích podmínkách. Výsledné membrány jsou plně funkční mají však značný potenciál pro vylepšení. Výroba těla sluchátek pomocí 3D tisku se ukázala jako vhodná metoda, především díky možnosti jednoduchých úprav dílu a opětovnému rychlému vytištění.

Finální částí diplomové práce je měření frekvenční charakteristiky sluchátek, porovnání naměřených výsledků s jinými konvenčně vyráběnými sluchátky a celkovým zhodnocením jejich zvukového projevu. Dále pak také měření parametrů zesilovače a vyhodnocením, zda bylo dosaženo očekávaných a požadovaných výsledků.

Bylo dosaženo požadovaných výsledků, což byla výroba magnetoplanárního měniče jeho integrace do sluchátek a k tomu příslušný sluchátkový zesilovač. Nejvýraznější prostor pro zlepšení je u měniče. Jiný způsob nanášení mědi například naprašováním by značně snížil hmotnost měniče a pomohl zlepšit akustický projev v nízkých frekvencích. Vrstva by byla také více homogenní a lépe by se s ní pracovalo.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

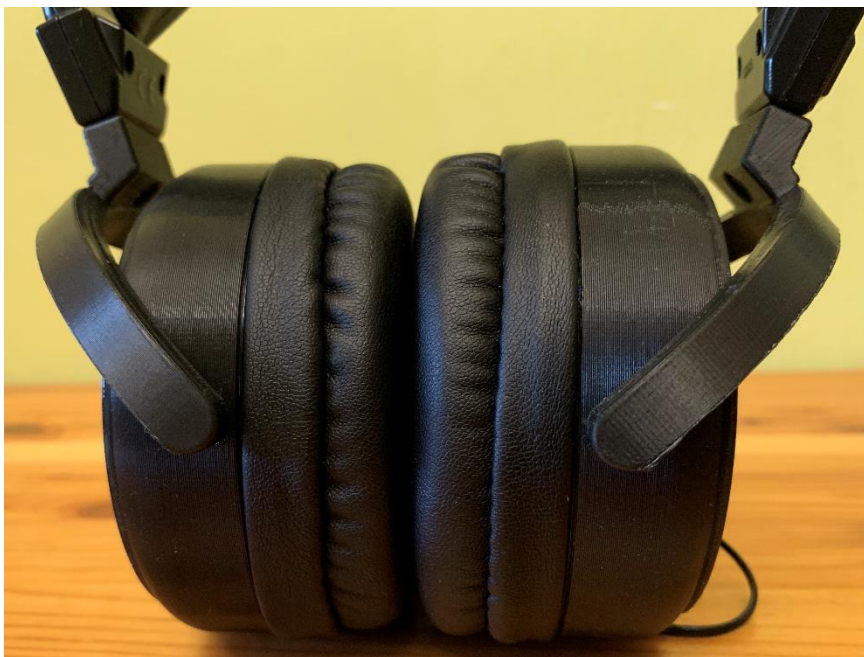
- [1] 5 Types Of Headphone Drivers That You Should Know [online]. [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: <https://www.headphonesty.com/2017/04/5-types-headphone-drivers-know/>
- [2] Speaker-construction [online]. [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: <https://www.audioaffair.co.uk/blog/the-difference-between-standard-tweeters-and-ribbon-tweeters/speaker-construction/>
- [3] Balanced Armature Driver Illustration [online]. [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: [https://www.innerfidelity.com/images/Headphone101\\_BalancedArmature\\_Illustration\\_BADriverInside.jpg](https://www.innerfidelity.com/images/Headphone101_BalancedArmature_Illustration_BADriverInside.jpg)
- [4] Elektrostatické reproduktory [online]. [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: <http://noel.feld.cvut.cz/vyu/a2b31hpm/index.php/Uživatel:Touseada>
- [5] Elektroakustická zařízení [online]. [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <https://www.roznovskastredni.cz/~fuchs/download/Akustika.pdf>
- [6] Piezoelektrický měnič [online]. [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <http://www.jtarchitekt.cz/obrazky/piezo.png>
- [7] Uhlíkový mikrofon [online]. [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Uhl%C3%ADkov%C3%BD\\_mikrofon.svg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Uhl%C3%ADkov%C3%BD_mikrofon.svg)
- [8] Magnetostrikční měnič [online]. [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: <https://techblog.ctgclean.com/2012/01/ultrasonics-transducers-magnetostrictive-hardware/>
- [9] BORWICK, John. *Loudspeaker and Headphone Handbook*. 3rd Edition. New York: Routledge, 2001. ISBN 9780080496177.
- [10] Electrostatic driver. Mellowacoustics [online]. [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <http://www.mellowacoustics.com/images/FrontRo3-image1.png>
- [11] Magnetoplanar headphones [online]. [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: [https://c1.iggcdn.com/indiegogo-media-prod-cld/image/upload/c\\_limit,w\\_695/v1530906128/r72sjgbmzlioqdsllzjz.png](https://c1.iggcdn.com/indiegogo-media-prod-cld/image/upload/c_limit,w_695/v1530906128/r72sjgbmzlioqdsllzjz.png)
- [12] Op Amp Measurements [online]. 2011 [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <http://nwavguy.blogspot.com/2011/08/op-amp-measurements.html>
- [13] Wikiwand [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: [https://www.wikiwand.com/en/Gain%E2%80%93bandwidth\\_product](https://www.wikiwand.com/en/Gain%E2%80%93bandwidth_product)
- [14] Negative feedback [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: [https://www.st-andrews.ac.uk/~www\\_pa/Scots\\_Guide/audio/part4/page3.html](https://www.st-andrews.ac.uk/~www_pa/Scots_Guide/audio/part4/page3.html)
- [15] Cambridge audio [online]. [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://www.cambridgeaudio.com/en/blog/amplifier-specifications>

