

# REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY

MUNI  
ARTS

**Kurz:**      **Studiová technika II**

---

**Autor:**      Jiří Schimmel

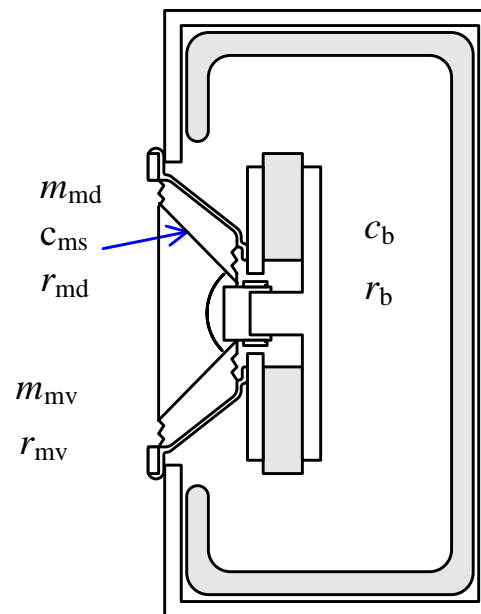
# Reproduktorové systavy

- Pomocí současných technologií konstrukce elektroakustických měničů nelze zkonstruovat reproduktor, který by měl dostatečně vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku v celém pásmu akustických kmitočtů
- Pro věrnou reprodukci zvukových signálů je proto nutné používat dvou i více reproduktorů odlišných konstrukcí spojených do **reproduktorové soustavy**
  - hlubokotónový reproduktor (woofer) slouží k reprodukci nízkých kmitočtů
  - vysokotónový reproduktor (tweeter) slouží k přenosu vysokých kmitočtů
- O rozdělení spektra reprodukováného signálu mezi reproduktory soustavy, které jsou pro přenos daného pásma určeny, se stará **kmitočtová výhybka**
- Reproduktory jsou společně umístěny do **reproduktorové ozvučnice**, která je nutná pro zamezení tzv. *akustickému zkratu* u reproduktorů s otevřenou konstrukcí a také ovlivňuje přenos hlubokotónového reproduktoru.

# Ozvučnice jako akustická soustava

# Ozvučnice jako akustická soustava

- Objem vzduchu uzavřený v ozvučnici za reproduktorem se chová jako přidavná poddajnost, která tlumí pohyb membrány



# Translační akustická soustava

- Místo síly působící na hmotný bod bude budičem generátor akustického tlaku působícího silou  $F$  na plochu  $S$

$$F = pS$$

- Objemové posunutí  $Y$ : pohyb plochy  $S$  rychlostí  $v$  při výchylce  $y$  z rovnovážné polohy

$$Y = Sy$$

- Akustická objemová rychlost: časová změna objemového posunutí  $Y$

$$W = \frac{dY}{dt} = S \frac{dy}{dt} = Sv$$

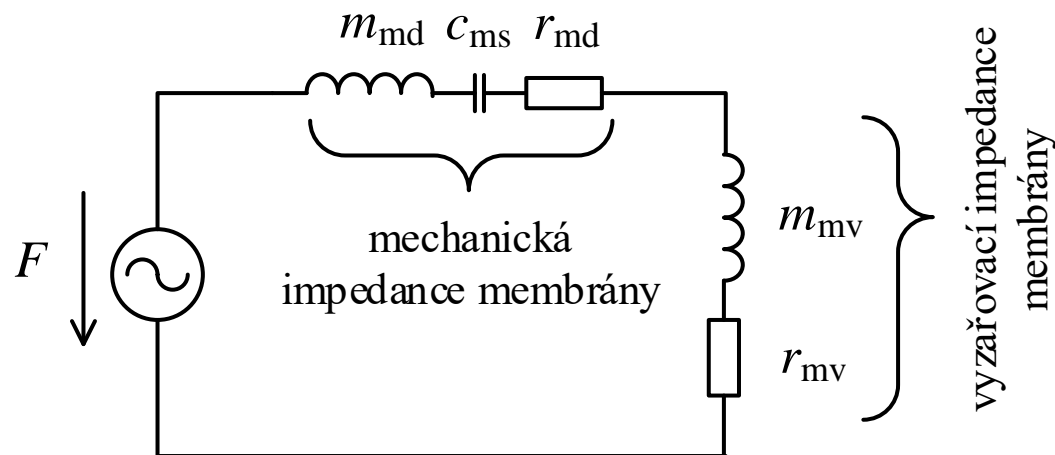
- Elektroakustická analogie:

- Akustický tlak  $p \sim$  síla  $F \Rightarrow$  napětí  $u$
- Akustická objemová rychlost  $W \sim$  rychlost  $v \Rightarrow$  proud  $i$

# Translační akustická soustava

- Akustická soustava se soustředěnými parametry:
  - homogenní
  - malé dynamické změny (lineární soustava)
  - vlnová délka nejvyššího kmitočtu musí být tak velká, abychom mohli předpokládat soufázové kmitání
- Uvažujeme translační pohyb
- Základní prvky akustických soustav:
  - akustická hmotnost  $m_A$  ~ mechanická hmotnost  $m_M$ , akumulace kinetické (akustické objemové) energie
  - akustická poddajnost  $c_A$  ~ mechanická poddajnost  $c_M$ , akumulace potenciální (tlakové) energie
  - akustický odpor  $r_A$  ~ mechanický odpor  $r_M$ , rozptyl vnitřním třením částic v teplo

# Náhradní schéma mechanické soustavy reproduktoru

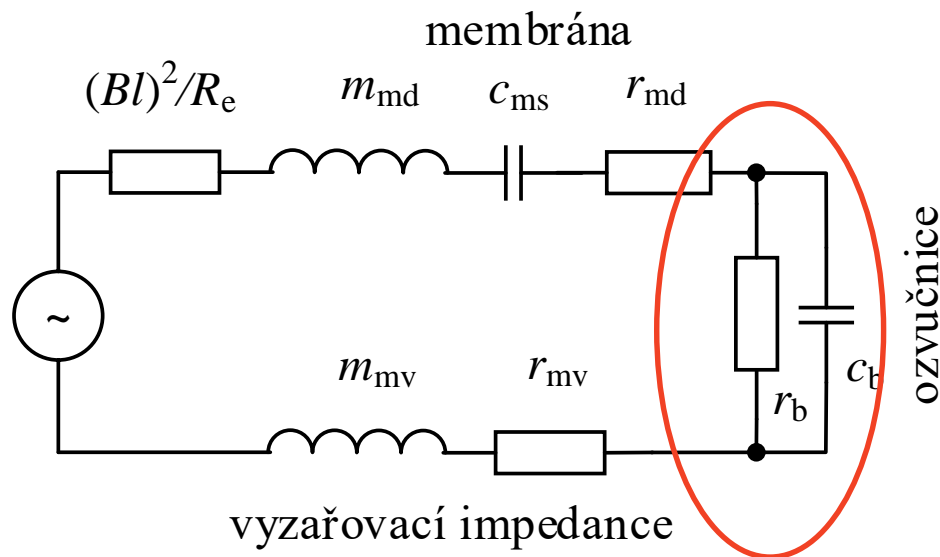


$m_{md}$  – hmotnost membrány (včetně kmitací cívky a jejího uložení)

$c_{ms}$  – poddajnost uložení membrány (okrajů i středící membrány)

$r_{md}$  – mechanický odpor zahrnující vliv ztrát při kmitání membrány

# Náhradní schéma mechanické soustavy reproduktoru v ozvučnici



$c_b$  – poddajnost objemu ozvučnice

$m_{mv}$ ,  $r_{mv}$  – vyzařovací impedance membrány

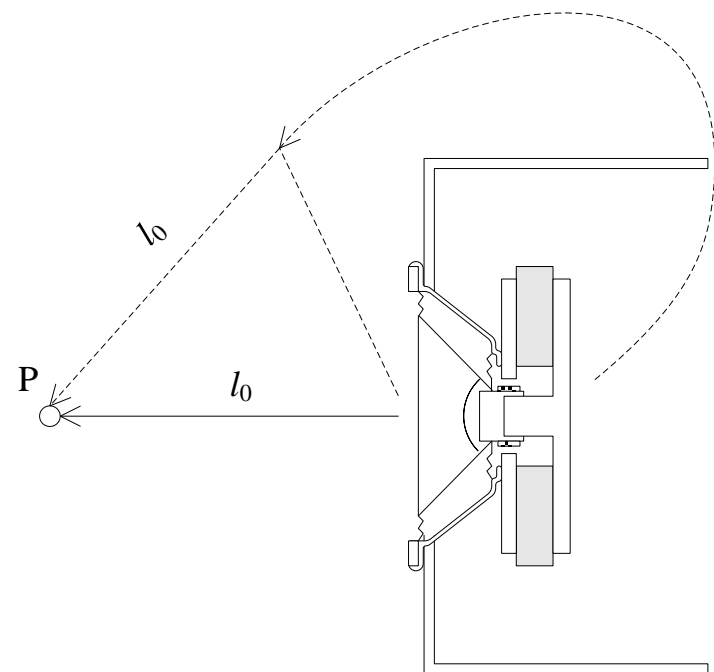


# Otevřená ozvučnice

- Akustický zkrat omezen jenom částečně
- Mezní kmitočet:

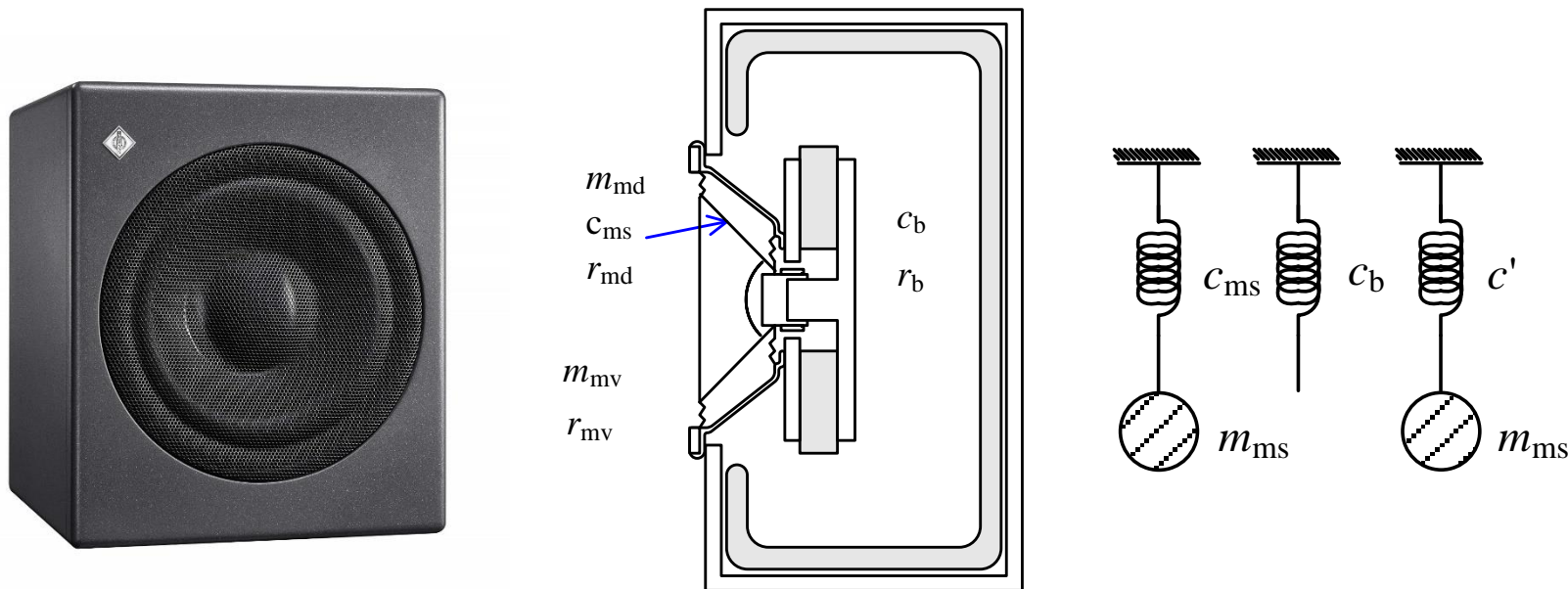
$$f_o = \frac{55}{h \sqrt{1 + \frac{a}{2h}}}$$

$a$  – šířka ozvučnice,  $h$  – hloubka ozvučnice

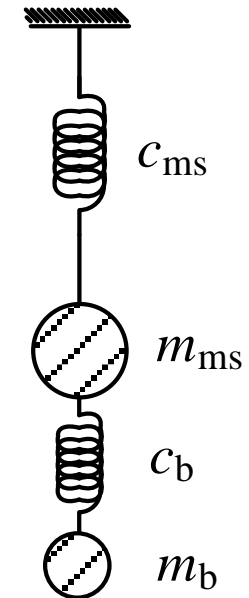
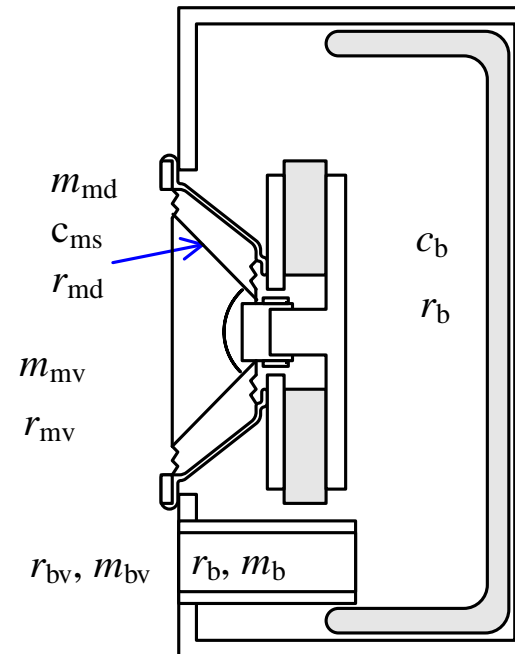


# Uzavřená ozvučnice

- Energie zadní zvukové vlny přeměněna v teplo  $\Rightarrow$  snížení účinnosti reproduktoru
- Objem ozvučnice představuje další poddajnost, dojde ke snížení citlivosti reproduktoru
- Soustava reproduktoru a ozvučnice se chová jako horní propust 2. řádu



# Ozvučnice jako akustická soustava



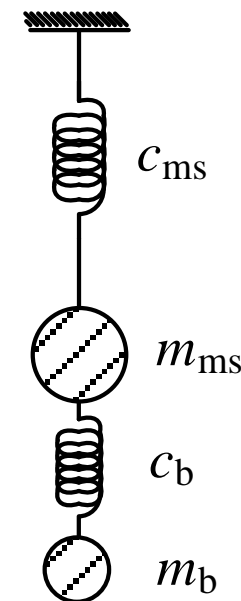
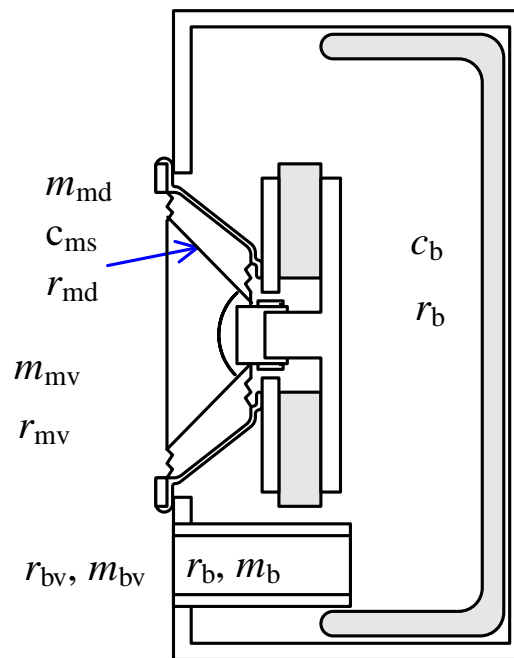
# Ozvučnice typu bassreflex

- Vnitřní objem ozvučnice je s prostředím spojen bassreflexovým nátrubkem → ozvučnice se chová jako Helmholtzův rezonátor, v jehož stěně je umístěn reproduktor



