

# STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 9.

## Reproduktor vytištěný na 3D tiskárně



Vít Vecheta

Kraj Vysočina

Třebíč 2019

# STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 9.

## Reproduktor vytištěný na 3D tiskárně

### 3D printed speaker

**Autor:** Vít Vecheta

**Sponzor:** Jaroslav Vecheta

**Škola:** Katolické gymnázium Třebíč, Otmarova 22, 67401 Třebíč

**Kraj:** Kraj Vysočina

**Konzultanti:** Ing. Lukáš Semerád

Petra Jordánová

Marek Kostka

Třebíč 2019

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Třebíči .....

Vít Vecheta

## **Anotace**

Tato práce se zabývá návrhem a výrobou reproduktoru s využitím technologie 3D tisku. Obsahuje obecnou teorii zvuku a návrhu reproduktorů. Jsou v ní rozebírány i elektronické prvky reproduktoru.

## **Klíčová slova**

Reproduktor; návrh; frekvenční výhybka; ozvučnice; zesilovač, 3D tisk.

## **Annotation**

This work deals with designing and making of a speaker. It describes the process of speaker design and contains general theory of sound and speaker design.

## **Keywords**

Loudspeaker; design; frequency crossover; cabinet; amplifier; 3D print.

# Obsah

|                   |          |
|-------------------|----------|
| <b>Úvod .....</b> | <b>8</b> |
|-------------------|----------|

|                               |          |
|-------------------------------|----------|
| <b>1 Teoretická část.....</b> | <b>9</b> |
|-------------------------------|----------|

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| 1.1 Zvuk a lidské ucho.....                        | 9  |
| 1.2 Akustický prostor .....                        | 11 |
| 1.3 Elektoroakustické měniče a jejich dělení ..... | 12 |
| 1.4 Parametry reproduktoru .....                   | 15 |
| 1.5 Ozvučnice .....                                | 22 |
| 1.6 Reproduktorové výhybky .....                   | 26 |

|                                            |           |
|--------------------------------------------|-----------|
| <b>2 Návrh a výroba reproduktoru .....</b> | <b>29</b> |
|--------------------------------------------|-----------|

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| 2.1 Základní požadavky na reproduktor .....  | 29 |
| 2.2 Výběr reproduktoru .....                 | 29 |
| 2.3 Výpočet ozvučnice .....                  | 33 |
| 2.4 Mechanická konstrukce reproduktoru ..... | 34 |
| 2.5 Návrh výhybky .....                      | 39 |
| 2.6 Elektronika.....                         | 42 |
| 2.7 Ovládání.....                            | 47 |

|                     |           |
|---------------------|-----------|
| <b>3 Závěr.....</b> | <b>48</b> |
|---------------------|-----------|

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| <b>4 Bibliografie.....</b> | <b>50</b> |
|----------------------------|-----------|

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| <b>5 Seznam příloh.....</b> | <b>53</b> |
|-----------------------------|-----------|

# Seznam obrázků

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1.1: Ilustrace vzniku zvuku [1].                           | 9  |
| Tab. 1: Vlnové délky pro různé frekvence.                       | 10 |
| Tab. 2: Přibližné hodnoty SPL pro různá místa [1].              | 10 |
| Obr. 1.2: Fletcher- Monsonova křivka [27].                      | 11 |
| Obr. 1.3: Závislost SPL na vzdálenosti od zdroje [1].           | 11 |
| Obr. 1.4: Basový reproduktor.                                   | 13 |
| Obr. 1.5: Středotónový reproduktor s kuželovou membránou.       | 13 |
| Obr. 1.7: Výškový reproduktor s kalotovou membránou.            | 13 |
| Obr. 1.8: Řez reproduktorem [26].                               | 14 |
| Obr. 1.9: Řez kalotovým reproduktorem [28].                     | 14 |
| Obr. 1.10: Princip činnosti piezoelektrického reproduktoru [1]. | 15 |
| Obr. 1.11: Tlakový reproduktor [1].                             | 15 |
| Obr. 1.12: Příklad zobrazení směrové charakteristiky [1].       | 16 |
| Obr. 1.13: Směrová charakteristika nad reproduktorem [1].       | 16 |
| Obr. 1.14: Frekvenční charakteristika [1].                      | 17 |
| Obr. 1.15: Analogie reproduktoru a pružiny [1].                 | 17 |
| Obr. 1.16: Impedanční charakteristika [1].                      | 18 |
| Obr. 1.17: Impulzní odezvy při různých hodnotách $Q$ [1].       | 19 |
| Obr. 1.18: Cívka v magnetickém poli [1].                        | 21 |
| Obr. 1.19: Rovinná deska [1].                                   | 23 |
| Obr. 1.20: Otevřená ozvučnice [1].                              | 23 |
| Obr. 1.21: Znázornění zvýšení rezonance [1].                    | 24 |
| Obr. 1.22: Pružinová analogie uzavřené ozvučnice [1].           | 24 |
| Obr. 1.23: Pružinová analogie bassreflexové ozvučnice [1].      | 25 |
| Obr. 1.24: Skládání SPL bassreflexu a měniče [1].               | 25 |
| Obr. 1.25: Ozvučnice s pasivním zářičem [1].                    | 26 |
| Obr. 1.26: Transmission line ozvučnice [1].                     | 26 |
| Obr. 1.27: Znázornění přechodu mezi propustmi [1].              | 27 |
| Obr. 1.28: Vyrovnání citlivosti [1].                            | 28 |
| Obr. 1.29: RC člen [1].                                         | 28 |
| Obr. 2.1: Reálná fotka reproduktoru [24].                       | 30 |
| Obr. 2.2: Počítačový návrh reproduktoru [9].                    | 30 |
| Tab. 3: Parametry basového reproduktoru [6].                    | 31 |
| Obr. 2.3: Monacor SPH-75/8 [6].                                 | 31 |
| Obr. 2.4: SPH-75/8 výkres [6].                                  | 31 |
| Obr. 2.5: Impedanční a SPL charakteristiky pro SPH-75/8 [6].    | 31 |
| Obr. 2.6: Impedanční a SPL charakteristika pro DT-25N [7].      | 32 |
| Obr. 2.7: Monacor DT-25N [7].                                   | 32 |
| Obr. 2.8: DT-25N [7].                                           | 32 |
| Obr. 2.9: 3D tiskárna Rebelix.                                  | 34 |
| Tab. 5: Základní parametry ozvučnice.                           | 35 |

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| Obr. 2.10: Tisk dílů.                               | 35 |
| Obr. 2.11: Vrchní část.                             | 35 |
| Obr. 2.12: Uložení basového reproduktoru.           | 36 |
| Obr. 2.13: Tlumení basové ozvučnice.                | 36 |
| Obr. 2.14: Mřížka.                                  | 37 |
| Obr. 2.15: Uložení výškového reproduktoru.          | 37 |
| Obr. 2.16: Spodní část.                             | 37 |
| Obr. 2.17: Tmelení.                                 | 38 |
| Obr. 2.18: Schéma výhybky.                          | 41 |
| Obr. 2.19: Deska výhybky- spoje.                    | 41 |
| Obr. 2.20: Deska výhybky.                           | 41 |
| Tab. 6: Parametry zesilovače [15].                  | 42 |
| Obr. 2.21: Diagram elektroniky [25].                | 42 |
| Obr. 2.22: Panasonic NCR18650 [29].                 | 43 |
| Obr. 2.23: Boost converter [32].                    | 44 |
| Obr. 2.24: Bluetooth modul [20].                    | 44 |
| Obr. 2.25: Programovací prostředí Bluetooth modulu. | 45 |
| Obr. 2.26: Chladič V5583G [31].                     | 45 |
| Obr. 2.27: CSR SPI converter [30].                  | 45 |
| Obr. 2.28: Deska baterie.                           | 46 |
| Obr. 2.29: Deska baterie- spoje.                    | 46 |
| Obr. 2.30: Hlavní deska.                            | 46 |
| Obr. 2.31: Hlavní deska- spoje.                     | 46 |
| Obr. 2.32: Spojení desek.                           | 47 |
| Obr. 3.1: Výsledný produkt [24].                    | 49 |

# ÚVOD

Téma této seminární práce jsem vybral, protože se reproduktorům věnuji již delší dobu. Velmi mě zajímá technologie jejich výroby a akustické vlastnosti. Obzvláště zajímavé mi připadá využití 3D tisku při výrobě konstrukce. Vždy mě fascinovaly reproduktory známých značek, které i přes malou velikost dokážou vytvořit mohutný a kvalitní zvukový projev. Úvodním impulzem pro tuto práci byla snaha se těmto reproduktorům vyrovnat. Další motivací pro tuto práci je, že výsledkem není pouze graf, ale právě funkční reproduktor. Hmatatelný výsledek práce, na které jsem pracoval téměř rok, je pro mě velkou motivací k dalším projektům.

V první části můžete prohloubit své znalosti v základní teorii zvuku. Dozvíte se o akustickém prostoru, elektroakustických měničích, ozvučnicích a výhybkách. V druhé části je rozebírána moje vlastní konstrukce reproduktoru. V příloze je poté přiložena technická dokumentace.

Přečtení této práce bych doporučil všem zvědavým lidem, kteří chtějí lépe pochopit fungování reproduktorů.

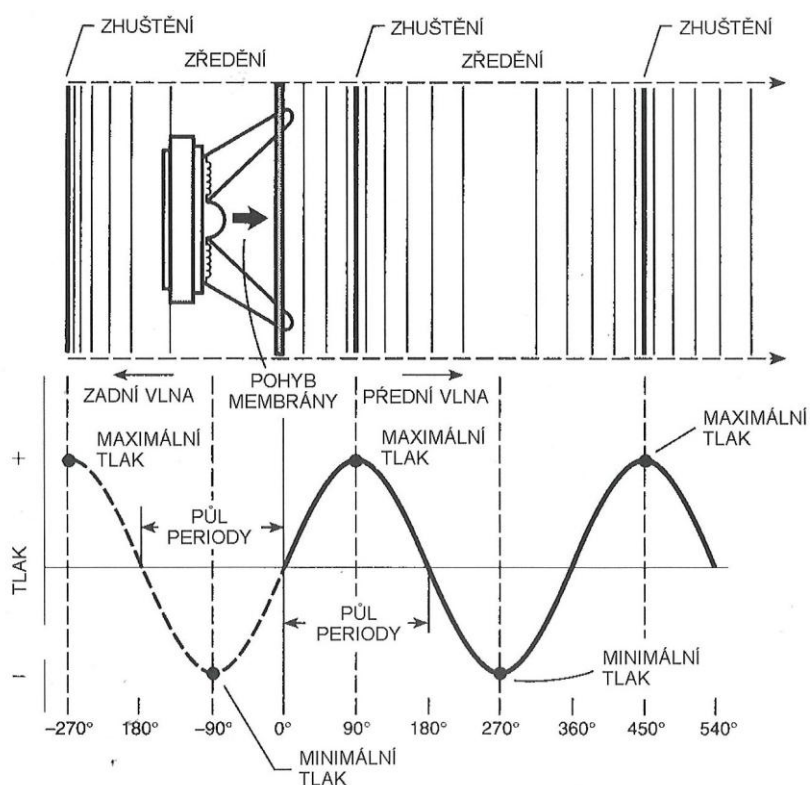


# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 ZVUK A LIDSKÉ UCHO

### Zvuk

Postupné podélné mechanické vlnění. Pro šíření zvuku je potřeba látkové prostředí. Lidské ucho vyhodnocuje změny tlaku způsobené vlněním. Tyto změny nazýváme akustickým tlakem. Zvuk způsobí kmitání tělesa v látkovém prostředí. Pokud je toto kmitání periodické hovoříme o tónu. Zvuk vyvolává například kmitání membrány reproduktoru [1]. Zvukem se zabývá vědní obor akustika, zkoumá jeho vznik, šíření a vnímání.



Obr. 1.1: Ilustrace vzniku zvuku [1].

### Vlnová délka

Označení vzdálenosti dvou nejbližších bodů postupného periodického vlnění, které kmitají ve fázi. Značí se  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad [m]$$

### Akustický tlak

Změna tlaku vůči atmosférickému tlaku. Značí se  $p$ . Více se je využívána hladina akustického tlaku. [1]

## Akustický výkon

Jde o výkon, který je reproduktor schopný předat vzduchu ve formě zvukové vlny. Značí se  $P_a$ . [1]

## Hladina akustického tlaku

Používá se anglická zkratka SPL<sup>1</sup>. Jednotkou je decibel.

V akustice je velice využívána.

$$SPL = 20 \log \frac{p}{p_0^2} \quad [dB]$$

| Frekvence<br>[Hz] | Délka vlny<br>[m] |
|-------------------|-------------------|
| 10                | 34,4              |
| 80                | 4,3               |
| 100               | 3,44              |
| 400               | 0,86              |
| 800               | 0,43              |
| 1000              | 0,34              |

Tab. 1: Vlnové délky pro různé frekvence.

| Zdroj              | SPL [dB] |
|--------------------|----------|
| Práh slyšitelnosti | 0        |
| Šum ve studiu      | 25       |
| Běžná řeč          | 60       |
| Domácí reprodukce, | 80       |
| Diskotéka, koncert | 100      |

Tab. 2: Přibližné hodnoty SPL pro různá místa [1].