- [16] MateriálPRO 3D [online]. [cit. 2019-12-11]. Dostupné z:  
[https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/?gclid=CjwKCAiAxMLvBRBNEiwAKhr-nCDZ95xGBSy2\\_yxLbs0AAm6YTsZadWt50uhObK\\_Fr4gPeCmzVfk5qRoCQ60QAvD\\_BwE](https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/?gclid=CjwKCAiAxMLvBRBNEiwAKhr-nCDZ95xGBSy2_yxLbs0AAm6YTsZadWt50uhObK_Fr4gPeCmzVfk5qRoCQ60QAvD_BwE)
- [17] Innerfidelity [online]. [cit. 2019-12-13]. Dostupné z:  
[https://www.innerfidelity.com/images/Headphone101\\_PlanarMagneticDrivers\\_Diagram\\_OtherDriverCircuits.jpg](https://www.innerfidelity.com/images/Headphone101_PlanarMagneticDrivers_Diagram_OtherDriverCircuits.jpg)
- [18] Audeze technology [online]. [cit. 2019-12-13]. Dostupné z:  
<https://www.audeze.com/blogs/technology-and-innovation/fluxor-magnets>
- [19] Classifications of Amplifiers using Letters [online]. [cit. 2019-12-16]. Dostupné z:  
<https://circuitdigest.com/tutorial/classes-of-power-amplifier-explained>
- [20] Třídy zesilovačů [online]. [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://audio-diy.rdacoustic.cz/audio-diy-blog/tridy-zesilovacu/>
- [21] Headphone Amps [online]. [cit. 2019-12-16]. Dostupné z:  
<http://nwavguy.blogspot.com/2011/02/gain-and-headphone-ampsdacs.html>
- [22] Creality. Creality [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z:  
<https://www.creality.com/ender-3-3d-printer-p00244p1.html>
- [23] Lexicon Omega [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z:  
[http://www.avc.hr/salesprogram/files/db\\_files/files/lexicon-um-omega-studio-series.pdf](http://www.avc.hr/salesprogram/files/db_files/files/lexicon-um-omega-studio-series.pdf)
- [24] Funkční generátor Yokogawa FG300 [online]. Yokogawa, 2011 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: [https://cdn.tmi.yokogawa.com/files/uploaded/fg200spec\\_1.pdf](https://cdn.tmi.yokogawa.com/files/uploaded/fg200spec_1.pdf)
- [25] Osciloskop LeCroy 64MXi-A [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z:  
<http://www.testequipmenthq.com/datasheets/LECROY-WAVERUNNER%2064MXI-A-Datasheet.pdf>
- [26] Osciloskop Rohde & Schwarz RTO2014 [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z:  
[https://www.rohde-schwarz.com/webhelp/RTO\\_HTML\\_UserManual\\_en/RTO\\_HTML\\_UserManual\\_en.htm](https://www.rohde-schwarz.com/webhelp/RTO_HTML_UserManual_en/RTO_HTML_UserManual_en.htm)
- [27] Osciloskop Hantek DSO5102P [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z:  
[http://www.hantek.com/en/productdetail\\_96.html](http://www.hantek.com/en/productdetail_96.html)

## A. PŘÍLOHY



Obr. 6.1 Finální podoba sluchátek a zesilovače



Obr. 6.2 Detailní pohled na sluchátka z přední strany



Obr. 6.3 Detailní pohled na sluchátka z boční strany