# Ozvučnice typu bassreflex

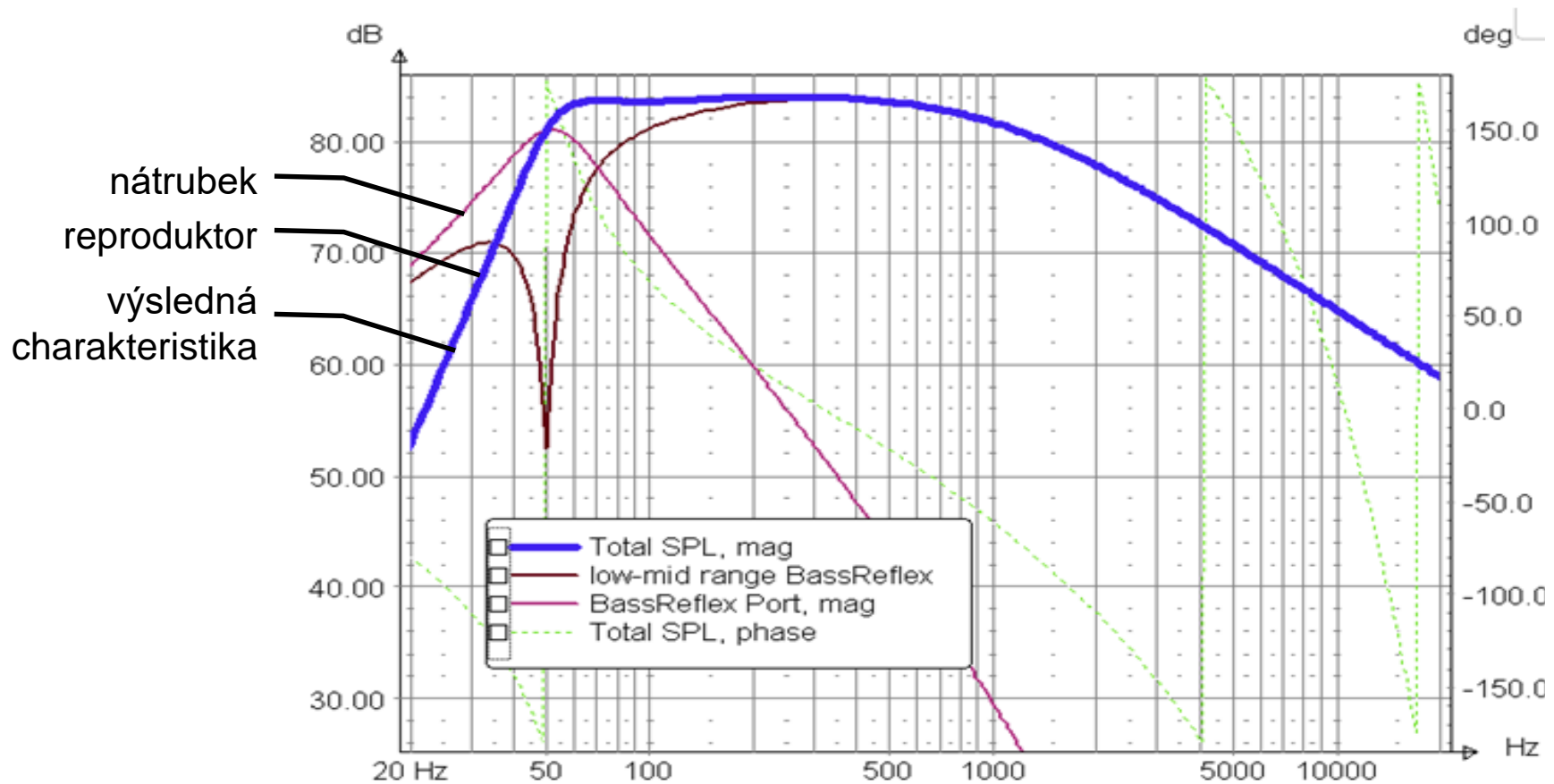
- Bassreflexový nátrubek společně s objemem ozvučnice reprezentuje další poddajnost a hmotnost, jedná se o dva rezonanční obvody



# Ozvučnice typu bassreflex

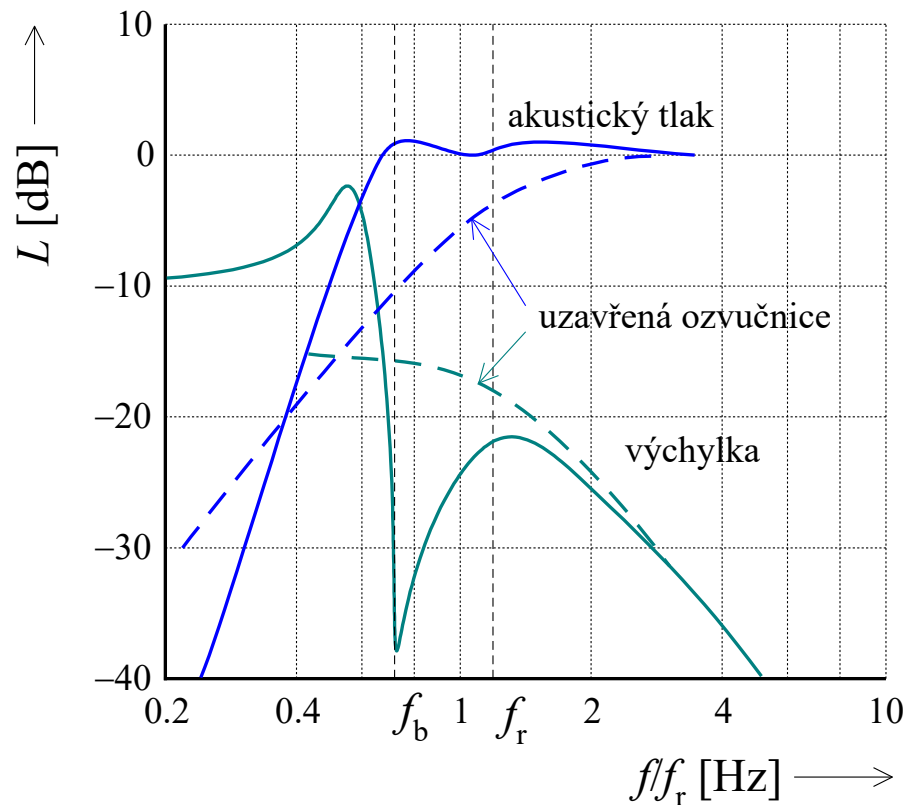
- Nad rezonančním kmitočtem je signál vyzařovaný bassreflexovým nátrubkem ve fázi se signálem vyzářeným přední stranou reproduktoru
- Při rezonančním kmitočtu je většina akustické energie vyzářena plochou nátrubku.
- Soustava reproduktoru a ozvučnice se chová jako horní propust 4. řádu

# Ozvučnice typu bassreflex



# Ozvučnice typu bassreflex

- Výchylka membrány narůstá pod rezonančním kmitočtem →
  - nelineární zkreslení
  - mechanicky nebezpečné pro reproduktor
- Turbulentní proudění kolem okrajů nátrubku





# Ozvučnice typu bassreflex

- Výhody:
  - větší účinnost
  - menší potřebný objem skříně
  - menší dolní mezní kmitočet
  - nižší zkreslení při rezonančním kmitočtu a nad ním
- Nevýhody:
  - velké zkreslení pod rezonančním kmitočtem
  - složitější návrh a konstrukce
  - nelaminární proudění vzduchu v nátrubku
  - složitější umístování (20 cm od překážky)

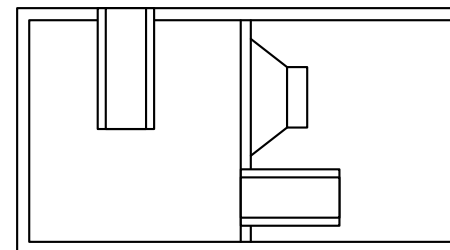
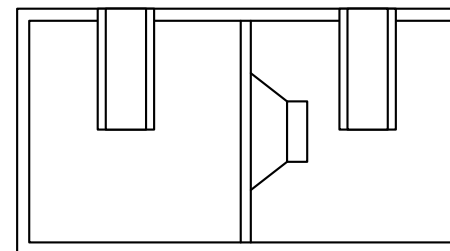
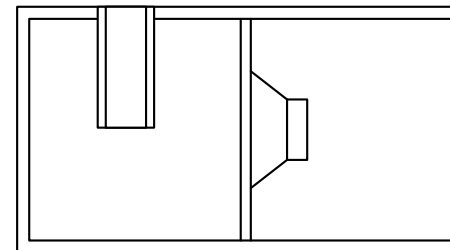
# Ozvučnice typu pásmová propust

- Subwoofer: speciální reproduktorová soustava pro reprodukci nízkých kmitočtů, doplněk reproduktorových soustav pro zbytek pásma
- Minimálně dvě komory, reproduktory se instalují na příčku mezi komorami
- Dochází k filtraci zvukového signálu v komoře (chová se jako filtr typu pásmová propust)