---

<sup>1</sup> Sound pressure level

<sup>2</sup> Odpovídá hodnotě 20 μPa (1)

## Lidské vnímání zvuku

Vnímáme jen určitý rozsah frekvence a akustického tlaku. Běžně se udává hodnota 20-20 kHz a 0<sup>3</sup>-130 dB. Lidské ucho je také frekvenčně závislé a nelineární. Na některé frekvence je citlivější a vnímá je hlasitěji. Jako první tuto závislost znázorňovala Fletcher- Monsonova křivka. Dnes se používá novější norma ISO 226. Tato křivka se používá u fyziologické regulace hlasitosti reproduktoru. [1] [2]

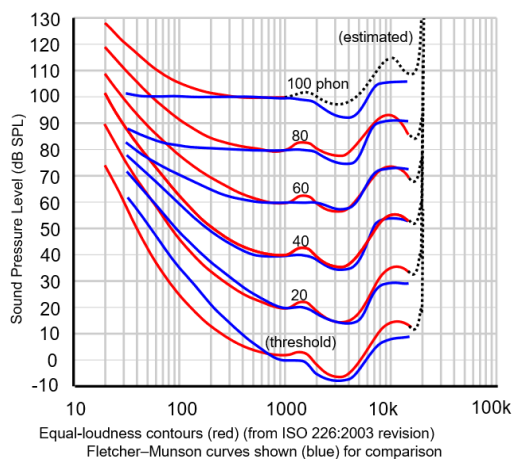
## 1.2 AKUSTICKÝ PROSTOR

### Vliv vzdálenosti od zdroje signálu

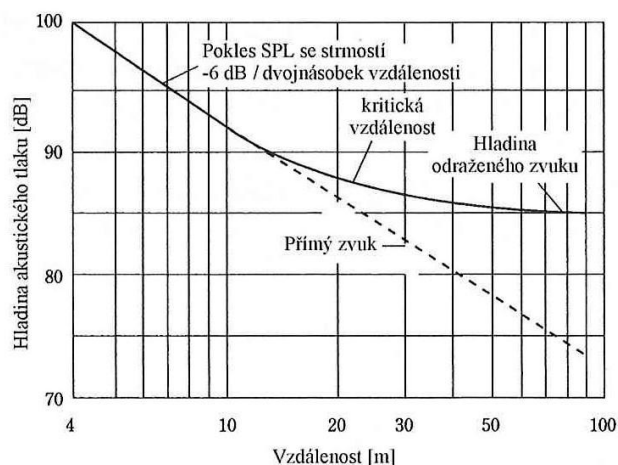
Mezi zdrojem signálu a naším uchem se nachází akustický prostor. Akustický tlak klesá se čtvercem vzdálenosti. To znamená 6 dB na každý dvojnásobek vzdálenosti. Přestává platit pro větší kmitočty (zde ještě větší a nelineární pokles). [1]

### Poloměr doznívání

Vzdálenost, ve které se SPL ustálí na hodnotě odraženého zvuku. Díky poloměru doznívání se v určité vzdálenosti od zdroje přestane hladina akustického tlaku měnit. Je to způsobeno odrazem zvukových vln od stěn místnosti. V menší místnosti je menší poloměr doznívání. Proto reproduktor v malé místnosti hraje hlasitěji než ve velké, i když jsme od něj stejně daleko. [1]



Obr. 1.2: Fletcher- Monsonova křivka [27].



Obr. 1.3: Závislost SPL na vzdálenosti od zdroje [1].

<sup>3</sup> Odpovídá hodnotě 20  $\mu$ Pa (1)

### **Odraz vlnění**

Při dopadu zvukové vlny na rozmezí dvou prostředí dochází k odrazu. Úhel dopadu se rovná úhlu odrazu. [1]

### **Difrakce**

Ohyb vlnění, který nastává po dopadu na překážku. Za touto překážkou se vlnění nešíří přímočaře. Ohyb je přímo úměrný vlnové délce. [1]

### **Střední doba dozvuku**

Doba trvání ozvěny po vypnutí zdroje signálu. Doba trvání ozvěny se určuje poklesem SPL o 60 dB. V běžných místnostech domu se pohybuje okolo 300 ms. V kostelech se setkáme i s řády sekund. [1]

## **1.3 ELEKTROAKUSTICKÉ MĚNIČE A JEJICH DĚLENÍ**

Elektroakustický měnič (reproduktor) je zařízení, které mění elektrickou energii na akustickou. Jeho výběr je jednou z nejdůležitějších částí stavby reproduktoru. Reproductory nemají frekvenčně nezávislou a vyrovnanou SPL charakteristiku. Dělení:

### **Podle frekvenčního rozsahu**

Neexistuje reproduktor, který by dostatečně kvalitně zahrál frekvenční pásmo lidského slyšení. Proto se používají reproduktory pro různé části tohoto pásma. A vznikají vícepásmové reproduktory.

#### **Širokopásmové**

Jsou určeny pro přenos co největšího frekvenčního pásma. Používají se hlavně v automobilovém ozvučení, stropních reproduktorech a v přenosných reproduktorech. Jejich výhodou je, že nemusí používat výhybku. Nereprodukuje však velmi hluboké nebo naopak velmi vysoké frekvence.

#### **Hlubokotónové**

Přenáší nižší frekvence. Obvykle 20 – 3500 Hz. Mívají větší průměr membrány. Reproduktor s větším průměrem obvykle vyžaduje větší objem ozvučnice. Zvládnou však reprodukovat nižší frekvence. Reproductory s menším průměrem naopak lépe přenáší střední a vyšší frekvence a nepotřebují tak velký objem.

### Středotónové

Pro reprodukci asi od 500 Hz do 4000 Hz. Používají se ve třípásmových reprosoustavách. Bývají nejvíce zatížené. Vyrábí se s kuželovou i kalotovou membránou.

### Vysokotónové

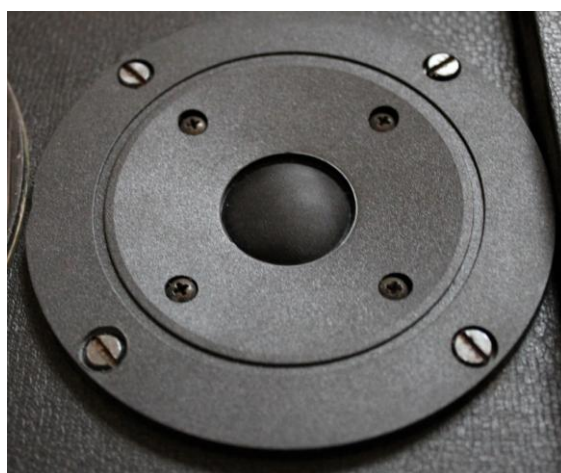
Pásmo jejich reprodukce je vyšší než 3 kHz. Vyrábí se kuželové, kalotové, piezoelektrické, tlakové a elektrostatické typy. Mají velkou citlivost oproti ostatním reproduktorům. Profesionální soustavy požívají většinou tlakové typy. Jsou náchylné na spálení nízkými kmitočty. Více se u nich zabýváme směrovostí vyzařování. [1]



Obr. 1.4: Basový reproduktor.



Obr. 1.5: Středotónový reproduktor s kuželovou membránou.



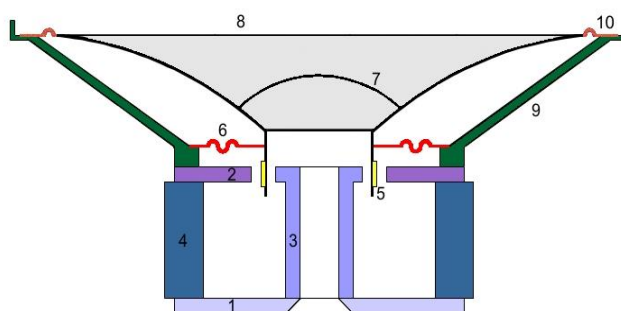
Obr. 1.6: Výškový reproduktor s kalotovou membránou.

## Podle principu činnosti

### Elektromagnetický s kuželovou membránou

Reproduktor má kuželovou membránu, která pístovým pohybem způsobuje změny tlaku. Pístový pohyb je vyvolán kmitací cívkou, která je pevně spojena s membránou reproduktoru. Membrána je připevněna pružným závěsem ke koši reproduktoru. Koš je spojen s pevným magnetem. Cívka se díky průchodu střídavého proudu přitahuje nebo odpuzuje od tohoto magnetu. Pohyb membrány způsobí zvukovou vlnu. [1]

- 1) zadní deska
- 2) horní deska
- 3) pólový nástavec
- 4) magnet
- 5) kmitací cívka
- 6) středící membrána
- 7) prachovka
- 8) membrána
- 9) koš
- 10) horní závěs membrány

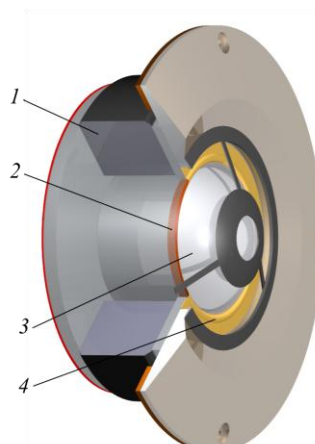


Obr. 1.7: Řez reproduktorem [26].

### Elektromagnetický s kalotovou membránou

Nemají kuželovou, ale kalotovou membránu (tvar kulového vrchlíku). Jsou vhodné na přenos vysokých frekvencí.

- 1) magnet
- 2) kmitací cívka
- 3) membrána
- 4) závěs



Obr. 1.8: Řez kalotovým reproduktorem [28].

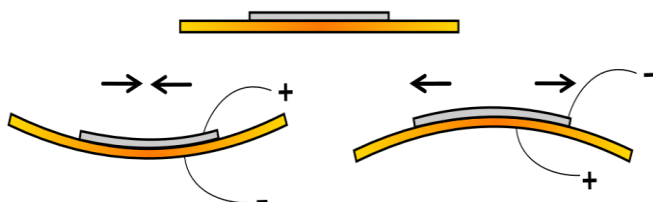
## Piezoelektrický systém

Pracují na principu kmitání krystalu. Neobsahují magnet ani kmitací cívku. Krystal se vlivem elektrického napětí smršťuje nebo roztahuje. Krystal je pevně spojen s kovovou destičkou. To způsobuje vibrace, které jsou přenášeny na membránu. Výhodou tohoto typu je nízká cena a velká výkonnost. Mají ale velké zkreslení.

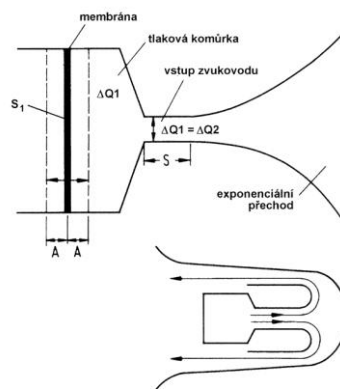
## Tlakové reproduktory

Tlakové reproduktory patří mezi reproduktory s nepřímým vyzařováním. U nich je membrána spojena s vnějším prostředím zvukovodem. V případě, že je plocha membrány větší než plocha vstupního otvoru do zvukovodu, jedná se o tlakový reproduktor. [3]

Tyto reproduktory jsou vhodné pro větší výkony. Mají větší účinnost než kalotové reproduktory. Mají úzkou směrovou charakteristiku. Proto jsou vhodné pro ozvučení na velkou vzdálenost. Používají se především v profesionálním ozvučení. [1] [3]



Obr. 1.9: Princip činnosti piezoelektrického reproduktoru [1].



Obr. 1.10: Tlakový reproduktor [1].

## 1.4 PARAMETRY REPRODUKTORU

### Rozměry

Rozměry jsou důležité z hlediska návrhu ozvučnice. Výškové reproduktory bývají menší než reproduktory basové. U reproduktorů se udává vnější a vnitřní průměr, velikost montážního otvoru, rozteč pro uchycení šrouby, velikost magnetu a celková hloubka reproduktoru.

### Charakteristická citlivost

Jedná se o hladinu akustického tlaku naměřenou 1 metr před reproduktorem o akustickém výkonu 1 W. Jednotka je dB/W/m. Výškové reproduktory ji mívají větší než basové reproduktory. [1]

## Aktivní plocha membrány

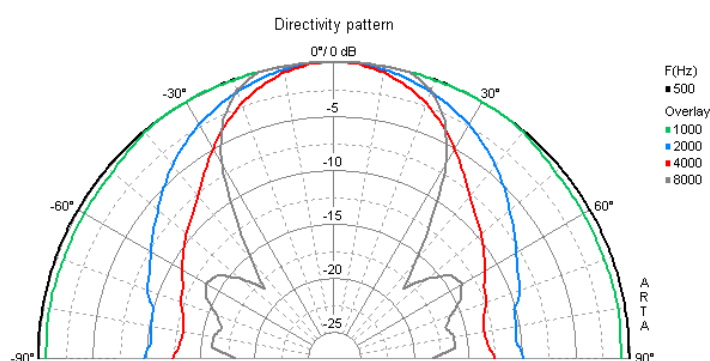
Další důležitý parametr je aktivní plocha membrány. Počítá se z poloměru membrány  $r_d$ , který je vymezen od středu po první vlnku závěsu. [1]

$$S_d = \pi r_d^2 \quad [m^2]$$

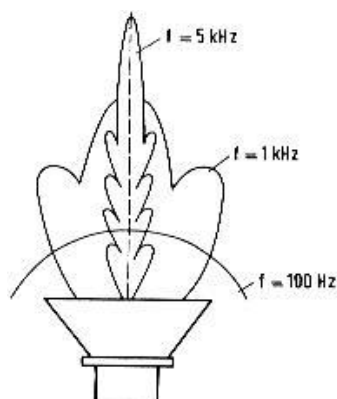
## Směrová charakteristika

Reproduktor nevytváří akustický tlak všude stejně. Je důležité, v jaké poloze od osy reproduktoru jsme. Směrová charakteristika zobrazuje citlivost v závislosti na úhlu od osy reproduktoru. Pro vykreslení této charakteristiky se používají polární souřadnice. Vykreslují se křivky pro několik frekvencí. Pro číselné označení slouží index směrovosti  $I_D[\text{dB}]$ . Index je frekvenčně závislý. [1]

$$I_D = 10 \log \frac{P_a}{P_t}$$



Obr. 1.11: Příklad zobrazení směrové charakteristiky [1].



Obr. 1.12: Směrová charakteristika nad reproduktorem [1].



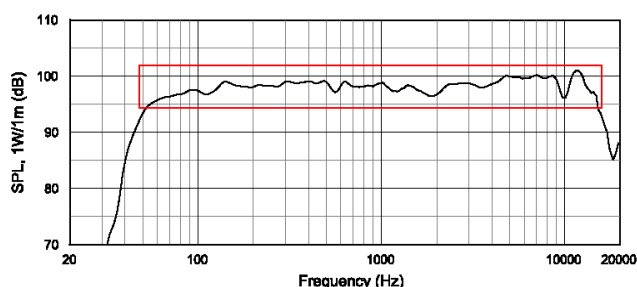
## Frekvenční charakteristika

Je několik druhů frekvenční charakteristiky. Nejznámější je grafické zobrazení frekvenční závislosti charakteristické citlivosti v logaritmickém měřítku.

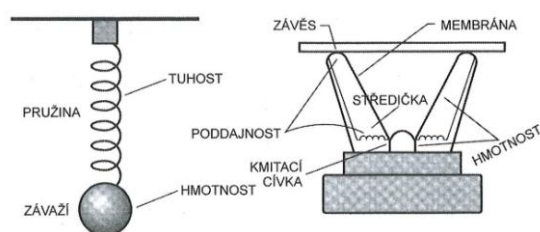
Obvykle bývá lepší vyrovnanější charakteristika. Další frekvenční charakteristikou je impedanční charakteristika. [1]

## Frekvenční rozsah

Je určený podle frekvenční charakteristiky. Musí být udáno toleranční pole. Standardně se používá toleranční pole  $\pm 3$  a  $\pm 6$  dB. Šířku tohoto pole nazýváme frekvenčním rozsahem. Frekvenční rozsah je vyznačen červeným obdélníkem. [1]



Obr. 1.13: Frekvenční charakteristika [1].



