

REPRODUKTORY A SLUCHÁTKA

MUNI
ARTS

Kurz: **Studiová technika II**

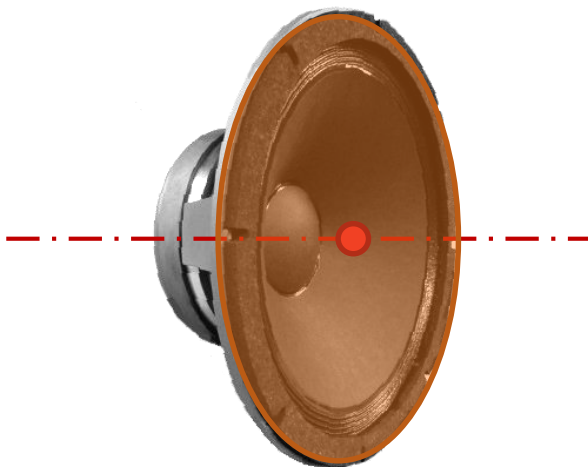
Autor: Jiří Schimmel

Reproduktory

- Převodníky pro přeměnu elektrického signálu na signál akustický
- Způsob vyzařování:
 - přímovyzařující
 - Nepřímovyzařující (tlakové, kompresní)
- Použitý měnič:
 - I. skupiny (elektrodynamické, elektromagnetické)
 - II. skupiny (piezoelektrické, elektrostatické)
 - reproduktory s nerecipročními převodníky (tepelné, pneumatické, plazmový)
- Oblast reprodukováných kmitočtů:
 - širokopásmové
 - hlubokotónové
 - středotónové
 - vysokotónové

Definice pojmů

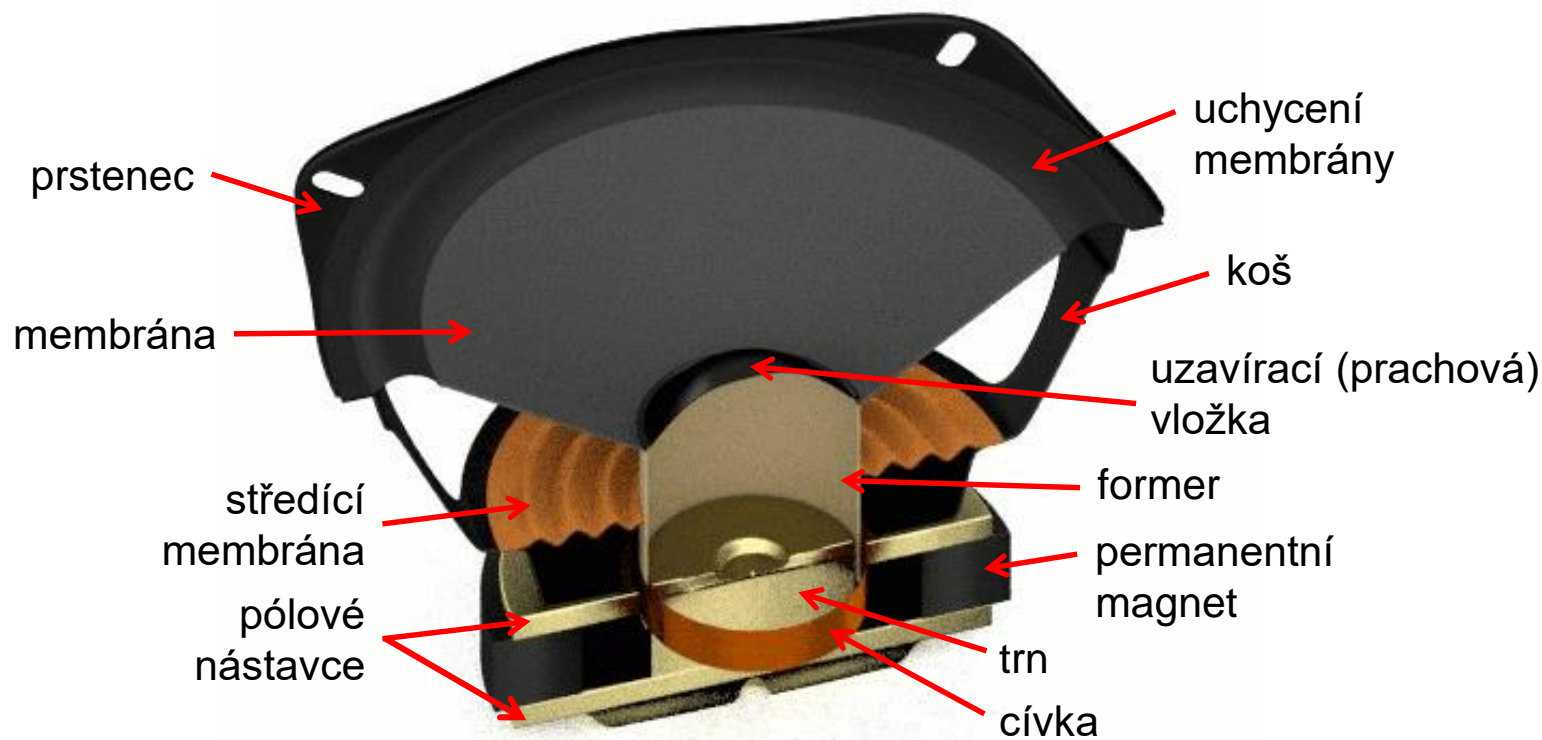
- **Referenční rovina:** plocha, z níž vystupuje zvuková vlna z reproduktoru
- **Referenční bod:** bod na referenční rovině specifikovaný výrobcem (obvykle bod geometrické symetrie)
- **Referenční (akustická) osa reproduktoru:** přímka procházející referenční rovinou v referenčním bodě ve specifikovaném směru (obvykle kolmo na referenční rovinu, u symetrických reproduktorů shodná s geometrickou osou)