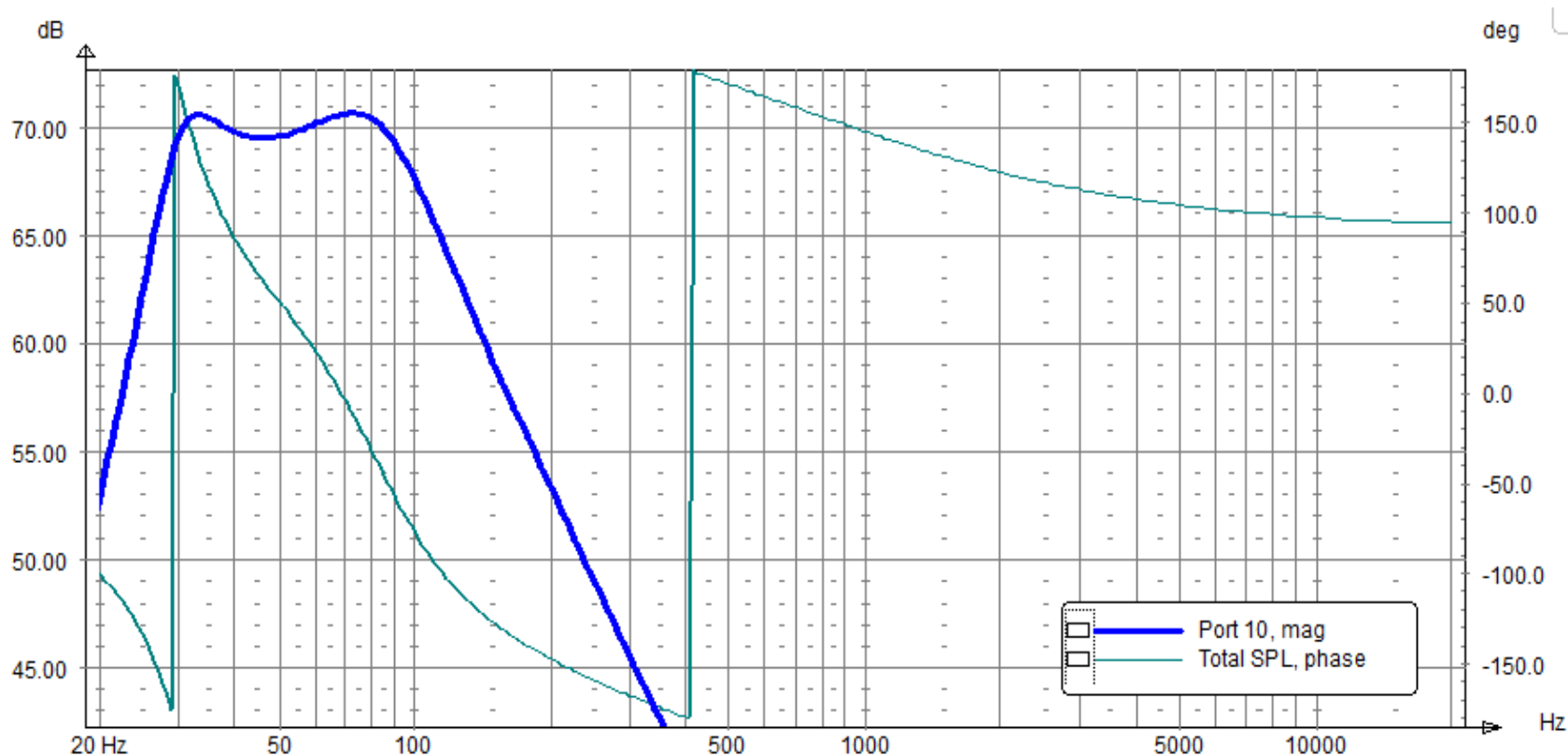
# Ozvučnice typu pásmová propust

- Konstrukce s jedním reproduktorem:
  - Single reflex bandpass  
dvě komory, jedna z nich s nátrubkem  
pásmová propust 4. řádu
  - Dual reflex bandpass, paralelní řazení  
dvě komory, každá s nátrubkem  
pásmová propust 6. řádu
  - Dual reflex bandpass, sériové řazení  
dvě komory, propojené nátrubkem, jedna z nich  
s druhým nátrubkem  
pásmová propust 6. řádu



# Ozvučnice typu pásmová propust

- Ozvučnice Dual Reflex Bandpass, paralelní řazení



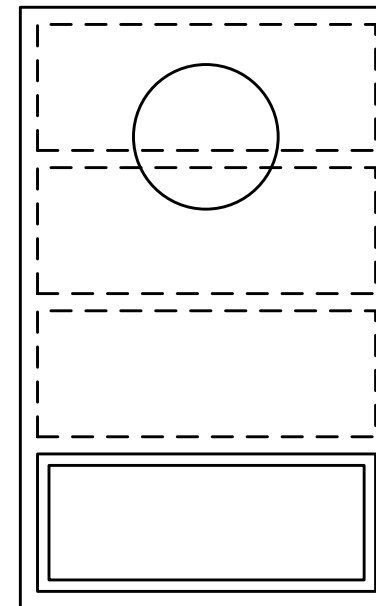
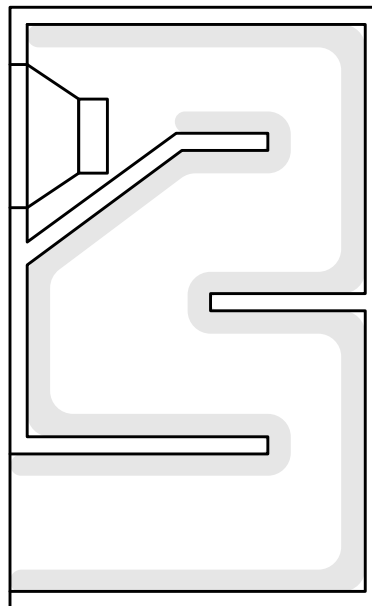
# Ozvučnice typu transmission line

- Zpoždění signálu ve zvukovodu, signál ze zvukovodu vychází se stejnou fází jako signál z reproduktoru.
- Délka zvukovodu by měla odpovídat čtvrtině nebo polovině vlnové délky

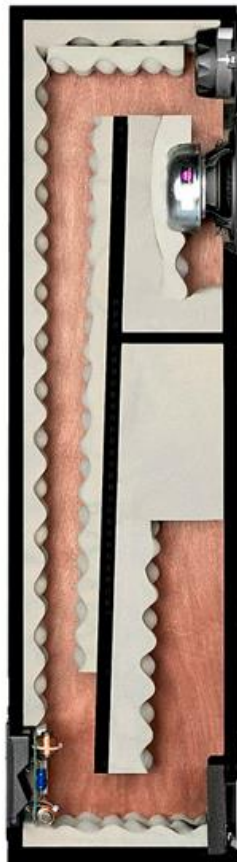
$$l = \frac{\lambda}{n} = \frac{c_0}{nf_m}$$