Obr. 1.14: Analogie reproduktoru a pružiny [1].

## Poddajnost $c_{ms}$ $c_{md}$

Reproduktor si můžeme představit jako pružinu. Pružina a reproduktor mají své parametry analogické.

**tuhost pružiny  $1/k \iff$  poddajnost  $c_{ms} \iff$  kapacita  $C$**

**hmotnost závaží  $m \iff$  hmotnost kmit. syst. a sloupce vzduchu  $m_{ms} \iff$  indukčnost  $L$**

Poddajnost kmitacího systému  $c_{md}$  můžeme přirovnat k tuhosti pružiny. Jde o tuhost závěsu membrány a středíčky cívky reproduktoru. Jednotka poddajnosti je [m/N]. Reproduktor ale před sebou tlačí sloupec vzduchu. Pro výpočet  $c_{ms}$  je tedy nutné připočítat k poddajnosti kmitacího systému  $c_{md}$  také poddajnost spolukmitajícího sloupce vzduchu  $c_v$ . Ta je ale rovna nekonečnu, protože předpokládáme, že reproduktor vyzařuje do otevřeného, libovolně stlačitelného prostoru. [1]

$$\frac{1}{c_{ms}} = \frac{1}{c_{md}} + \frac{1}{c_v} \cong \frac{1}{c_{md}} \rightarrow c_{ms} \cong c_{md}$$

### Hmotnosti $m_{ms}$ , $m_{md}$

Hmotnost  $m_{md}$  označuje hmotnost všech kmitajících částí reproduktoru. Stejně jako u poddajnosti platí, že pro  $m_{ms}$  musíme ještě přidat hmotnost spolukmitajícího sloupce vzduchu  $m_v$ . [1]

$$m_v \cong \frac{8\rho}{3\pi^2 r_d} \quad [kg] \qquad m_{ms} = m_{md} + S_d^2 m_v \quad [kg]$$

### Rezonanční frekvence $f_s$

Rezonanční frekvence je nejnižší frekvence, při níž vykazuje impedance reproduktoru maximální hodnotu. Udává se jen u přímo vyzařujících reproduktorů a pomocí ní je dána dolní mezní frekvence reproduktoru. Rezonanční frekvence může být snížena akustickou zátěží (např. umístěním reproduktoru v ozvučnici). [4]

V rezonanční frekvenci je největší lineární výchylka. A to je důležité pro volbu dělicího kmitočtu výhybky.

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{c_{ms} m_{ms}}} \quad [Hz]$$

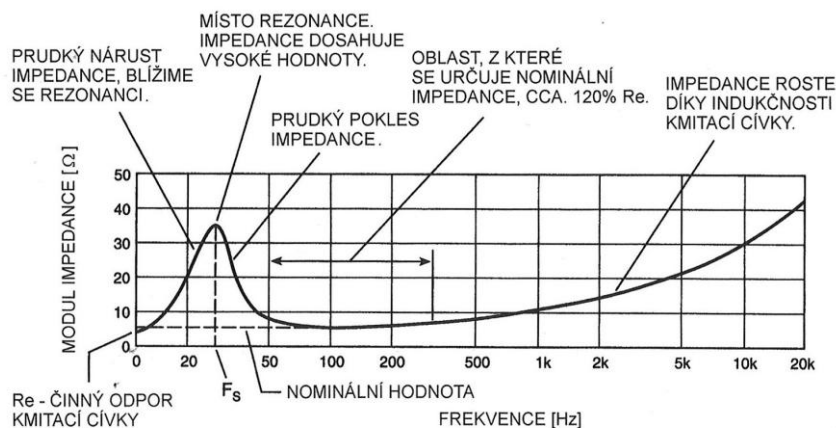
### Nominální impedance a impedanční charakteristika

Impedance ( $Z$ ) u reproduktoru značí odpor kmitací cívky.

Nominální hodnota impedance je určována z oblasti za rezonancí reproduktoru. Jde pouze o informační hodnotu. Nelze ji používat pro výpočty.

Impedance reproduktoru je frekvenčně závislá. Proto se používá impedanční charakteristika. Jde o závislost impedance a frekvence. Využívá se například při návrhu výhybky nebo nízkofrekvenčního zesilovače.

Důležitou hodnotou pro výpočty je činný odpor  $R_e$ . Jde o odpor kmitací cívky při nulové frekvenci reproduktoru. [1]



Obr. 1.15: Impedanční charakteristika [1].

## Činitele jakosti

Udávají míru kvality reproduktoru. Rozlišujeme tři:

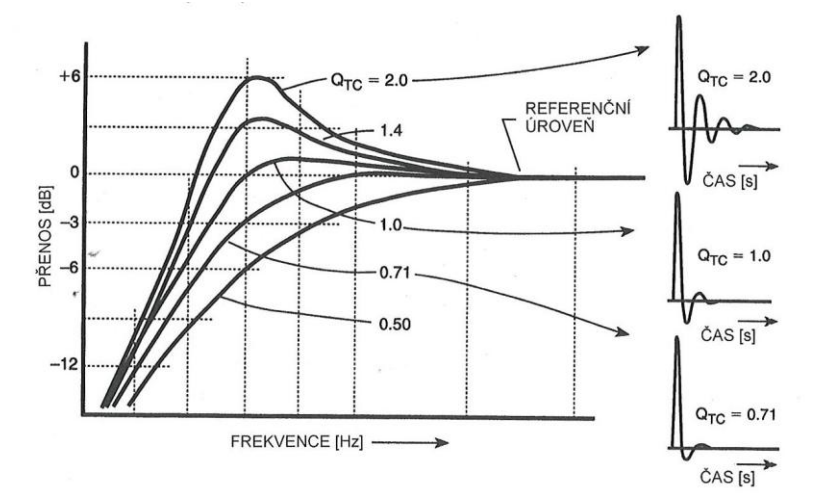
- 1) **Mechanický činitel jakosti  $Q_{ms}$** - Určuje vlivy mechanických ztrát reproduktoru.
- 2) **Elektrický činitel jakosti  $Q_{es}$** - Určuje vlivy elektrických ztrát kmitací cívky.
- 3) **Celkový činitel jakosti  $Q_{ts}$** - Celkový činitel jakosti.

„Čím menší je  $Q_{ts}$ , tím je třeba menší objem reprosoustavy. Reprodukter s vysokou  $Q_{ts}$  může být stále ještě v malé skřínce, ale jen tehdy, má-li velmi nízkou hodnotu  $V_{as}$ <sup>4</sup> nebo  $f_s$ <sup>5</sup>.

Reproduktory s nízkou hodnotou  $Q_{ts}$  mají dobré tlumení a vysoké vybuzení. Tyto reproduktory jsou přesné u nízkých frekvencí, ale mají omezené množství basů, které jsou schopny vyprodukovat.

Reproduktory s vysokou  $Q_{ts}$  mají více basů, ale potřebují také větší objem. [1]

Tyto činitele bývají udávány v katalogovém listu reproduktoru.



Obr. 1.16: Impulzní odezvy při různých hodnotách  $Q$  [1].

<sup>4</sup> Ekvivalentní objem

<sup>5</sup> Rezonanční frekvence

### Ekvivalentní objem $V_{as}$

Je definován jako objem vzduchu v uzavřené ozvučnici, který by měl stejnou poddajnost, jako je hodnota  $C_{ms}$ .

$$V_{as} = 1,4 \cdot 10^5 C_{ms} S_d^2 \quad [\text{m}^3]$$

Ekvivalentní objem<sup>6</sup> nám říká, jak velkou ozvučnici budeme potřebovat. Větší  $V_{as}$  znamená větší objem ozvučnice pro podání dostatečně nízkých kmitočtů. Reprodukter s menším  $V_{as}$  naopak nepotřebuje ozvučnici tak velkou. [1]

### Maximální lineární výchylka

Maximální lineární výchylka<sup>7</sup> je vzdálenost, kterou se může membrána pohybovat jedním směrem beztoho, aniž by kmitací cívka opustila šterbinu v magnetu. Při větší lineární výchylce se zvětšuje zkreslení. Klasicky používaná hodnota je  $\pm 6\text{mm}$ . Pro hlubší tóny je zpravidla větší lineární výchylka membrány. To je důvod proč má basový reproduktor tak velký horní závěs membrány (viz: **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). [1]

### Polarita reproduktoru

Když na reproduktor připojíme stejnosměrné napětí, membrána reproduktoru se nám posune buď<sup>8</sup> z<sup>9</sup>, nebo do<sup>9</sup> reproduktoru. Pokud se po připojení stejnosměrného napětí posune membrána ven z reproduktoru, tak vstupní svorku, na které je kladné stejnosměrné napětí připojené označíme jako kladný pól reproduktoru. Každý reproduktor má své vstupní svorky označené + a -. Polarita je velice důležitá u ozvučnic s více reproduktory. Reproduktery při nesprávném zapojení hrají v rozdílné fázi a dochází k akustickému zkratu. [1]

### Zkreslení

Jeho podoba je zobrazena jako graf frekvenční charakteristiky. Zkreslení se pohybuje v jednotkách procent. Zkreslení je více druhů. Pro nás je zajímavé harmonické zkreslení. Udává se činitelem THD v %.

Zkreslení je způsobeno samotnou konstrukcí reproduktoru.

- 1) **Mechanické omezení závěsů**- drží a centruje membránu a má určitou mez, za kterou už dále membránu nepustí. V případě velkého buzení tóny s nízkou frekvencí dochází k velké lineární výchylce a reproduktor začne zkreslovat. [1]

---

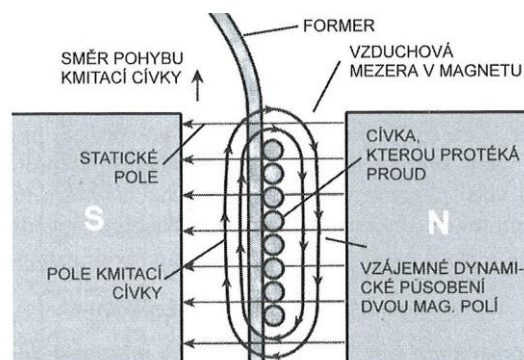
<sup>6</sup> Značí se  $V_{as}$

<sup>7</sup> Značí se  $X_{\max}$

<sup>8</sup> Kladná lineární výchylka

<sup>9</sup> Záporná lineární výchylka

- 2) **Rozložení magnetického pole-** cívka reproduktoru pohybující se v mezeře magnetu je také jedním z důvodů zkreslení reproduktorů. Toto zkreslení může být způsobeno tím, že část cívky při pohybu membrány opustí tuto mezeru. Dochází k rozdílu v buzení jednotlivých částí cívky. Dalším důvodem je nelineární rozložení magnetického pole v mezeře. Je to způsobeno technologií výroby magnetů. V kvalitnějších reproduktorech se nachází kvalitnější magnety. U silnějších magnetů se tento efekt projevuje více. [1]



Obr. 1.17: Cívka v magnetickém poli [1].

- 3) **Modulace magnetického pole-** mění se s časem a teplem. Na kmitací cívku musíme nahlížet také jako na generátor malého střídavého magnetického pole, které se nějakým způsobem slučuje s polem trvalého magnetu, takže výsledek je závislý časově podle toho, jaký signál do cívky přivádíme. Čím větší signál do cívky přivádíme, tím větší vznikne zkreslení. [1]
- 4) **Vířivé proudy v magnetu-** vytváří další magnetické pole. Dochází zase ke sloučení magnetického pole a k následnému zkreslení. [1]
- 5) **Turbulentní proudění vzduchu-** zkreslení je způsobeno i díky vlastnostem vzduchu. Při překročení určité rychlosti se už vzduch nepohybuje laminárně, ale začne být jeho pohyb turbulentní. Tuto hranici definuje Reynoldsovo číslo. Podmínka turbulentního proudění je:

$$\frac{2r_d \cdot v^{10}}{\eta_{20}^{11}} > 1000$$

Basové reproduktory jsou při nízkých frekvencích téměř vždy v oblasti turbulentního proudění. Toto proudění se nenachází pouze před membránou, ale i v mezeře kolem cívky. Tento jev omezuje otvor v magnetu a odstranění prachovky u některých reproduktorů. [1]

Zkreslení se dá zlepšit vhodnou konstrukcí výhybky a reprosoustavy.

<sup>10</sup> Rychlost proudění vzduchu

<sup>11</sup> Viskozita vzduchu

## **Maximální dlouhodobý standardizovaný příkon P**

Jmenovitý příkon reproduktoru je nejvíce zavádějící parametr, čehož velice dobře využívají obchodníci. Jeden reproduktor může mít udány výkony 20 W sin, 60 W rms, 100 W aes, 150 W max., 200 W p.m.p.o. „Obchodníci s tímto parametrem rádi „čarují“, protože pro spoustu lidí je příkon jediný parametr reproduktoru. Tento parametr navíc bývá pojmenován jako výkon, což není správné označení.

Správně by se toto číslo mělo jmenovat *maximální dlouhodobý standardizovaný příkon*. Jednotka by měl být VA (voltampér) a nikoliv watt, který vidáme v prodejnách s elektronikou.

$$\text{výkon} = \text{příkon} \cdot \text{účinnost}$$

Už z tohoto je jasné, že reproduktor „pojídá“ příkon, ale vyzařuje výkon. Proto je správný pojem příkon. Rozdíl mezi výkonem a příkonem je ztráta. Na straně **10** je definovaný akustický výkon. Udává se ve wattech a značí, kolik energie se přeneslo na vzduch. Například reproduktor s příkonem 100 W může mít akustický výkon jen 0,5 W.

Příkon reproduktoru se poté udává podle určitého standardu. U kvalitních výrobců reproduktorů se setkáme většinou s jednotkou W RMS nebo W AES. Měření probíhá podle normovaným signálem po dobu dvou hodin. Takto udané výkony jsou důvěryhodné. [1]

## **1.5 OZVUČNICE**

Ozvučnice (reproduktorová skříň) je zařízení, které podporuje množství nízkých frekvencí vyzařovaných reproduktorem. Reproduktor vyzařuje zvuk plochou membrány. Membrána má dvě strany. Díky tomu vzniká přední a zadní zvuková vlna. Reproduktorová skříň odděluje přední a zadní vlnu reproduktoru, tím zamezuje jevu zvanému akustický zkrat. Akustický zkrat nastává, když se přední a zadní vlna na určitých kmitočtech vyruší. Tento jev se projevuje na nízkých frekvencích. Proto se ozvučnice navrhuje pro basové reproduktory.

Ozvučnice slouží i jako ochrana před poškozením reproduktoru. Zabudováním reproduktoru do ozvučnice se totiž pod jistým kmitočtem zmenší velikost maximální výchylky.