$f_m$  – rezonanční kmitočet

$n = 2$  nebo  $4$

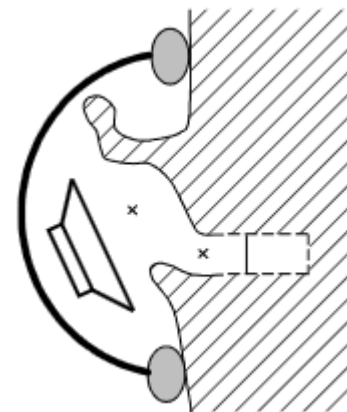


# Ozvučnice typu transmission line

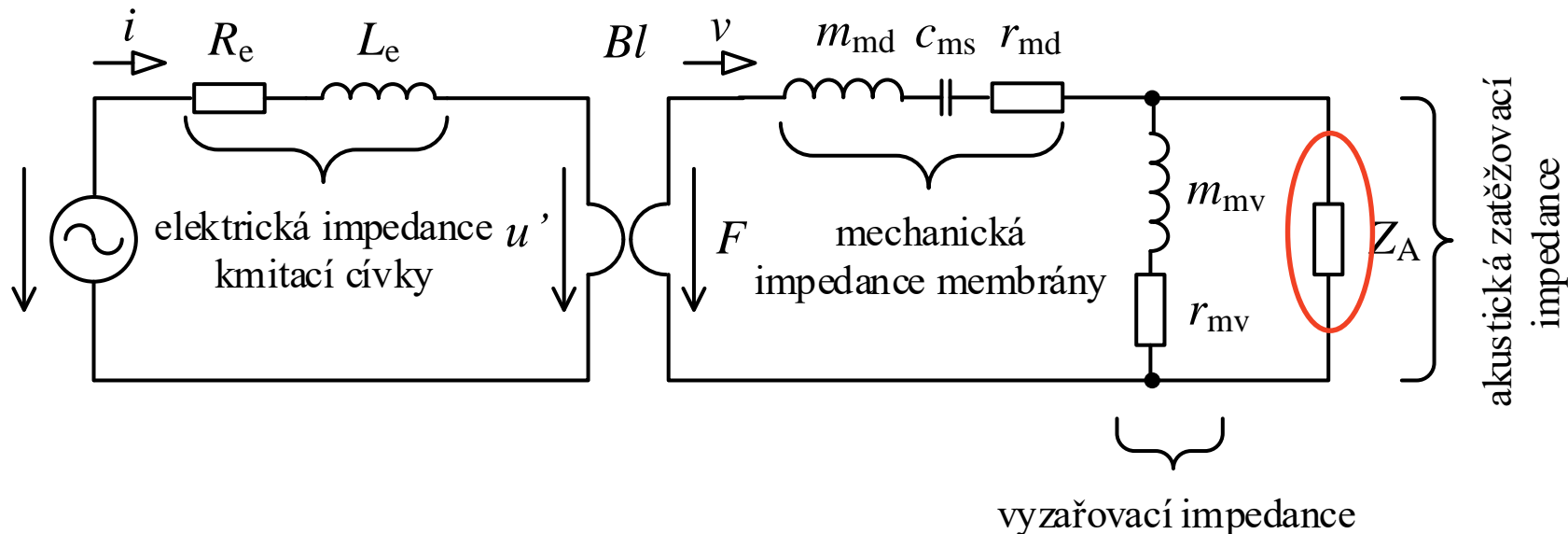


# Akustická soustava sluchátka

- Membrána reproduktoru sluchátka je zatížena akustickou soustavou
  - krytu za reproduktorem (objem, případně hmotnost a třecí odpor vzduchu v akustických kanálcích)
  - ucha (zejména objemu mezi membránou a bubínkem)



# Náhradní schéma mechanické soustavy sluchátka



$R_e, L_e$  – stejnosměrný odpor a indukčnost cívky

$m_{md}$  – hmotnost membrány (včetně kmitací cívky a jejího uložení)

$c_{ms}$  – poddajnost uložení membrány (okrajů i středící membrány)

$r_{md}$  – mechanický odpor zahrnující vliv ztrát při kmitání membrány

$m_{mv}, r_{mv}$  – vyzařovací impedance



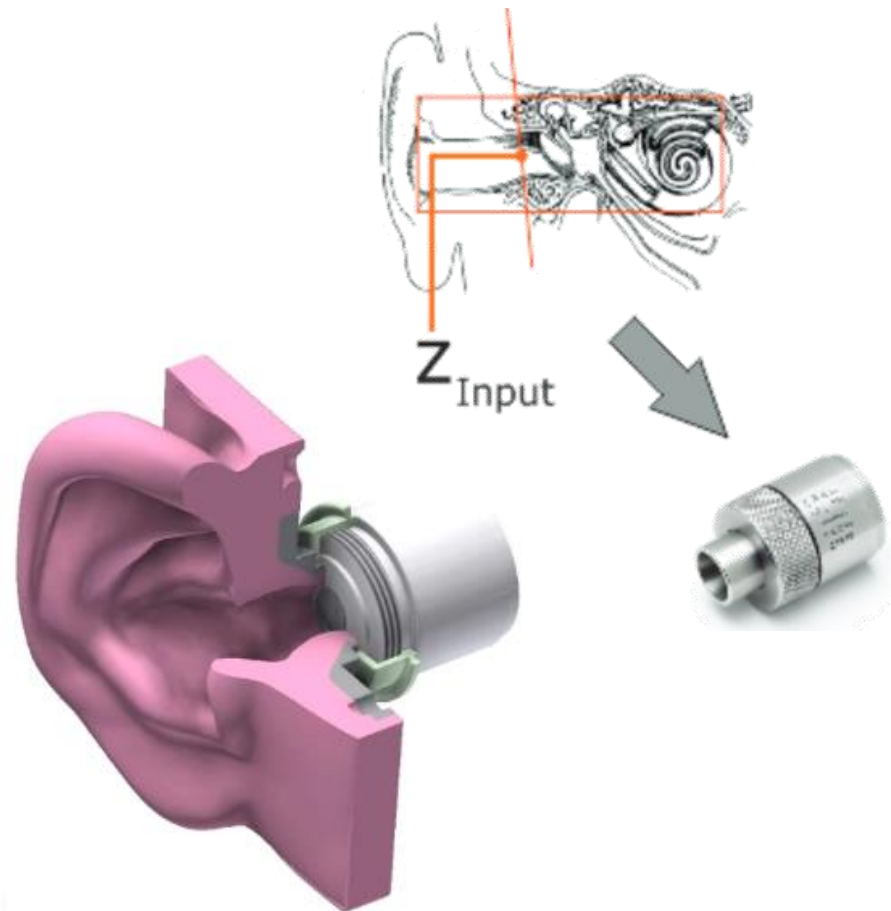
# Simulace akustické impedance ucha

## a) Akustický vazební člen (acoustic coupler):

- komůrka definovaného objemu spojující měřené sluchátko a měřicí mikrofon, simuluje pouze objem, nepřesné na vyšších kmitočtech

## b) Simulátor ucha (ear simulator):

- simulátor uzavřeného ucha
- simulátor vnějšího ucha
- simulátor boltce



# Akustické vazební členy

- a) IEC 60318-3: akustický vazební člen o objemu 6 cm<sup>3</sup> pro kalibraci náušních sluchátek pro audiometrii, rozsah 125 Hz až 8 kHz
- b) IEC 60318-5 : akustický vazební člen o objemu 2 cm<sup>3</sup> pro vsuvná sluchátka a naslouchátka, rozsah 125 Hz až 8 kHz

a)

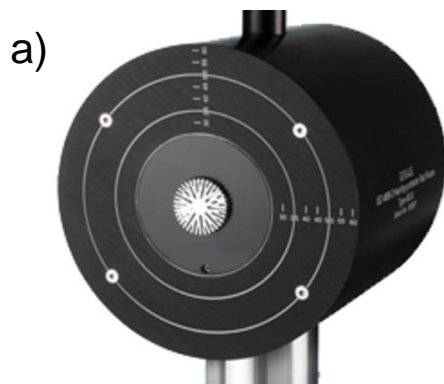


b)



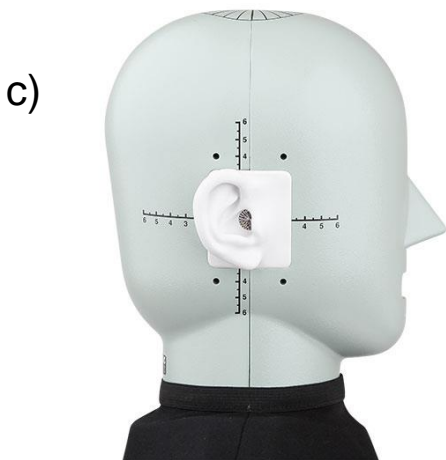
# Simulátory ucha

- ITU P.57 Type 3: typ 2 rozšířený o válcovou dutinu simulující dutinu vnějšího ucha
  - a) Typ 3.1: simulátor spodní části vnějšího ucha, rozšíření typu 2 o 10 mm dutinu zakončenou deskou, doporučený pro sluchátka vkládaná do dutiny boltce, akustický tlak je snímán na DRP, pomocí tabulek se koriguje na ERP, pokud je potřeba
  - b) Typ 3.2: zjednodušený simulátor vnějšího ucha, typ 3.1 s definovaným pronikáním simulujícím reálné ztráty při netěsnosti se stupni „high“ a „low“, doporučený pro náušní sluchátka a sluchátka vkládaná za záhyb boltce s tuhými náušníky pro telekomunikační aplikace, simulují akustickou impedanci a přenos na ERP