Vhodným návrhem ozvučnice můžeme vyladit nedokonalost námi zvoleného reproduktoru. Při nevhodném návrhu nám ale ani nejdražší reproduktor nepomůže. Je důležité si také uvědomit, že neexistuje jen jeden správný návrh. Návrh ozvučnice je velmi individuální. [1]

## Rovinná deska

Jedná se o nejjednodušší typ ozvučnice. K oddělení přední a zadní vlny slouží teoreticky nekonečná deska. Je ovšem jasné, že nekonečná deska není reálná. V praxi to znamená omezení při nízkých kmitočtech. Pro čtvercovou rovinnou desku o rozměrech  $a \times a$  by mělo platit:

$$a \cong \frac{120}{f_s^{12}}$$

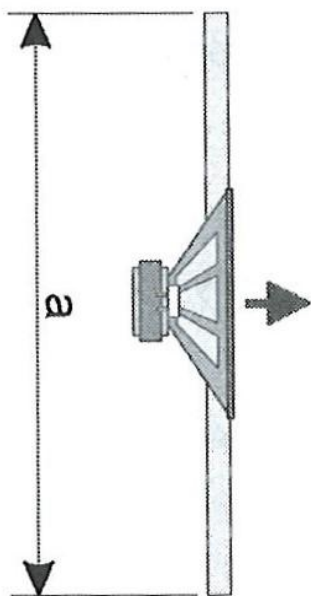
Tato ozvučnice neprodukuje žádné nežádoucí rezonance a je svojí konstrukcí velmi jednoduchá. Není ale moc účinná při nízkých kmitočtech.

Pro desku s rozměry  $a \times a$  a reproduktor s rezonančním kmitočtem  $f_s$  je dolní mezní kmitočet: [1] [5]

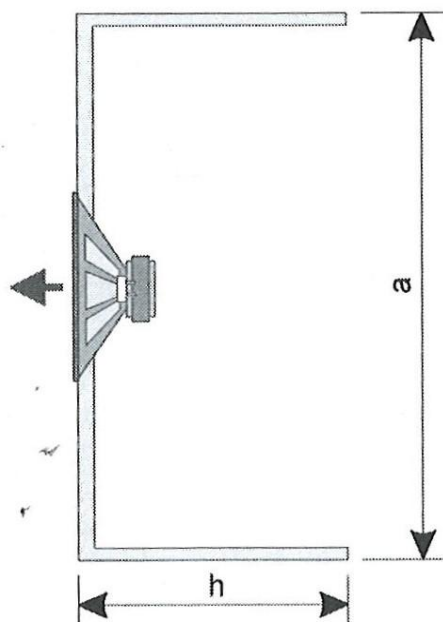
$$f_m \cong \frac{170}{a}$$

## Otevřená ozvučnice

Používá se často u kytarových komb. Zadní strana ozvučnice chybí. Akustický zkrat je omezen jen částečně. Základními parametry jsou rozměry  $a$  a  $h$ . Při zvětšování hloubky ozvučnice  $h$  se pohybuje dolní mezní kmitočet dolů. Zároveň však vzniká na charakteristice hrb. Má podobnou frekvenční SPL charakteristiku jako rovinná deska. [1]



Obr. 1.18: Rovinná deska [1].



Obr. 1.19: Otevřená ozvučnice [1].

---

<sup>12</sup> Rezonanční frekvence reproduktoru

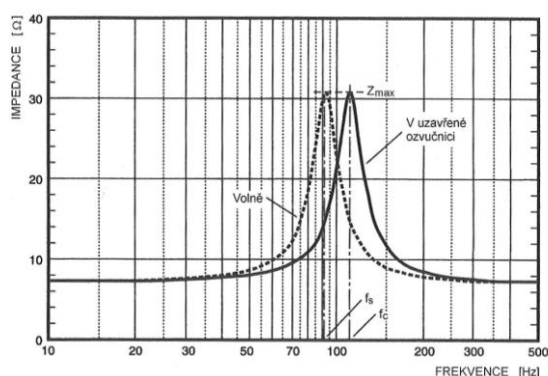
## Uzavřená ozvučnice

Uzavřená ozvučnice je hermeticky utěsněná skříň s určitým objemem. Zadní vlna tak zůstává v ozvučnici a mění se na teplo. Při vložení reproduktoru do uzavřené ozvučnice se jeho rezonanční frekvence zvýší. Čím větší bude objem ozvučnice  $V_b$ , tím nižší bude rezonanční frekvence  $f_c$ . [1] [5]

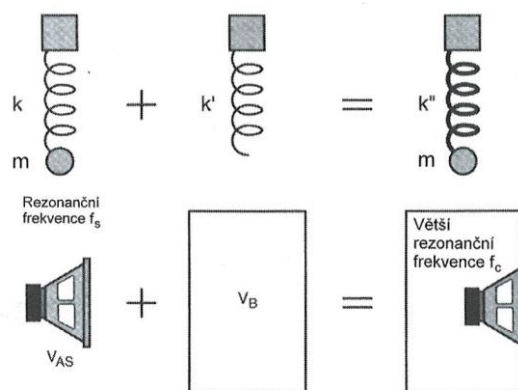
$$\frac{f_c}{f_s} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1}$$

V uzavřené ozvučnici se zvýší i činitel  $Q_{ts}$ .

$$\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1}$$



Obr. 1.20: Znázornění zvýšení rezonance [1].



Obr. 1.21: Pružinová analogie uzavřené ozvučnice [1].

## Bassreflexová ozvučnice

Bassreflexová ozvučnice není uzavřená, ale je s okolím propojená bassreflexovým nátrubkem. Princip ozvučnice se dá opět zobrazit jako analogie s pružinou a závažím. Tento nátrubek slouží jako rezonátor. Výpočet takovéto ozvučnice je popsán v kapitole **Návrh ozvučnice**.

Tato ozvučnice není vhodná pro všechny reproduktory. Zda je reproduktor vhodný pro bassreflexovou nebo pro uzavřenou ozvučnici poznáme podle informativní hodnoty EBP<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> Efficiency Bandwidth Product



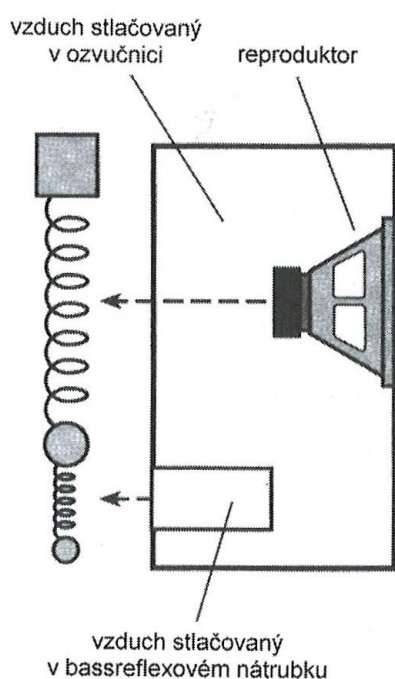
$$EBP = \frac{f_s}{Q_{es}} \quad [Hz]$$

Pokud je  $EBP < 50$  je vhodné použít uzavřenou ozvučnici

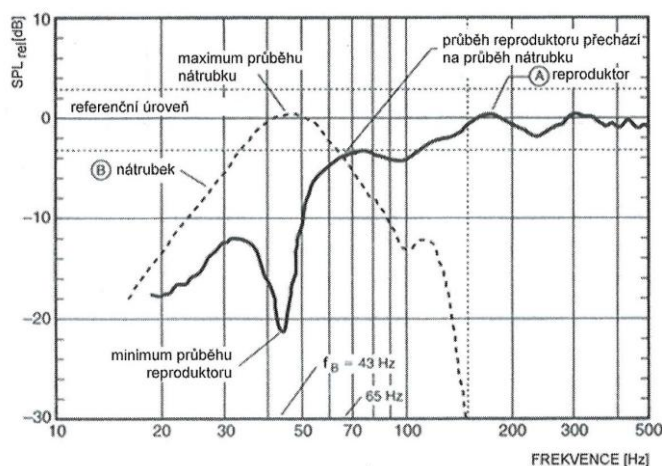
Pokud je  $EBP < 50$  je vhodné použít uzavřenou ozvučnici

Pokud je  $EBP > 50$  nejspíš použijeme bassreflexovou ozvučnici.

Bassreflexová ozvučnice nepotřebuje tak velký objem skříně. Má větší účinnost a nízké zkreslení v místě rezonance. Nevýhodou je složitější návrh, hrozící poškození závěsů reproduktoru pod rezonančním kmitočtem, kde se mohou vyskytovat problémy s prouděním



Obr. 1.22: Pružinová analogie bassreflexové ozvučnice [1].



Obr. 1.23: Skládání SPL bassreflexu a měniče [1].

vzduchu v nátrubku.

### Aproximace ladění

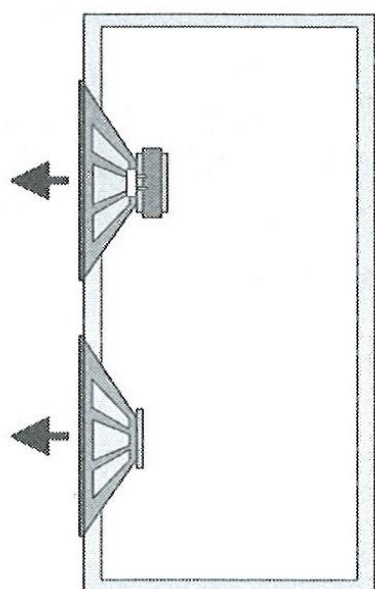
Existuje spousta metod jak vypočítat parametry bassreflexové ozvučnice. Těmito metodám se říká aproximace. Každá aproximace má odlišné vlastnosti a zvláštní frekvenční charakteristiky. Aproximace pro subwoofer bude odlišná od aproximace pro dvoupásmové regálové reproduktory. [1]

## Transmission line

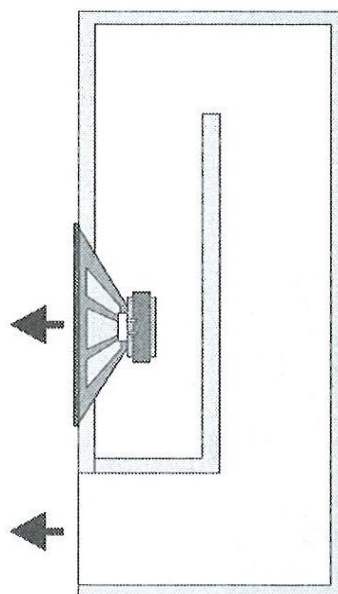
Jedná se o ozvučnici se zvukovodem. Jako u bassreflexu se zde využívá výkon vyzařovaný zadní stranou membrány. Nejedná se však o princip rezonátoru, ale o zpoždění zvukové vlny. Díky průchodu zvukovodem se dostane do fáze s přední vlnou. Návrh takovéto ozvučnice je velmi složitý. [1] [5]

## Passive radiator

V ozvučnici je kromě reproduktoru zabudovaný ještě pasivní zářič. Jedná se o membránu, která se pohybuje se změnou tlaku v ozvučnici. Chová se podobně jako bassreflexová ozvučnice. Ale má větší strmost poklesu na frekvenční charakteristice. Je vhodný pro reproduktory s  $Q_{ts}$  mezi 0,2 a 0,5. [1]



Obr. 1.24: Ozvučnice s pasivním zářičem [1].



Obr. 1.25: Transmission line ozvučnice [1].

## 1.6 REPRODUKTOROVÉ VÝHYBKY

Reproduktorové výhybky slouží k rozdělení kmitočtového pásma pro různé druhy reproduktorů. Existují výhybky aktivní a pasivní. Výkonové a nevýkonové. U aktivní výhybky můžeme měnit parametry dělicí frekvence atd. U pasivní je výhybka nějakým způsobem nastavená a změna za provozu není možná. Nevýkonové výhybky jsou umísťované před zesilovač. Neprocházejí jimi tak vysoké proudy. Výkonové výhybky jsou naopak umístěné za zesilovač. My se budeme zajímat o pasivní výkonové výhybky. Pro návrh je ideální počítačový program, díky kterému můžeme měnit hodnoty součástek na výhybce a sledovat odezvu na grafech. Poté jsme schopni vyladit nedokonalosti reproduktoru. [1]

## Pásmové propusti

Výhybka je soustava pásmových propustí. Rozlišujeme tři pásmové propusti:

### 1) Dolní propust- low pass

Pásmo je propouštěné jen do určitého kmitočtu. Používá se pro basové reproduktory. Například nepustí frekvence vyšší než 500 Hz.

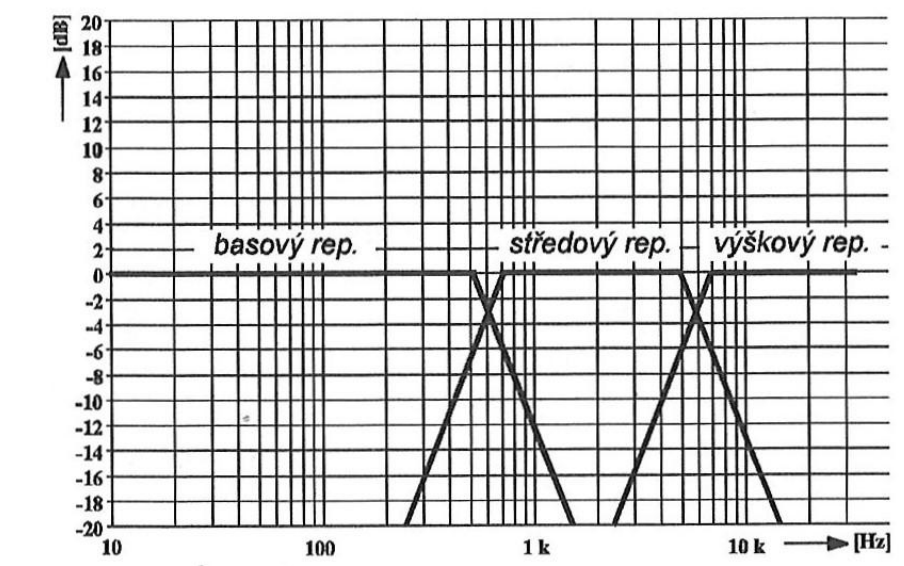
### 2) Pásmová propust- band pass

Pásmo je propouštěné od kmitočtu  $x$  do kmitočtu  $y$ . Používá se pro středotónový reproduktor. Například propustí pouze pásmo od 500 Hz do 3500 Hz.

### 3) Horní propust- high pass

Propouští pásmo od určitého kmitočtu. Používá se pro výškový reproduktor. Například propustí pouze frekvence vyšší než 3500 Hz.

Výhybka navíc plní i ochranou funkci. Díky oddělení frekvencí nedochází k tak velkému výkonovému zatěžování reproduktorů. Snižuje se tedy riziko spálení reproduktoru.



Obr. 1.26: Znáznornění přechodu mezi propustmi [1].

## Dělicí frekvence

Určení dělicí frekvence výhybky probíhá podle počtu zvolených pásem reprosoustavy. Dále je nutné podívat se na doporučené dělicí frekvence od výrobce reproduktoru. Námi zvolená dělicí frekvence by nikdy neměla být nižší než výrobcem doporučená. Dělicí kmitočty dvou sousedních filtrů nemusí být stejné. [1]

## Strmosti filtrů

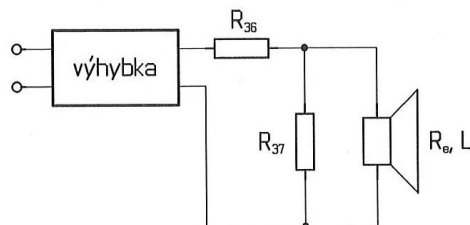
Strmost určuje, o kolik decibelů klesne SPL na jednu oktávu. Nejčastější je filtr se strmostí 12 dB/oct. Výhybky se strmostí 6 dB/oct. se používají u levných reprosoustav a jsou vhodné maximálně na dolní propust k basovému reproduktoru. Vyžaduje totiž velmi kvalitní reproduktory. K výškovému reproduktoru je vhodné použít strmost 12 nebo 18 dB/oct. U větších strmostí dochází k fázovému posunu a ke zkreslení. Výhybka s větší strmostí obsahuje větší množství součástek. [1]

## Dimenzování výhybky

Všechny komponenty na výhybce je nutné volit podle předpokládané zatíženosti reproduktoru. Cívky musí být navinuty z drátu s dostatečným průměrem, rezistory musí být dostatečně předdimenzované, aby nedocházelo k jejich zahřívání. Kondenzátory se používají s plastovým dielektrikem a cívky se vzduchovým jádrem. [1]

## Vyrovnání citlivosti reproduktorů

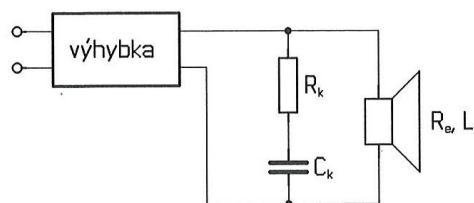
Výškové reproduktory mívají mnohem vyšší citlivost než ostatní reproduktory. Kvůli tomu dochází k nevyrovnanosti frekvenční charakteristiky, výškový reproduktor je příliš hlasitý. Tento jev se omezuje pomocí odporového děliče, který citlivost reproduktorů vyrovná. [1]



Obr. 1.27: Vyrovnání citlivosti [1].

## Kompensace indukčnosti kmitačky

Frekvenční závislost impedance reproduktorů snižuje kvalitu výhybky. Musíme impedanci kompenzovat pomocí RC členu. Nejčastěji se impedance kompenzuje u basových reproduktorů. [1]



Obr. 1.28: RC člen [1].

## Pólování reproduktorů

Pólování reproduktorů není u všech výhybek stejné. Často se musí výškový nebo středový reproduktor přepólovat. To je nutné, pokud reproduktory nehrají ve fázi. Otočením polarity

reproduktoru se fáze změny o 180 stupňů. Nejlépe správnost polaritu zjistíme poslechovými testy nebo měřením. [1] Výpočtem se zabývám v dalších částech práce.

## 2 NÁVRH A VÝROBA REPRODUKTORU

Tato kapitola mé seminární práce je praktická. Je v ní popsána výroba reproduktoru. Obsahuje postupy a výpočty použité při návrhu a výrobě. Pro správné pochopení textu může být velmi užitečné nahlížet do technické dokumentace, která je v příloze práce.

### 2.1 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA REPRODUKTOR

Před začátkem navrhování je důležité udělat si představu o tom, na jaký účel chci reproduktor používat. Já jsem chtěl navrhnout reproduktor vytištěný na 3D tiskárně. Měl disponovat především dobrými zvukovými vlastnostmi. Druhořadým kritériem byla jeho velikost. Dalšími požadavky bylo přehrávání hudby přes Bluetooth a možnost přehrávat hudbu i v místech bez možnosti připojení k elektrické síti. Dalším cílem, byl 360° zvuk. Cíl pro výdrž bez elektrické sítě při maximální hlasitosti byl stanoven na 5 hodin.

Z hlediska elektroniky jsem se chtěl vyhnout digitálním zesilovačům ve třídě D, které jsou používány ve valné většině přenosných reproduktorů a odlišit se, podle mého názoru, zvukově kvalitnější třídou A, B nebo AB (viz. kapitola Zesilovač). Tímto rozhodnutím však vzniklo mnoho problémů při návrhu elektroniky.

#### Konstrukce

Konstrukce reproduktoru byla tedy zvolena jako dvoupásmová (basový a výškový reproduktor). Zesilovač ve třídě AB a jako zdroj energie li-ion články velikosti 18650.

Tvar byl zvolen válcovitý pro dobré vyzařování zvuku do všech stran.

### 2.2 VÝBĚR MĚNIČŮ

Objem basové ozvučnice byl odhadnut na hodnotu 2,65 dm<sup>3</sup>. Dalším krokem byl výběr vhodného basového a výškového měniče. Byl vybrán středobasový reproduktor Monacor SPH-75/8 a výškový reproduktor Monacor DT-25N. Primárním hlediskem při výběru byla velikost, vhodnost pro malý objem ozvučnice a kvalita měničů.



Obr. 2.1: Reálná fotka reproduktoru [24].



Obr. 2.2: Počítačový návrh reproduktoru [9].



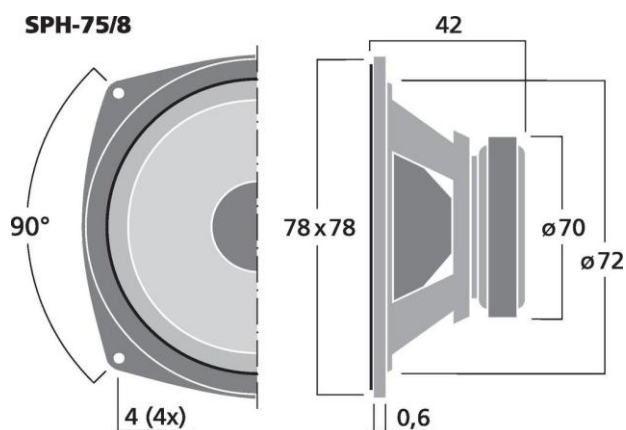
## Monacor SPH-75/8

Monacor SPH-75/8 je středobasový reproduktor s průměrem membrány 3“. Je vhodný pro malé objemy ozvučnic díky nízkému  $V_{as}$ , což je pro naše potřeby ideální. Má i velkou lineární výchylku membrány.

|                                           |                    |
|-------------------------------------------|--------------------|
| Impedance ( $Z$ )                         | 8 $\Omega$         |
| Frekvenční rozsah                         | 3-16000 Hz         |
| Rezonanční frekvence ( $f_s$ )            | 85 Hz              |
| Citlivost                                 | 83 dB/W/m          |
| Činný odpor kmitací cívky ( $R_e$ )       | 6,2 $\Omega$       |
| Ekvivalentní objem ( $V_{as}$ )           | 1,9 l              |
| Maximální příkon                          | 30 W               |
| Příkon (RMS)                              | 15W                |
| Maximální lineární výchylka ( $X_{max}$ ) | 0,75 mm            |
| Elektrický činitel jakosti ( $Q_{es}$ )   | 0,65               |
| Mechanický činitel jakosti ( $Q_{ms}$ )   | 3,9                |
| Celkový činitel jakosti ( $Q_{ts}$ )      | 0,56               |
| Poddajnost ( $C_{ms}$ )                   | 1,3 mm/N           |
| Indukčnost cívky ( $L_e$ )                | 0,15 mH            |
| Efektivní plocha membrány ( $S_d$ )       | 32 cm <sup>2</sup> |
| Hmotnost kmitajícího systému ( $m_{ms}$ ) | 2,7 g              |
| Hmotnost magnetu                          | 150 g              |
| Hmotnost reproduktoru                     | 400 g              |

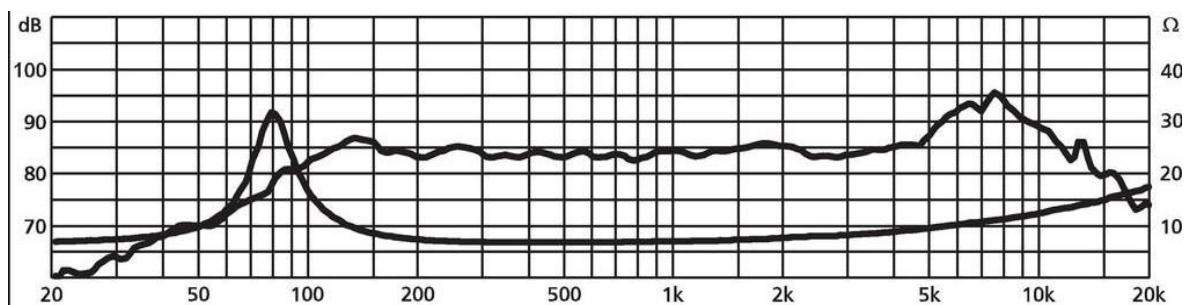


Obr. 2.3: Monacor SPH-75/8 [6].



Obr. 2.4: SPH-75/8 výkres [6].

Tab. 3: Parametry basového reproduktoru [6].



Obr. 2.5: Impedanční a SPL charakteristiky pro SPH-75/8 [6].

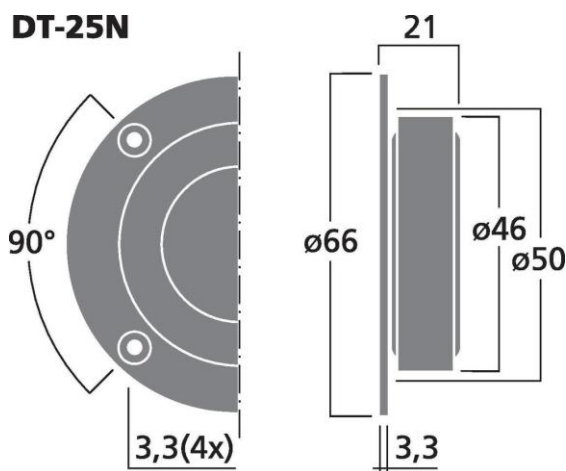
## Monacor DT-25N

Výškový reproduktor je od stejné značky jako basový. Tento reproduktor má velice malé rozměry. To byl hlavní důvod, kvůli kterému jsem jej zvolil. Má i velice dobré zvukové vlastnosti a vyrovnanou frekvenční charakteristiku. Nevýhodou je vyšší cena.

|                                                        |                 |
|--------------------------------------------------------|-----------------|
| Impedance ( $Z$ )                                      | 8 $\Omega$      |
| Frekvenční rozsah                                      | $f_x$ -20000 Hz |
| Citlivost                                              | 95 dB/W/m       |
| Doporučená dělicí frekvence ( $f_{max}$ ) (12 dB/oct.) | 2500 Hz         |
| Příkon (RMS)                                           | 40 W            |
| Maximální příkon                                       | 80 W            |
| Hmotnost reproduktoru                                  | 65 g            |

Tab. 4: Parametry výškového měniče [7].

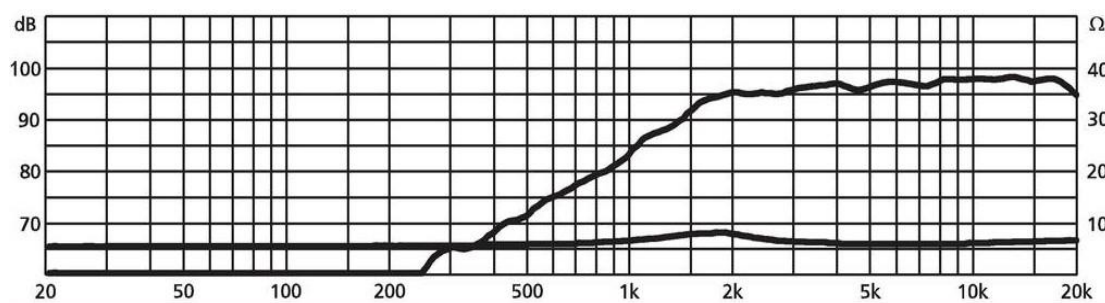
**DT-25N**



Obr. 2.7: Monacor DT-25N [7].



Obr. 2.8: DT-25N [7].



Obr. 2.6: Impedanční a SPL charakteristika pro DT-25N [7].



## 2.3 VÝPOČET OZVUČNICE

Pro správnou volbu ozvučnice pro náš reproduktor použijeme hodnotu EBP.

$$EBP = \frac{85}{Q_{es}} \quad [Hz]$$

$$EBP = \frac{85}{0,65} = 130,77 \text{ Hz}$$

Jelikož je EBP větší než 50 Hz použijeme bassreflexovou ozvučnici.

### Výpočet bassreflexové ozvučnice

Technik výpočtu ozvučnice existuje celá řada. Já jsem postupoval návrhem pomocí vzorců.