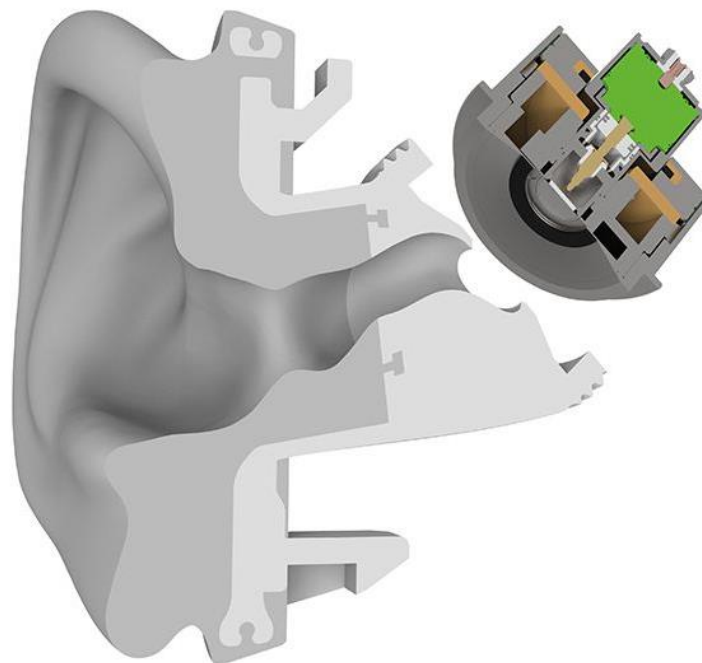
# Simulátory ucha

- c) Typ 3.3: simulátor boltce, zakončení reálným zvukovodem a boltcem, vhodný pro jakýkoliv typ sluchátek, akustický tlak je snímán na DRP, pomocí tabulek se koriguje na ERP, pokud je potřeba
- d) Typ 3.4: simulátor boltce (zjednodušený), typ 2 s rozšířením zvukovodu a zjednodušeným boltcem, simulace netěsností pro přítlaky 1 až 13 N, doporučený pro všechny typy sluchátek kromě náušních a vkládaných za záhyb boltce, akustický tlak je snímán na DRP, pomocí tabulek se koriguje na ERP, pokud je potřeba



# Simulátor ucha (ITU P.57 typ 3.3)

- Různé tvary a tvrdosti boltce



# Upínací přípravky



# Reproduktorové výhybky

# Dělená reprodukce

- Nelze vyrobit reproduktor, který by dokázal reprodukovat celé spektrum zvukových signálů
- Je nutné použít více reproduktorů a sady kmitočtových filtrů pro rozdělení spektra zvukového signálu:
  - reproduktor s větším průměrem membrány pro reprodukci nízkých kmitočtů
  - reproduktor s malou membránou pro reprodukci vyšších kmitočtů
- Řešení
  - samostatné reproduktory
  - souosé (koaxiální) reproduktory



# Souosé reproduktory

- a) samostatný vysokotónový reproduktor umístěný v ose hlubokotónového
- b) dva souosé kmitací systémy



membrána vysokotónového  
měniče

membrána hlubokotónového měniče

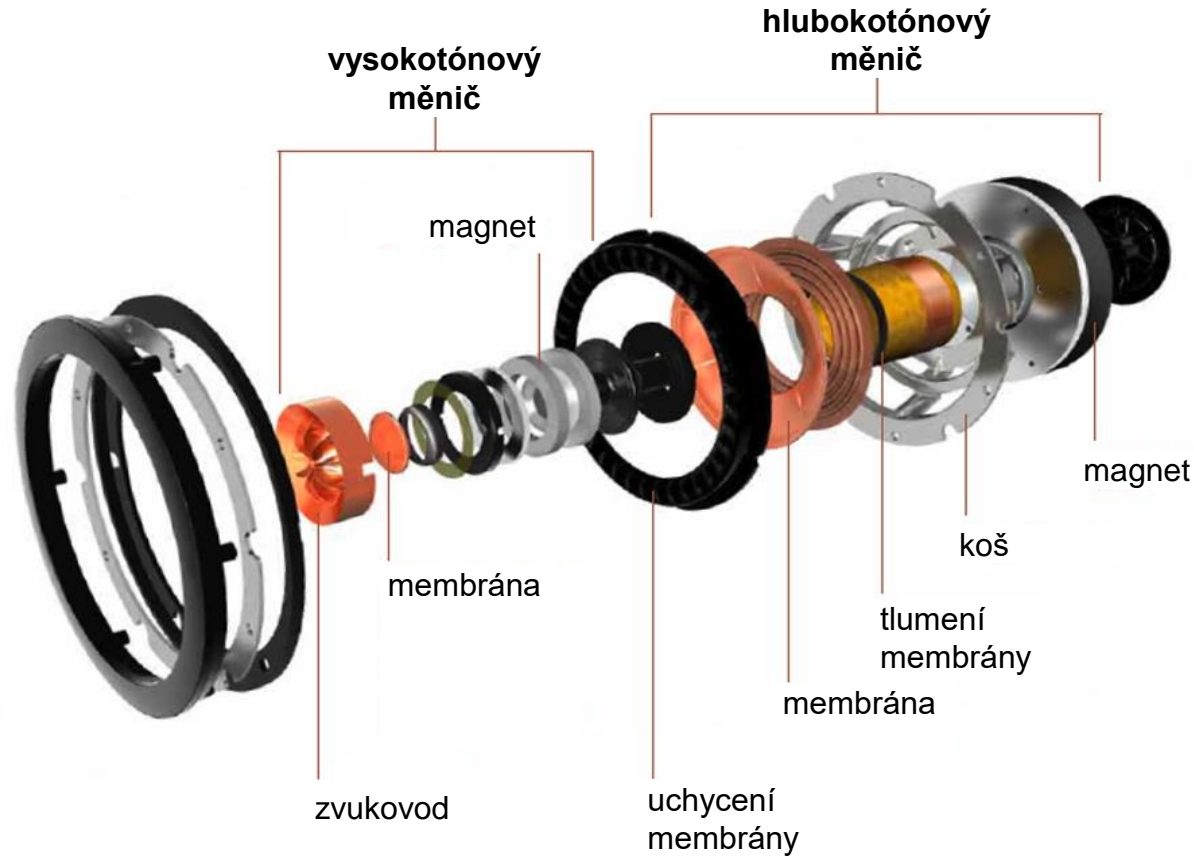
mřížka

magnet hlubokotónového měniče

uchycení membrány  
hlubokotónového měniče



# Souosé reproduktory



# Dělená reprodukce u sluchátek



# Dělená reprodukce u sluchátek

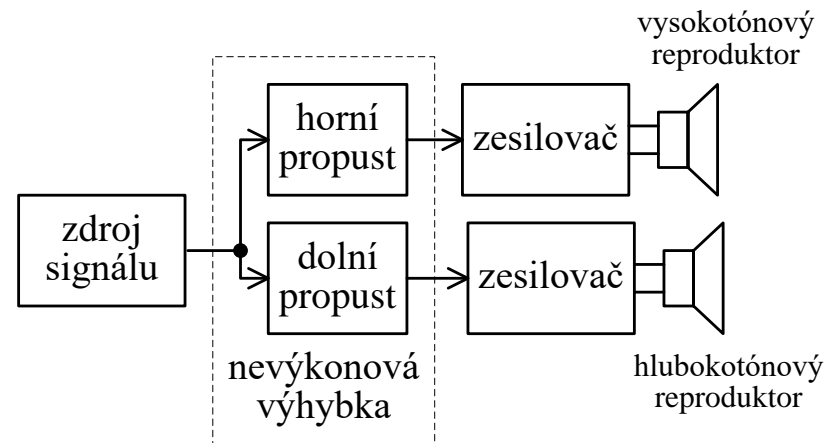
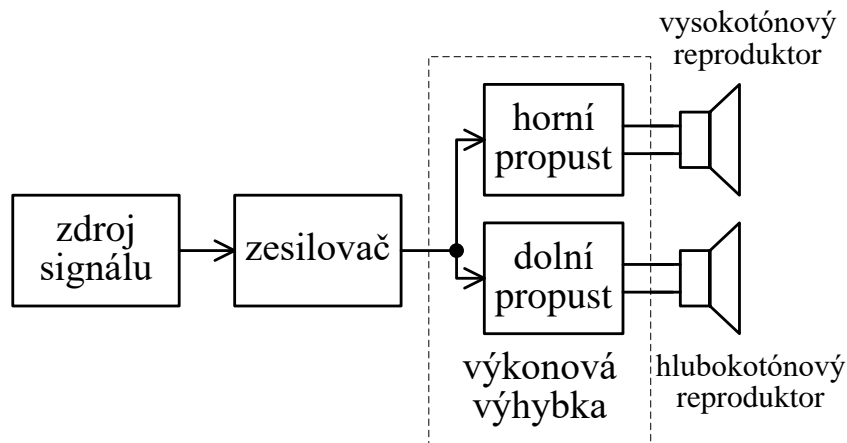


# Reproduktorové výhybky

- Reproduktorová výhybka je systém, jehož vstupní veličinou je budící napětí a výstupní veličinou je akustický tlak
- Účel reproduktorové výhybky: rozdělení spektra signálu tak, aby každý z reproduktorů reprodukoval tu část spektra, kterou je schopen reprodukovat s nejmenším zkreslením:
  - filtr typu DP pro hlubokotónový reproduktor
  - filtr typu PP pro středotónový reproduktor
  - filtr typu HP pro vysokotónový reproduktor