Ozvučnice je počítána aproximací maximally flat. Jedná se o aproximaci pro maximálně plochou frekvenční charakteristiku. [1]

Objem ozvučnice ( $V_b$ ) se pomocí této aproximace počítá:

$$V_b = 15,33 V_{as} Q_{ts}^{2,86} = 15,33 \cdot 1,9 \cdot 0,56^{2,86} = 5,55 \text{ l}$$

Poté vypočítáme dolní mezní kmitočet:

$$f_3 = \frac{0,42 \cdot f_s}{Q_{ts}^{0,9}} = \frac{0,42 \cdot 85}{0,56^{0,9}} = 60,12 \text{ Hz}$$

Snížíme objem podle našich možností. Já jsem objem stanovil na 2,65 l.

$$f'_3 = f_s \sqrt{\frac{V_{as}}{V'_b}} = 85 \sqrt{\frac{1,9}{2,65}} = 71,97 \text{ Hz}$$

Vypočítáme rezonanční kmitočet:

$$f'_b = f_s \left( \frac{V_{as}}{V'_b} \right)^{0,32} = 85 \left( \frac{1,9}{2,65} \right)^{0,32} = 76,42 \text{ Hz}$$

Vypočítáme délku nátrubku. Je důležité zvolit vhodný průřez, aby nedocházelo k turbulentnímu proudění vzduchu.

$$l = \frac{2361 d^2}{f_b'^2 V'_b} - 0,732 d = \frac{2361 \cdot 0,035^2}{76,42^2 \cdot 0,00265} - 0,732 \cdot 0,035 = 0,161 \text{ m}$$

Díky zmenšení objemu ozvučnice se nám charakteristiky vyhrbí. Velikost tohoto hrbu vypočítáme:

$$SPL_{peak} = 20 \log \left[ 2,6 Q_{ts} \left( \frac{V_{as}}{V_b} \right)^{0,35} \right] = 20 \log \left[ 2,6 \cdot 0,56 \left( \frac{1,9}{2,65} \right)^{0,35} \right] = 2,25 \text{ dB}$$

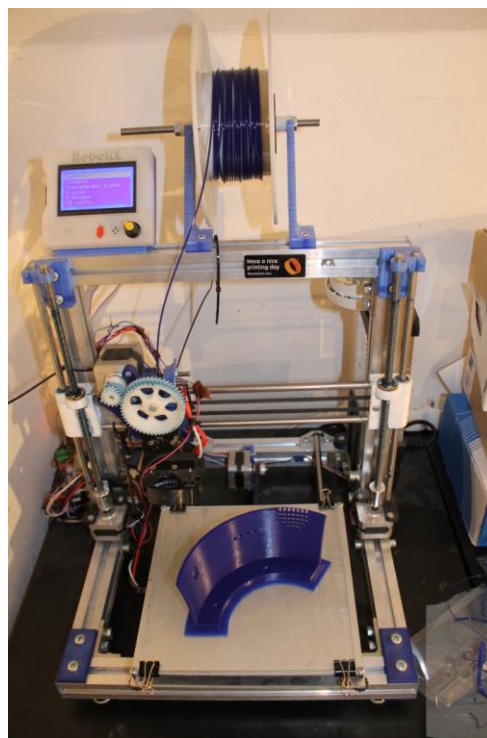
Pro objem ozvučnice 2,65 l jsme určili bassreflex kruhového průřezu s průměrem 35 mm a délkou 161 mm. Rezonanční frekvence je 71,97 Hz a dolní mezní kmitočet 60,12 Hz. Je nutné si uvědomit, že v objemu ozvučnice nejsou započítány objemy reproduktoru a rezonátoru které nám celkový objem zmenšují. Je nutné k objemu 2,65 l přičíst objem reproduktoru v ozvučnici a objem bassreflexu.

Objem reproduktoru v ozvučnici byl vypočten na 0,165 l. Vymodelovaný bassreflex zabírá objem 0,26 l. Celkový objem ozvučnice musí tedy být 3,075 l.

Všechny výše použité vzorce pochází z literatury [1].

## 2.4 MECHANICKÁ KONSTRUKCE REPRODUKTORU

V této části jsou popsány jednotlivé mechanické díly navržené pro tento reproduktor. Všechny byly vytvořeny technikou 3D tisku a mají v příloze přiloženou technickou dokumentaci. Byla použita 3D tiskárna Rebelix vybavená jednou tryskou, kterou jsem v roce 2018 zkonstruoval. Tisková plocha této tiskárny je omezená na krychlový rozměr 175mm×175mm×175mm. Z tohoto důvodu bylo nutné některé díly tisknout na více částí a následně je slepit. U některých dílů bylo rozdělení nutné z důvodu jejich tvaru a limitů FFF 3D tiskové technologie. Díky technologii 3D tisku lze snadno vytvářet nové prototypy a návrh je tak mnohem jednodušší. Navíc lze vytvořit složité tvary. Díky tomu, že vlastním 3D tiskárnu, byla tvorba rychlá a méně nákladná. Pro více informací o 3D tisku doporučuji přečíst Prusa3D - 3D tisk a 3D tiskárny. [8].

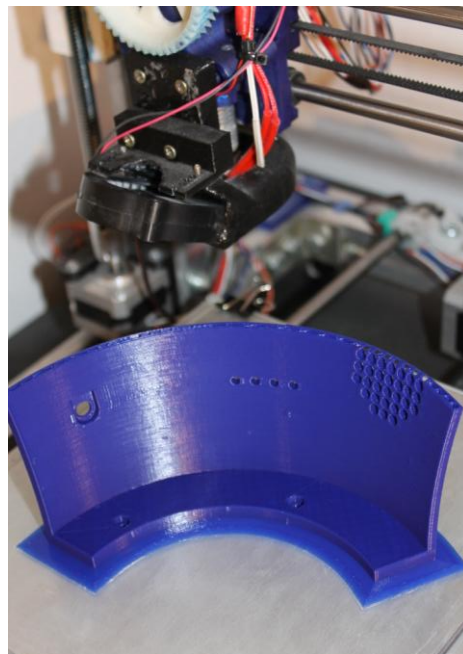


Obr. 2.9: 3D tiskárna Rebelix.

Díly byly navrženy v programu Inventor [9]. V příloze jsou přiloženy technické výkresy pro jednotlivé díly. Pro tvorbu technických výkresů byly použity programy Inventor [9] a AutoCAD [10]. Jako slicer pro 3D tiskárnu byl použitý program Cura [11]. Pro tisk byl použitý materiál PLA. Který je vhodný díky své malé tepelné roztažnosti.

## Základní díly

- 1) vrchní část (tištěno na dvě části)
- 2) bassreflex (tištěno na tři části)
- 3) uložení bass
- 4) sloupky a rozptylovače
- 5) mřížka
- 6) uložení výšky
- 7) spodní část (tištěno na tři části)
- 8) spodní víko



Obr. 2.10: Tisk dílů.

## Ozvučnice basového reproduktoru

Je složená ze tří základních dílů. Ozvučnice má zásadní vliv na kvalitu zvukového projevu, její návrh se tudíž řídil akustickými výpočty a pravidly. Všechny zásadní parametry pro ozvučnici jsou spočítány v kapitole *Návrh ozvučnice*. Musíme tedy dodržet základní parametry. Vnitřní stěny ozvučnice jsou tlumené vatou, aby se zabránilo stojatému vlnění a zkreslování výsledného zvuku

|                 |         |
|-----------------|---------|
| Objem ozvučnice | 3,075 l |
| Délka nátrubku  | 161 mm  |
| Průměr nátrubku | 35 mm   |

Tab. 5: Základní parametry ozvučnice.

### **1) Vrchní část**

Jedná se o největší část reproduktoru. Má přibližný vnitřní objem 3,075 litru. Je výrazně tlakově namáhána. Je důležité, aby konstrukce nerezonovala, a aby se nedeformovala. Horní část obsahuje otvor pro vložení bassreflexového nátrubku. Ve spodní části nalezneme místo pro uložení šesti matic M3, které slouží pro uchycení k dílu 3. Bylo nutné ji tisknout na dvě části kvůli nedostatečnému tiskovému prostoru.



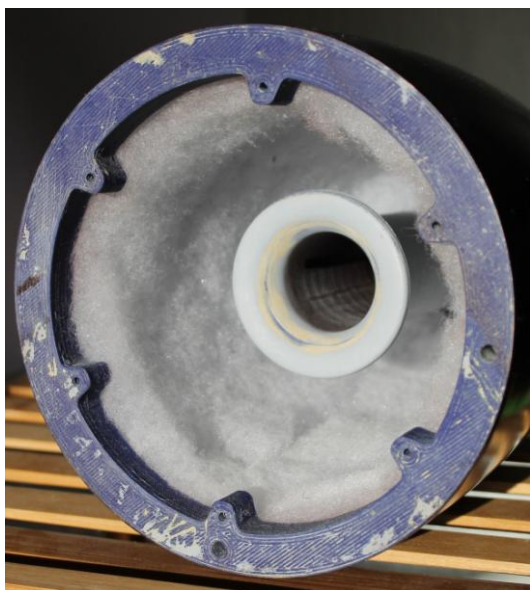
Obr. 2.11: Vrchní část.

## 2) Bassreflex

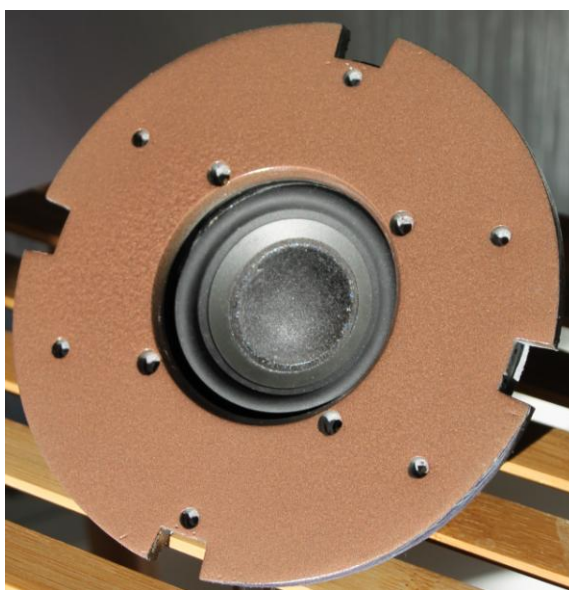
Bassreflexový nátrubek má délku 161 mm a vnitřní průměr 35 mm. Kvůli omezení hluku při proudění vzduchu úzkým prostorem má zaoblené venkovní konce. Bylo nutné jej tisknout na 3 části. Je pevně přilepený k vrchní části.

## 3) Uložení basového reproduktoru

V tomto dílu je umístěn basový reproduktor. Je podlepen těsnicí páskou, aby byly dobře oddělené akustické prostory a nedocházelo k proudění vzduchu mezerami.



Obr. 2.13: Tlumení basové ozvučnice.



Obr. 2.12: Uložení basového reproduktoru.

## Střed

Střed zásadně ovlivňuje vyzařovaný zvuk. Dochází zde k rozptylování zvuku do všech úhlů od reproduktoru. Slouží jako spojovací prvek mezi podstavou a ozvučnicí basového reproduktoru. Střed se skládá z dílů 4, 5 a 6.

## 4) Sloupky a rozptylovače

Jedná se o díl, který drží pomocí čtyř sloupků váhu ozvučnice basového reproduktoru a přenáší ji na podstavu. Jeho nejdůležitějším úkolem je změnit směr zvukových vln a rozšířit je po ozvučovaném prostoru. Je vytvořen slepením dvou částí. Pro návrh rozptylovačů byl použit odhad a tvar je inspirován výrobky renomovaných značek. Dvěma sloupky prochází po celé jejich délce díra pro přívodní kabely basového reproduktoru. Tento celek je připevněn osmi šrouby M2 k dílu 2. Dalších 8 šroubků se upíná do uložení výškového reproduktoru.



## 5) Mřížka

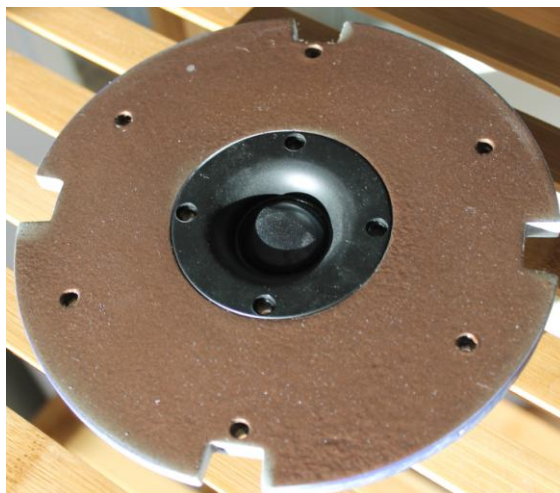
Díl, který zabraňuje vnějšímu mechanickému poškození měničů. Obaluje sloupky a rozptylovače reproduktoru a je k nim připevněn pomocí 16 šroubů M2. Dalších 8 šroubů se upíná do dílů 3 a 6. Pro dobrý prostup zvuku obsahuje mřížka 1600 děr velikosti 4 mm.

## 6) Uložení výšky

K tomuto dílu je čtveřicí šroubů M3 připevněn výškový reproduktor.



Obr. 2.14: Mřížka.



Obr. 2.15: Uložení výškového reproduktoru.

## Podstava

V podstavě jsou umístěné všechny elektronické a ovládací prvky. Podstava musí také unést celou váhu reproduktoru a musí poskytovat dobrý kontakt s podložkou. Je ze základních dílů 7 a 8.

## 7) Spodní část

Slouží k uložení elektroniky a jsou v něm všechny ovládací a indikační prvky reproduktoru. V jeho stěnách jsou tři větrací otvory pro dostatečné chlazení elektroniky. Je přichycený šesti šrouby M3 k dílu 6.



Obr. 2.16: Spodní část.

## 8) Spodní víko

Uzavírá přístup do spodní části. Je upevněno šesti šrouby M3 k dílu 7. Na spodním víku celý reproduktor stojí a jsou na něm tudíž nalepené nožičky zabráňující rezonancím s podkladem.

## Povrchová úprava

Větší nerovnosti na tištěných dílech byly nejdříve vytmeleny polyesterovým tmelem. Díly poté byly přestříkány plničem ve spreji, který zajistil vyplnění drobných nerovností. Vše bylo pod vodou dohladka vybroušeno jemným smirkovým papírem. Jako finální povrch byla zvolena akrylátová barva.



Obr. 2.17: Tmelení.

## 2.5 NÁVRH VÝHYBKY

### Volby dělicí frekvence

Dělicí frekvenci je nutné zvolit tak, aby nedošlo k poškození výškového reproduktoru nízkými frekvencemi. Dělicí frekvenci jsem zvolil podle doporučení výrobce výškového reproduktoru, tedy 2,5 kHz.

### Volba strmosti

Zvolil jsem strmost 12 dB/oct. pro basový a 18 dB/oct. pro výškový reproduktor. Nižší strmost výhybky by nebyla ideální kvůli vysokému nároku na kvalitu reproduktorů.

### Výpočet výhybky

#### 1) Dolní propust

Cílem dolní propusti je propustit do basového reproduktoru pouze pásmo od 0 Hz do 2,5 kHz. Dolní propust má strmost 12 dB/oct. Skládá se tedy z jedné cívky a jednoho kondenzátoru.

Výpočet cívky

$$L_1 = \frac{Z_h^{14}}{\pi f_{dd}^{15}} = \frac{8}{\pi \cdot 2500} = 1 \cdot 10^{-3} H = 1 mH$$

Výpočet kondenzátoru

$$C_1 = \frac{1}{4\pi f_{dd} Z_h} = \frac{1}{4\pi \cdot 2500 \cdot 8} = 4 \cdot 10^{-6} F = 4 \mu F$$

#### 2) Horní propust

Horní propust propouští do výškového reproduktoru frekvence nad 2,5 kHz. Má strmost 18 dB/oct. Je tvořená jednou cívkou a dvěma kondenzátory.