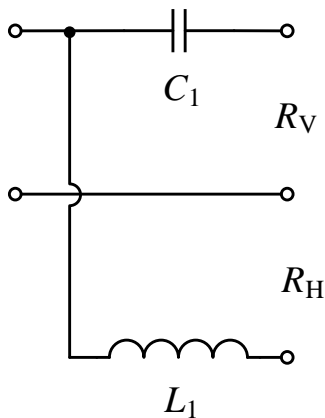
# Reproduktorové výhybky

- Výkonové (pasivní) výhybky
- Nevýkonové (aktivní) výhybky



# Zapojení filtrů reproduktorové výhybky

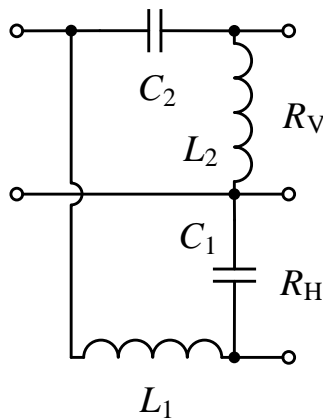
6 dB/oct.



$$L_1 = \frac{R_H}{2\pi f_{MH}}$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_{MV} R_V}$$

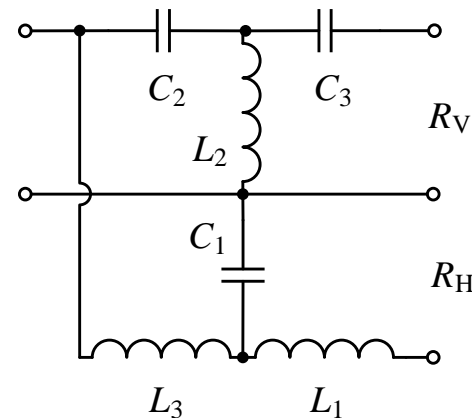
12 dB/oct.



$$L_1 = \frac{R_H}{\pi f_{MH}} \quad C_1 = \frac{1}{4\pi f_{MH} R_H}$$

$$L_2 = \frac{R_V}{\pi f_{MV}} \quad C_2 = \frac{1}{4\pi f_{MV} R_V}$$

18 dB/oct.



$$L_1 = \frac{R_H}{4\pi f_{MH}} \quad C_1 = \frac{2}{3\pi f_{MH} R_H}$$

$$L_2 = \frac{3R_V}{8\pi f_{MV}} \quad C_2 = \frac{1}{3\pi f_{MV} R_V}$$

$$L_3 = 3L_1 \quad C_3 = 3C_2$$



# Návrh reproduktorové výhybky

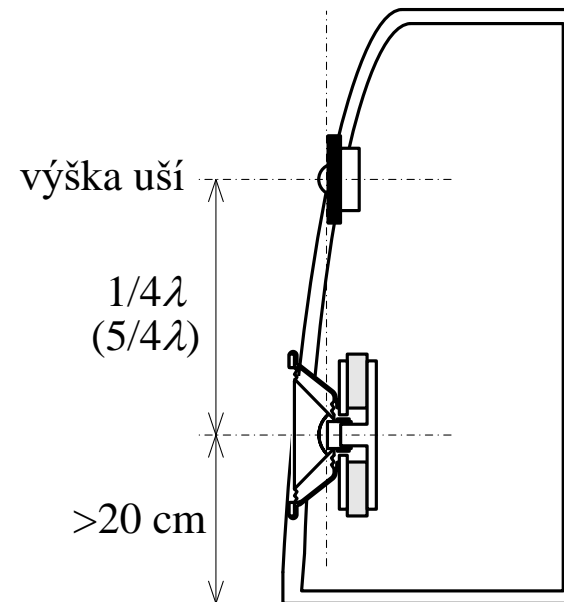
1. stanovení dělicích kmitočtů
2. stanovení aproximací a strmostí filtrů
3. stanovení mezních kmitočtů filtrů
4. kompenzace impedančního průběhu reproduktoru
5. vyrovnání citlivosti reproduktorů, kompenzace kmitočtové charakteristiky
6. ochrana reproduktorů

# Rozmístění reproduktorů

- Zvuk musí zdánlivě vycházet ze stejného místa, nejčastější jsou ale reproduktory soustavy umístěny blízko sebe
- Zásady pro umístění reproduktorů:
  - vysokotónový reproduktor musí být ve výšce uší
  - hlubokotónový reproduktor musí být umístěn dostatečně od země
  - co nejmenší vzdálenosti mezi reproduktory
  - vyzařovací body reproduktorů musí ležet ve stejné rovině
  - před výškovým reproduktorem nemá být mřížka
  - dělicí kmitočty:

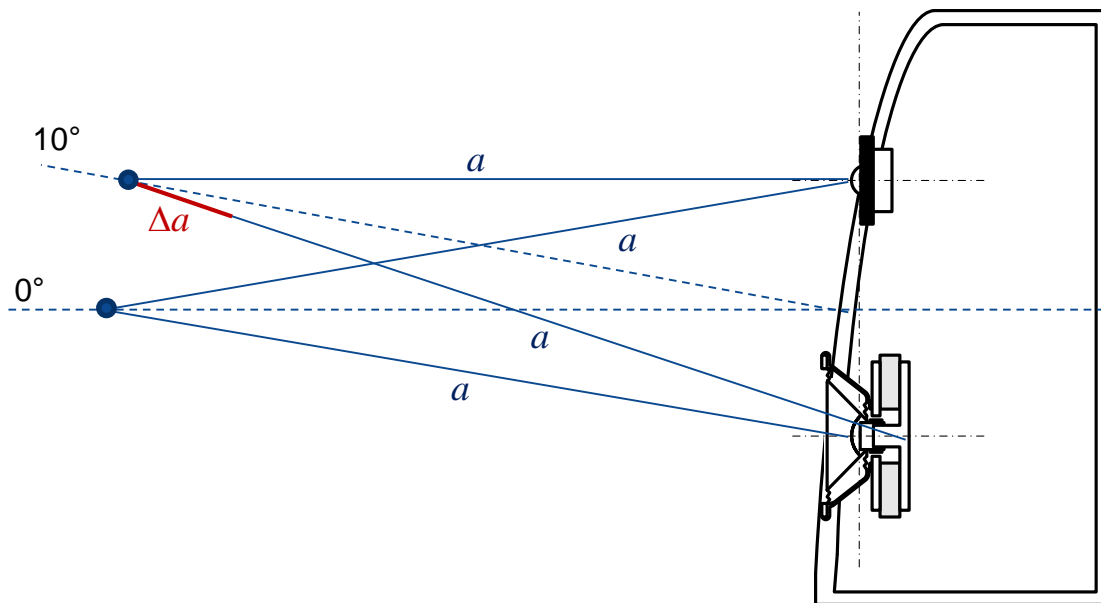
$$f_D = \frac{c_0}{\pi D}$$

$D$  – aktivní průměr membrány

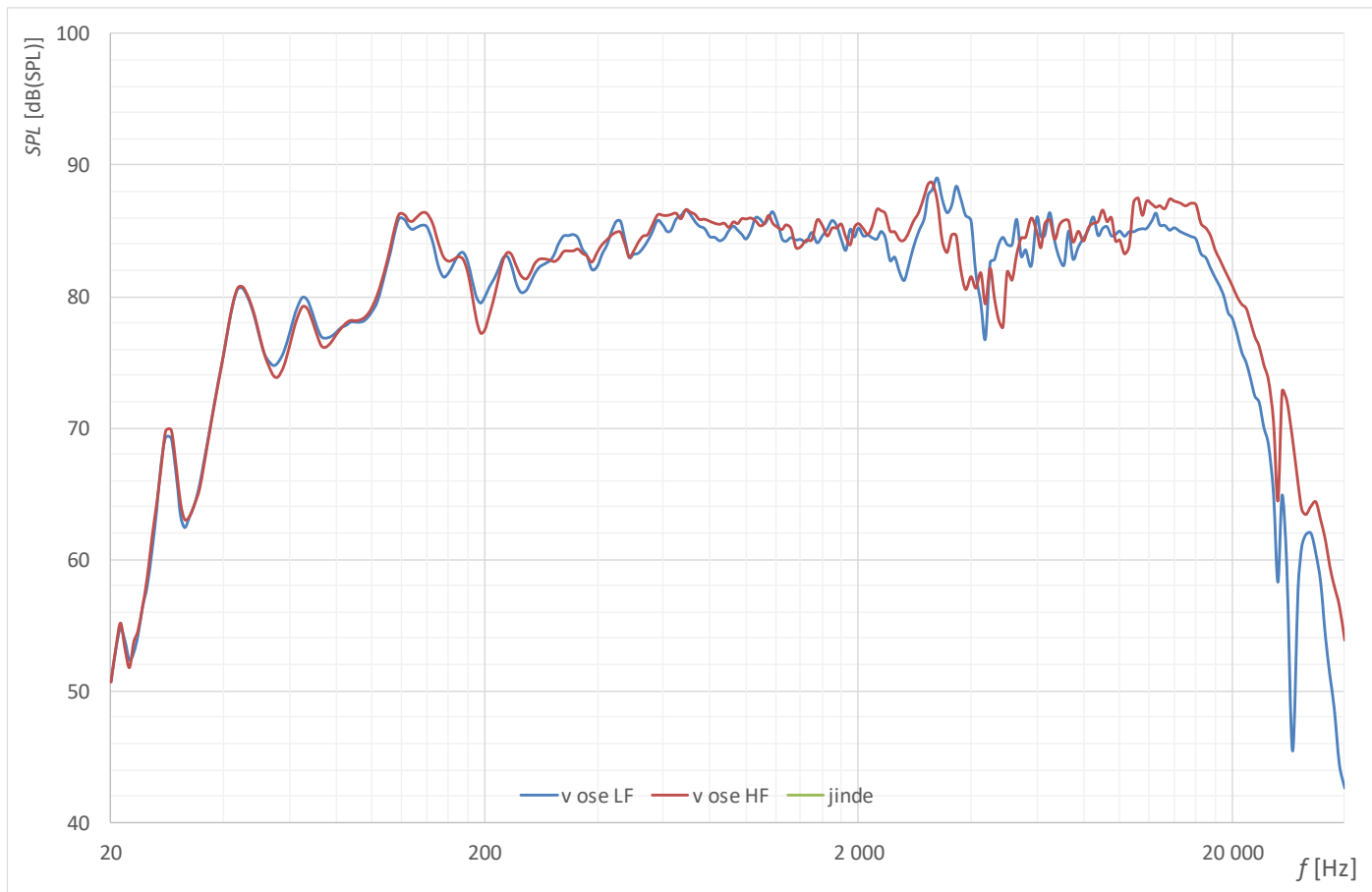


# Vliv pozice reproduktorů na vyzařování ve vertikálním směru

- Důsledek vektorového sčítání zvukových vln vyzařovaných oběma reproduktory v okolí dělicího kmitočtu výhybky



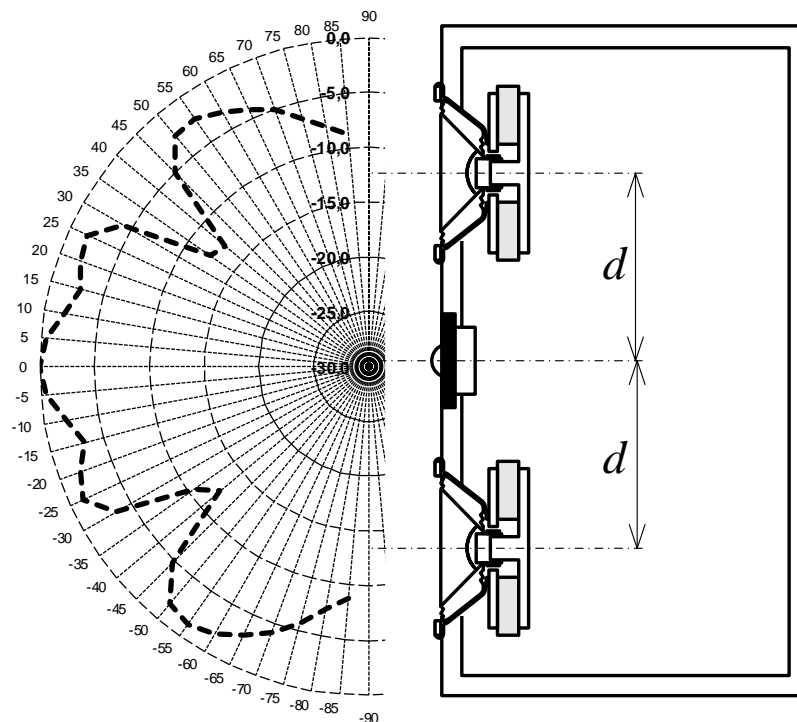
# Vliv pozice reproduktorů na vyzařování ve vertikálním směru



# Uspořádání D'Appolito

- Vertikálně symetrická směrová charakteristika s nízkým zvlněním
- Typické pro centrální reproduktory domácího kina
- Rozteč reproduktorů:

$$d = n \frac{c_0}{f_D}$$



# Parametry reproduktorové soustavy

# Parametry reproduktorové soustavy

- **Referenční bod:** bod na referenční rovině specifikovaný výrobcem
- **Referenční (akustická) osa:** může být shodná s akustickou osou výškového reproduktoru nebo je k ní blízko.
- **Jmenovitá impedance:** hodnota odporu použitá pro výpočet příkonu zdroje signálu; nejmenší absolutní hodnota impedance v pásmu kmitočtů, pro než je soustava určena, nesmí být menší než 80% jmenovité impedance
- **Kmitočtová charakteristika:** závislost hladiny akustického tlaku v určitém bodě před soustavou při konstantním vstupním napětí
- **Jmenovitý kmitočtový rozsah:** výrobcem stanovený rozsah kmitočtů, pro jejichž reprodukci je soustava určena
- **Efektivní kmitočtový rozsah:** definován pro pokles modulové kmitočtové charakteristiky soustavy o 10 dB oproti průměrné hodnotě akustického tlaku v oktávových pásmech
- **Kmitočtový rozsah** pro definovaný pokles kmitočtové charakteristiky o výrobcem definovanou hodnotu oproti průměrné hodnotě akustického tlaku

# Parametry reproduktorové soustavy

- **Jmenovitý šumový příkon:** efektivní hodnota příkonu *simulovaného programu* podle IEC 602608-1 (pásmově omezený růžový šum), který soustava vydrží bez tepelného nebo mechanického poškození po dobu 100 hodin

$$P = \frac{U^2}{|Z|}$$

- **Krátkodobý maximální příkon:** 1 sekunda bez trvalého poškození (60 opakování po 1 minutě)
- **Dlouhodobý maximální příkon:** 1 minuta bez trvalého poškození (10 opakování po 2 minutách)
- **Charakteristická citlivost  $\eta$ :** průměrná velikost efektivní hodnoty ak. tlaku v akustické ose soustavy ve vzdálenosti 1 m od referenčního bodu při buzení růžovým šumem v kmitočtovém rozsahu soustavy.
- **Hladina charakteristické citlivosti** – vyjádření v dB:  $20\log(\eta/2 \cdot 10^{-5})$



# Parametry reproduktorové soustavy

- **Celkové harmonické zkreslení:** poměr efektivní hodnoty akustického tlaku všech vyšších harmonických složek k efektivní hodnotě první harmonické složky při měření ve vzdálenosti 1 m při jmenovitém příkonu

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} p_n^2}}{p_1} \cdot 100 [\%] \quad THD_{\text{dB}} = 20 \log \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} p_n^2}}{p_1} [\text{dB}]$$

- **Harmonické zkreslení  $n$ -tého řádu:** zkreslení  $n$ -tou harmonickou (2. a 3.)

# Parametry reproduktorové soustavy

- **Směrová charakteristika:** závislost hladiny akustického tlaku na úhlu mezi spojnicí referenčního bodu a bodu měření s referenční osou soustavy
- **Činitel směrovosti:** poměr akustického tlaku v referenční ose soustavy ve vzdálenosti 1 m k akustickému tlaku vytvořenému ve stejném místě všesměrovým zdrojem se stejným akustickým výkonem

$$Q = \frac{p_{\alpha}^2}{p_{\text{stř}}^2}$$

- **Index směrovosti** (Directivity Index): vyjádření  $Q$  v dB
- **Vyzařovací úhel:** úhel mezi akustickou osou soustavy a směrem, ve kterém klesne hodnota hladiny akustického tlaku o 10 dB oproti hladině naměřené v akustické ose
- **Úhel pokrytí:** úhel mezi směry, ve kterých poklesne hladina akustického tlaku hlavního vyzařovacího laloku o 6 dB oproti směru s maximální hladinou

# Reproduktorové soustavy