Výpočet cívky

$$L_2 = \frac{3Z_v^{16}}{8\pi f_{dh}^{17}} = \frac{3 \cdot 8}{8\pi \cdot 2500} = 3,8 \cdot 10^{-4} H = 0,38 mH$$

Výpočet kondenzátorů

---

<sup>14</sup> Impedance basového reproduktoru

<sup>15</sup> Dělicí frekvence dolní propusti

<sup>16</sup> Impedance výškového reproduktoru

<sup>17</sup> Dělicí frekvence horní propusti

$$C_2 = \frac{1}{3\pi f_{dh} Z_v} = \frac{1}{3\pi \cdot 2500.8} = 5,3 \cdot 10^{-6} F = 5,3 \mu F$$

$$C_3 = 3C_2 = 3 \cdot 5,3 = 15,9 \mu F$$

### 3) Kompenzace indukčnosti kmitačky

Slouží ke změně frekvenční závislosti reproduktoru. Provádí se pomocí jednoduchého RC členu. Je nejčastěji použit u basového reproduktoru. U výškového jako kompenzace slouží odporový dělič pro vyrovnání citlivost. RC člen obsahuje jeden rezistor a jeden kondenzátor.

Kondenzátor

$$C_k = \frac{L_e^{18}}{R_e^{219}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-4}}{6,2^2} = 3,9 \cdot 10^{-6} F = 3,9 \mu F$$

Rezistor

$$R_k = R_e = 6,2 \Omega$$

### 4) Vyrovnání citlivosti reproduktorů

K vyrovnání citlivosti reproduktorů slouží odporový dělič s dvojicí rezistorů. Snižujeme jím citlivost výškového reproduktoru. A = zisk v dB (záporný).

$$A = 83^{20} - 95^{21} = -12 dB$$

$$R_{37} = 2 \Omega$$

$$R_{36} = 4,4 \Omega$$

---

<sup>18</sup> Indukčnost cívky

<sup>19</sup> Činný odpor cívky

<sup>20</sup> Citlivost basového reproduktoru

<sup>21</sup> Citlivost výškového reproduktoru

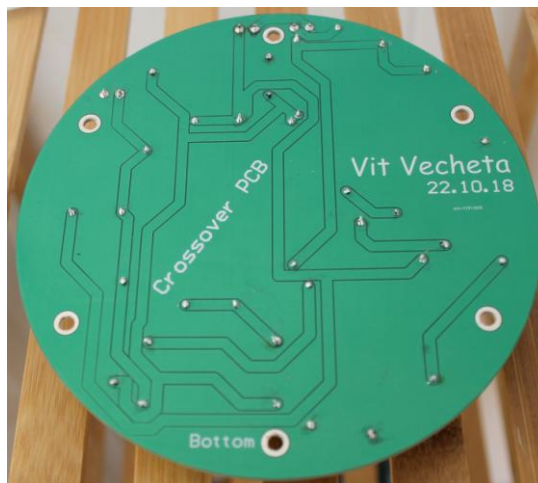


## Deska plošného spoje pro výhybku

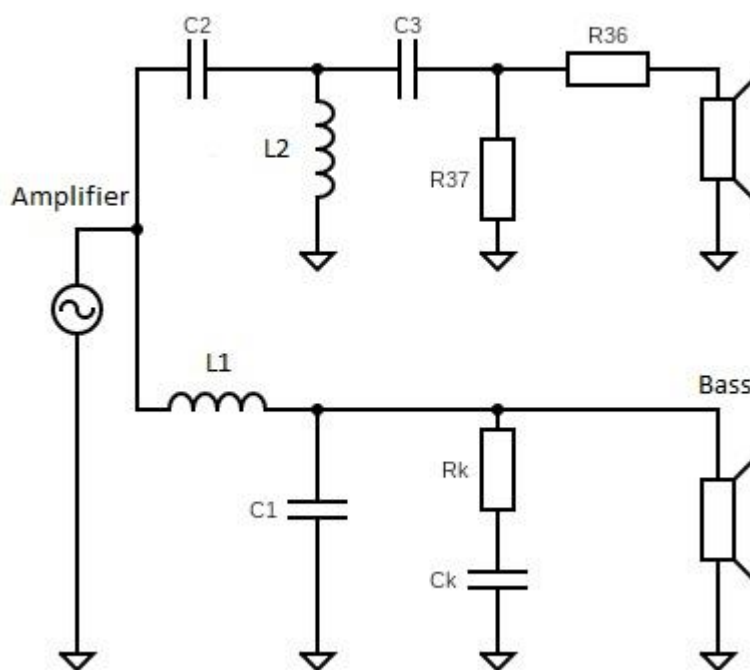
Výhybka je umístěná na samostatném kulatém jednostranném plošném spoji. Cívky jsou mezi sebou vyosené, aby nedocházelo k vzájemné indukci. Kondenzátory jsou kvalitní svitkové určené pro audio aplikace a rezistory s výkonem 20 W aby nedocházelo k zahřívání. Tloušťka mědi je zvolena pro větší zatížení. Vstupy a výstupy jsou řešeny pomocí svorek. Deska byla vytvořena v programu Circuitmaker [12]. Součástky jsou k výhybce přilepené, aby nedocházelo k rezonancím.



Obr. 2.20: Deska výhybky.



Obr. 2.19: Deska výhybky- spoje.



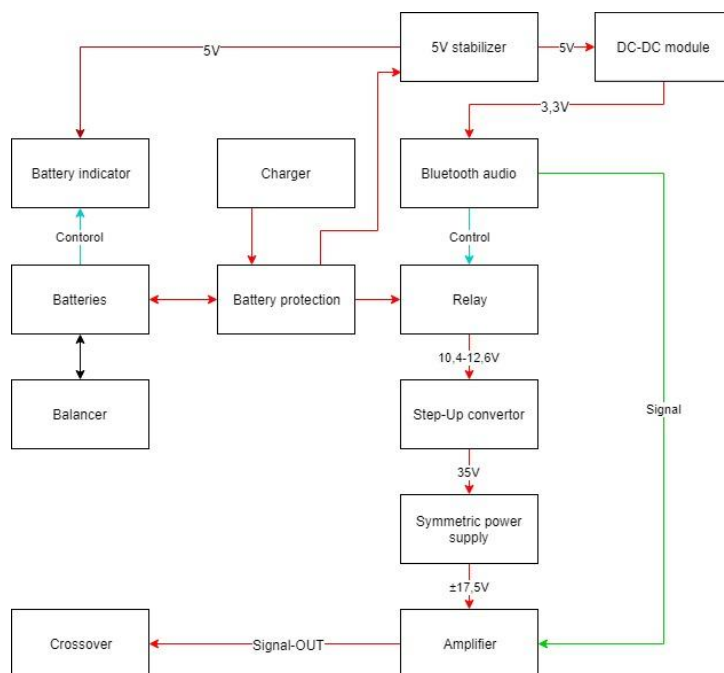
Obr. 2.18: Schéma výhybky.

## 2.6 ELEKTRONIKA

### Zesilovač

#### 1) Volba zesilovače

Od počátku návrhu jsem měl myšlenku použít zesilovač ve třídě A, B nebo AB. Ve většině malých a středních reproduktorů jsou používány zesilovače ve třídě D. Zesilovače třídy D disponují velkou účinností, menšími nároky na energii a díky tomu i na chlazení. [13] Podle mého názoru však nemají tak líbivý zvuk jako například zesilovače třídy AB. Právě ze zvukového hlediska byl použit zesilovač s obvodem LM1875. [14]



Obr. 2.21: Diagram elektroniky [25].

#### 2) Zesilovač s LM1875

Zesilovač vychází z návrhu Ondřeje Tyrichtera. [15] Tento zesilovač je v mém případě napájen symetrickým napětím  $\pm 17,5$  V. Maximální možný odebíraný proud je 4 A. Zesilovač vyžaduje při vyšších hlasitostech dostatečné chlazení. [15]

#### Provozní a technické parametry zesilovače

|                                                  |                                     |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Výstupní výkon (při THD 1 %)                     | 25 W                                |
| Dovolená zátěž                                   | $\geq 4 \Omega$                     |
| Zkreslení THD při P=20 W, RL=4 $\Omega$ , 1 KHz  | 0,022 %                             |
| Zkreslení THD při P=20 W, RL=4 $\Omega$ , 20 KHz | 0,07 %                              |
| Napájení                                         | symetrické $\pm 16$ V až $\pm 30$ V |
| Odstup rušivých napětí                           | 83 dB                               |

Tab. 6: Parametry zesilovače [15].

## Akumulátory

### 1) Volba akumulátorů

Jako zdroj energie pro celý reproduktor byly zvolené li-ion baterie Panasonic velikosti 18650 s jmenovitým napětím 3,6 V na jednom článku a kapacitou 3350 mAh. Výhodou li-ion baterií je jejich vysoká hustota energie. Nevýhodou je pak nutnost použití ochranné elektroniky.



Obr. 2.22: Panasonic NCR18650 [29].

### 2) Zapojení akumulátorů

Použitá byla akumulátorová li-ion baterie složená z šesti článků velikosti 18650. Dva články jsou spojeny paralelně. Takto vzniklé 3 dvojice článků jsou zapojeny sériově. Bylo tedy dosaženo jmenovitého napětí 10,8 V. A dvojnásobné kapacity oproti samostatnému článku.

### 3) Ochranné obvody

Li-ion baterie jsou při nesprávném zacházení velmi náchylné k poškození. Můžou začít hořet nebo dokonce vybuchnout. Aby se zabránilo kritickým stavům baterie, používá se ochranná elektronika. Ta nedovolí z baterií odebírat vyšší proud a udržuje baterie v ideálních mezích napětí, pokud je baterie příliš vybitá nebo nabitá dojde k jejímu odpojení. V případě využití sériového zapojení je nezbytné vyrovnávat napětí mezi jednotlivými články. Tyto obvody se nazývají balancery. Zabraňují rozdílu v napětí mezi jednotlivými články. Balancer i ochranná elektronika jsou umístěné v podobě modulu.

### 4) Indikace nabití

Indikátor ukazuje pomocí čtyř LED diod, kolik ještě přibližně zbývá energie v bateriích. Při vybíjení akumulátoru se zároveň zmenšuje jeho napětí. Indikátor vyhodnocuje napětí akumulátoru a podle jeho velikosti určí stav nabití baterie.

Indikátor pracuje na mikroprocesoru Attiny85. [16] Při plně nabitém stavu svítí všechny čtyři LED diody. S postupným vybíjením zhasínají. Při vybitém stavu začne poslední dioda blikat, aby upozornila na nutnost nabití. Reprodukter může pokračovat v přehrávání hudby, i když indikátor ukazuje vybitou baterii, ale při větších hlasitostech může docházet k nestabilitě a zkreslení. V menších hlasitostech je chování bezproblémové a nelze tímto způsobem reproduktor poškodit. Mikroprocesor je napájen z 5 V stabilizátoru. Indikátor se zapíná dlouhým podržením tlačítka a svítí pouze po dobu jeho stisku.

## Napájecí elektronika

### 1) Boost converter

Akumulátorová baterie má tedy napětí v plně nabitém stavu 12,6 V. Takový zdroj energie není dostatečný pro napájení zesilovače. Je tedy nutné zvýšit napětí. O to se stará boost converter. Jedná se o zařízení, které zvýší napětí z akumulátorové baterie na 35 V. Na desce je vloženo v podobě modulu. Tento modul má maximální výstupní proud 10 A. [17]



Obr. 2.23: Boost converter [32].

### 2) Generátor virtuální země

Pro napájení zesilovače je potřeba symetrické napájení. Zatím však máme pouze nesymetrické. Je tedy nutné vytvořit virtuální zem. K tomu nám slouží obvod LM675. [18] Pomocí něj vytvoříme napájecí napětí  $\pm 17,5$  V. To už je pro náš zesilovač dostatečné. Obvod LM675 vyzařuje při větší zátěži velké množství tepla. Je proto potřeba jej dostatečně chladit, aby nedošlo k jeho zničení.

### 3) Napájení Bluetooth modulu

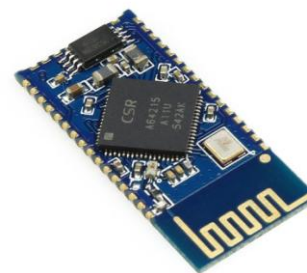
Bluetooth modul je uzpůsoben na napájecí napětí 3,3 V. Podle datasheetu je uveden jako maximální možný odebíraný proud 15 mA. Aby nedocházelo k rušení a proudovým smyčkám bylo napájení galvanicky odděleno. Oddělovací modul s výkonem 1 W má vstupní napětí 5 V a výstupní 3,3 V. Pro vytvoření napětí 5 V je použitý stabilizátor LF50 [19], který je napájený přímo z akumulátorů. Je tedy stále zapnutý.

### 4) Odpojování napájení

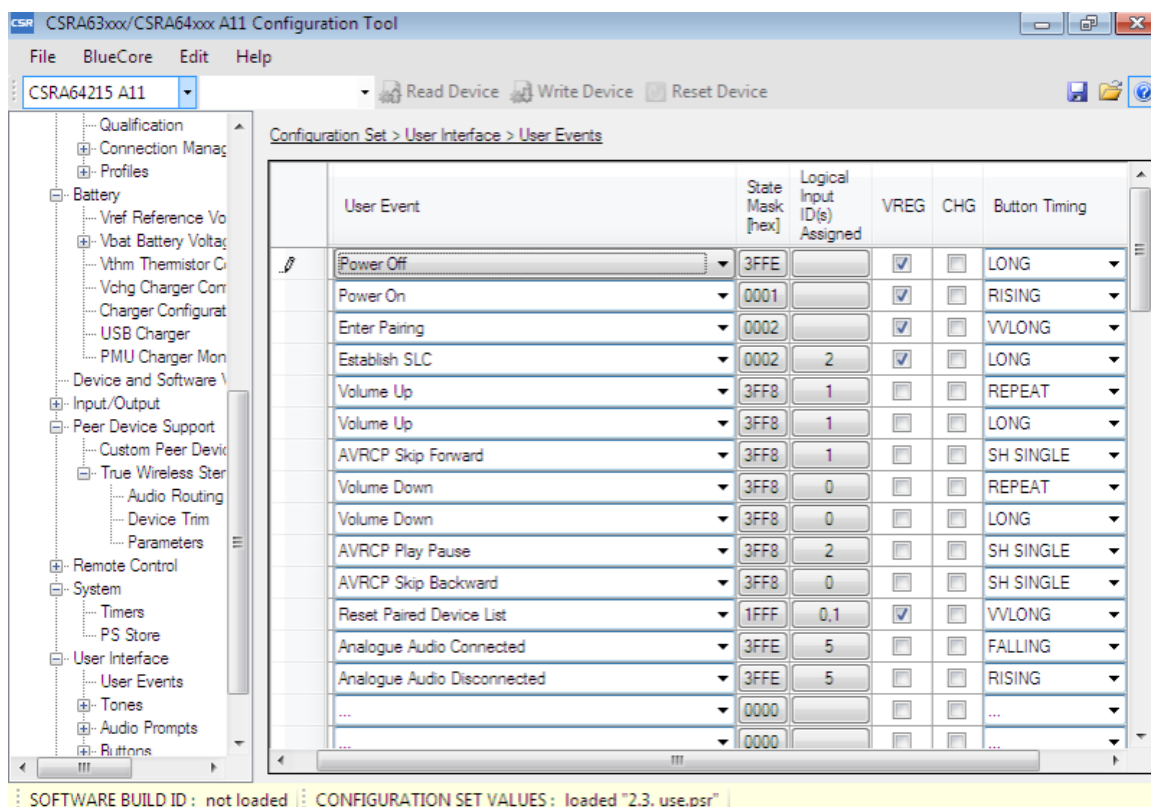
K vypínání všech výkonových částí zařízení slouží relé, které je spínáno Bluetooth modulem. Díky tomu dochází ke snížení klidového proudu při nepřehrávání hudby.

## Bluetooth modul [20]

Bluetooth modul pracuje na čipu CSRA64215. [21] Tento modul umožňuje bezdrátový přenos zvuku ze zařízení. Podporuje kvalitní přenosový kodex Aptx [22] a obsahuje spoustu pokročilých funkcí. Modul lze uzpůsobit pro konkrétní aplikaci. Je potřeba USB SPI converter, který nám umožní spojení mezi modulem a počítačem. Samotné upravování parametrů probíhá v programu CSRA64xxx Configuration Tool.



Obr. 2.24: Bluetooth modul [20].



Obr. 2.25: Programovací prostředí Bluetooth modulu.

## Chlazení

Je velmi důležité. Elektronika se zahřívá a při překročení určité teploty by došlo k jejímu zničení. O chlazení se stará chladič hliníkový chladič s teplotním odporem 3,2 K/W, ke kterému jsou připevněné nejvíce teplotně namáhané součástky. Jedná se o integrované obvody LM1875, LM675 a LM1084. Chlazení napomáhají průduchy v podstavě a přidavný 40 mm axiální ventilátor.



Obr. 2.26: Chladič V5583G [31].



Obr. 2.27: CSR SPI converter [30].

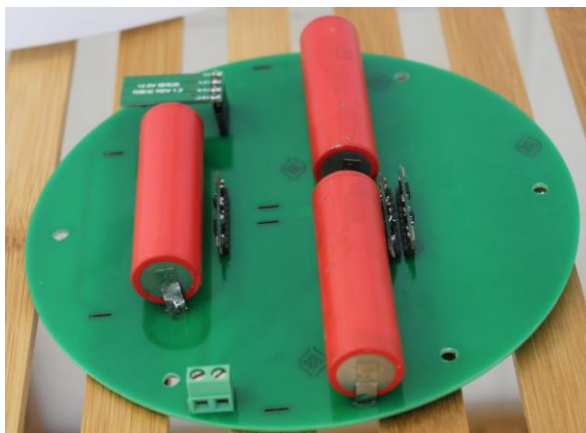


## Desky plošných spojů

Elektronika je umístěná na dvou deskách plošných spojů, které mají stejný rozměr jako deska výhybky. Při tvorbě desek jsem se snažil dodržovat návrhová pravidla podle literatury [23].

### 1) Deska baterie

Jedná se o jednovrstvou desku. Jsou na ní umístěné baterie a ochranná elektronika. Má stejné rozměry jako deska výhybky.



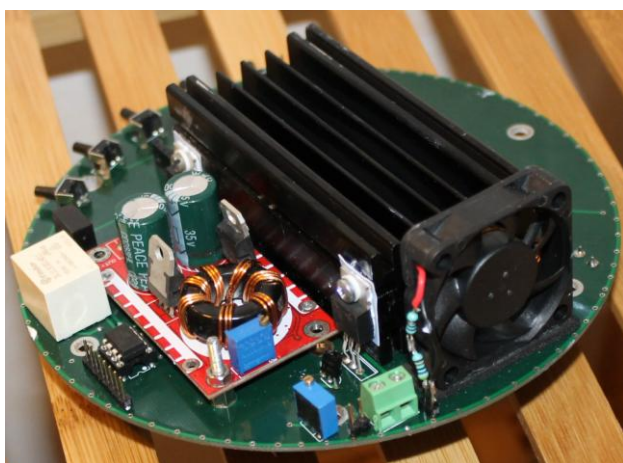
Obr. 2.28: Deska baterie.



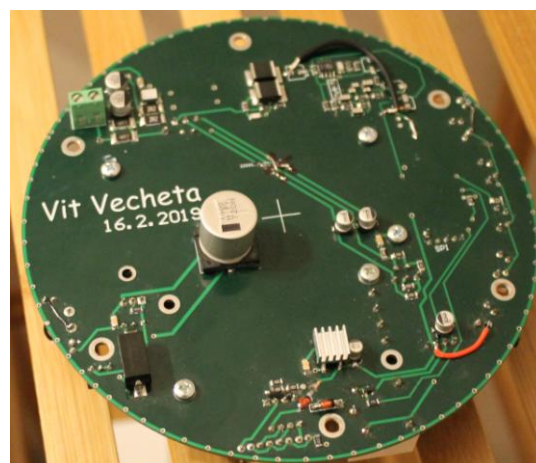
Obr. 2.29: Deska baterie- spoje.

### 2) Hlavní deska

Je na ní umístěn chladič a všechna elektronika včetně ovládacích tlačítek a indikačních diod. Jde o čtyřvrstvou desku plošného spoje. Její návrh byl jednou z nejtěžších částí celého projektu. Při osazování první verze bylo nalezeno několik návrhových chyb, které byly následně odstraněny. Na fotografiích je původní verze s viditelnými opravami a přemostěními na desce.



Obr. 2.30: Hlavní deska.



Obr. 2.31: Hlavní deska- spoje.

## Upevnění elektroniky do reproduktoru

Desky výhybky, baterií a hlavní elektroniky jsou k sobě připevněné distančními sloupky. Tyto sloupky jsou přichycené k šesti šroubům M3 k dílu podstavy.

## 2.7 OVLÁDÁNÍ

K ovládání reproduktoru slouží pět tlačítek. První tlačítko slouží pro zapínání a vypínání celého reproduktoru. Druhým tlačítkem se spouští indikace baterie. Zbýlá tři tlačítka umožňují přepínání skladeb, změnu hlasitosti a zastavování přehrávání.

Reproduktor obsahuje čtyři indikační diody pro zobrazení stavu nabití a jednu pro zobrazování stavu Bluetooth modulu. Při připojování zařízení bliká dioda v intervalu 200 ms, po připojení se blikání změní na 2500 ms.



Obr. 2.32: Spojení desek.

## 3 ZÁVĚR

I přes náročnost celého projektu si myslím, že se reproduktor podařil. Některé části sice nejsou podle mých původních představ a jsou změněné, ale zásadní vliv na výslednou kvalitu zvuku neznamenaají. Velmi pozitivní je moje zkušenost s využitím 3D tisku na výrobu ozvučnice. Bylo také velmi těžké dodržet časové termíny, kvůli dodacím lhůtám některých komponentů. Vše se nakonec zdárně povedlo a práci jsem dokončil.

V budoucnu chci ještě zapracovat na pár vylepšeních jako je například streamování hudby přes WI-FI nebo propojování reproduktorů a vytváření stereo zvuku. Chtěl bych také nechat změřit zvukové parametry reproduktoru, na které už v této práci bohužel nedošlo.

Naučil jsem se spoustu nových věcí a mé znalosti se posunuly zase o kus vpřed. Všem lidem, kteří si přečetli pouze úvod a závěr vřele doporučuji i zbylou část, můžete se z ní hodně dozvědět a přiučit.





Obr. 3.1: Výsledný produkt [24].

## 4 BIBLIOGRAFIE

1. TOMAN, Kamil. Reprodukory a reprosoustavy II.Dexon, 2010. ISBN 978-80-254-9510-0.
2. TROJAN, Stanislav. Lékařská fyziologie. Vyd. 4., přeprac. a dopl. Praha: Grada, 2003. ISBN 80-247-0512-5.
3. REICHL, Jaroslav. Tlakové reprodukory. <http://fyzika.jreichl.com>. [Online] 17. 8. 2007. [Citace: 8. 10. 2018.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/403-tlakove-reprodukory>.
4. REICHL, Jaroslav. Rezonanční frekvence reproduktoru. <http://fyzika.jreichl.com>. [Online] 18. 8. 2007. [Citace: 14. 9. 2018.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/394-rezonanci-frekvence-reproduktoru>.
5. LuKyss. Rozdělování ozvučnic. ReproMania.NET. [Online] 20. 4. 2005. [Citace: 24. 12. 2018.] <http://www.repromania.net/teorie/rozdelovani-ozvucnic.php>.
6. SPH-75-8. Monacor.com. [Online] MONACOR. [Citace: 24. 1. 2019.] <https://www.monacor.com/products/components/speaker-technology/hi-fi-speakers/sph-75-8/>.
7. DT25-N. Monacor.com. [Online] MONACOR. [Citace: 15. 2. 2019.] <https://www.monacor.com/products/components/speaker-technology/hi-fi-tweeters/dt-25n/>.
8. PRŮŠA, Josef. Prusa3D - 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši. [Online] 15. 12. 2014. [Citace: 20. 12. 2018.] <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>.
9. Inventor CAD program. [Online] Autodesk. [Citace: 4. 2. 2019.] <https://www.autodesk.cz/products/inventor/overview>.
10. Autodesk. Aplikace AutoCAD. Autodesk.com. [Online] Autodesk, 2017. [Citace: 4. 2. 2019.] Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/autocad/overview>.
11. Ultimaker Cura program. [Online] Ultimaker, 2019. [Citace: 3. 2. 2019.] <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software>.
12. CircuitMaker. Free PCB Design Software. [Online] Altium. [Citace: 4. 2. 2019.] <https://circuitmaker.com/>.
13. FIALA, Roman. Konstrukce audio výkonového zesilovače ve třídě A. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Copyright © [cit. 28.12.2018]. [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=84390](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84390).
14. LM1875 datasheet. Ti.com. [Online] Texas Instruments Incorporated, 5. 2004. [Citace: 12. 11. 2018.] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1875.pdf>.

15. TYRICHTER, Ondřej a PASTOROK, Roman. Thales analog. [Online] 28. 5. 2011. [Citace: 28. 12. 2018.]  
[http://thales.analog.cz/Amplifiers/LaDA2075/LaDA2075\\_Dokumentace.pdf](http://thales.analog.cz/Amplifiers/LaDA2075/LaDA2075_Dokumentace.pdf).
16. Attiny 85 datasheet. Mouser.com. [Online] Atmel, 8. 2013. [Citace: 26. 1. 2019.]  
<http://www.mouser.com/ds/2/268/Atmel-2586-AVR-8-bit-Microcontroller-ATtiny25-ATtiny1065586.pdf>.
17. Boost converter. tinytronics.nl. [Online] [Citace: 15. 12. 2018.]  
<https://www.tinytronics.nl/shop/en/dc-dc-converters/dc-dc-adjustable-step-up-boost-converter-150w>.
18. LM675 datasheet. Ti.com. [Online] Texas Instruments, 3. 2013. [Citace: 20. 11. 2018.]  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm675.pdf>.
19. LF50 datasheet. [Online] STMicroelectronics, 2. 2014. [Citace: 24. 1. 2019.]  
<http://www.farnell.com/datasheets/1806095.pdf>.
20. Electronics, Tinyos. Bluetooth Module Datasheet. <https://www.tinyosshop.com/>. [Online] Tinyos Electronics, 29. 1. 2016. [Citace: 20. Leden 2019.]  
<https://www.tinyosshop.com/datasheet/TS64215%20datasheet.pdf>.
21. CSRA 64215 datasheet. Tinyosshop.com. [Online] Qualcomm Technologies International, Ltd., 2015. [Citace: 4. 12. 2018.]  
<https://www.tinyosshop.com/datasheet/CSRA64215%20QFN%20Data%20Sheet.pdf>.
22. Qualcomm.com. [Online] Qualcomm. [Citace: 20. 11. 2018.]  
<https://www.qualcomm.com/solutions/voi>.
23. ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu. Praha : BEN-technická literatura, 2010. ISBN isbn978-80-7300-266-4.
24. VAŠÍČEK, Michal. Fotky reproduktoru. Třebíč 2019.
25. Flowchart Maker & Online Diagram Software. [Online] [Citace: 10. 2. 2019.]  
<https://www.draw.io/>.
26. Wikipedie. [Online] [Citace: 22. 12. 2018.]  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Reproduktor#/media/File:Loudspeaker\\_scheme.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Reproduktor#/media/File:Loudspeaker_scheme.jpg).
27. Wikipedia. [Online] [Citace: 15. 12. 2018.]  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Fletcher–Munson\\_curves](https://en.wikipedia.org/wiki/Fletcher–Munson_curves).
28. Wikipedia. [Online] [Citace: 15. 12. 2018.]  
<https://en.wikipedia.org/wiki/File:Tweeter.png>.

29. Li-ion 18650. [Online] BATTEX. [Citace: 11. 3. 2019.]  
<http://shop.battex.cz/vyrobky/NCR18650GA.php>.
30. CSR USB SPI converter. [Online] Tinyosshop.com. [Citace: 8. 1. 2019.]  
[https://www.tinyosshop.com/index.php?route=product/product&product\\_id=876](https://www.tinyosshop.com/index.php?route=product/product&product_id=876).
31. Chladič V5583G. [Online] DigiKey Electronics Canada. [Citace: 13. 1. 2019.]  
<https://www.digikey.ca/product-detail/en/assmann-wsw-components/V5583G/AE10815-ND/3511512>.
32. Boost converter. Arduino-shop.cz. [Online] [Citace: 8. 3. 2019.]  
<https://arduino-shop.cz/arduino/5463-step-up-menic-150w-z-12-32v-na-12-35v.html>.

# 5 SEZNAM PŘÍLOH

## **Výkresy součástí**

01-SEM-2019  
02-SEM-2019  
3A-SEM-2019  
3B-SEM-2019  
4A-SEM-2019  
4B-SEM-2019  
05-SEM-2019  
06-SEM-2019  
07-SEM-2019  
27-SEM-2019

10 výkresů formátu A3

## **Výkresy sestav**

S1-SEM-2019  
S2-SEM-2019  
S3-SEM-2019  
S4-SEM-2019

4 výkresy formátu A3

## **Elektronická schémata**

Elektronika 1  
Elektronika 2  
Elektronika 3  
Elektronika 4

4 výkresy formátu A4