Reproduktor jako mechanická soustava

Reproduktor jako mechanická soustava

- Konstrukce reproduktoru



Mechanické translační soustavy

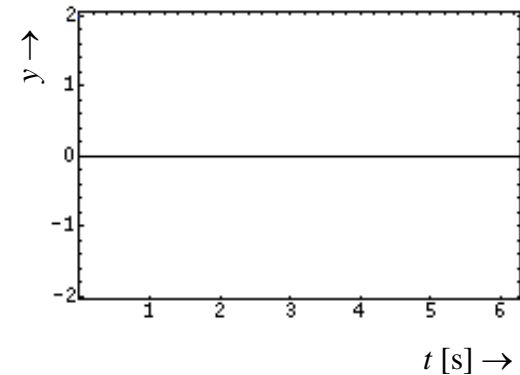
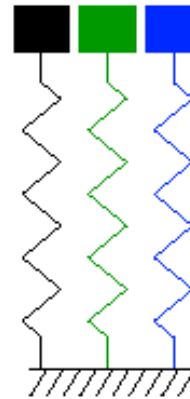
- Výhybka harmonicky kmitajícího bodu:

$$y = y_m \sin \omega t \approx y_m e^{j\omega t}$$

- Rychlost:

$$v = \frac{dy}{dt} = y_m \omega \cos \omega t \approx y_m e^{j\omega t} j\omega = yj\omega$$

$$y = \frac{v}{j\omega}$$



Mechanické translační soustavy

- 2. Newtonův zákon

$$F = \frac{d}{dt}(mv) = m \frac{dv}{dt} = ma \Rightarrow F = mj\omega v = j\omega mv$$

m – hmotnost

- Hookův zákon – při lineární závislosti mezi silou a velikostí deformace platí:

$$F = sy = \frac{y}{c} = \frac{v}{j\omega c}$$

s – tuhost, c – poddajnost

- Stokesův zákon o tření:

$$F = rv$$

r – třecí mechanický odpor

I. Elektromechanická analogie

- Přiřazení základních veličin mechanických veličinám elektrickým:

- síla – elektrické napětí
- rychlost – elektrický proud
- hmotnost – indukčnost

$$F = j\omega m v \quad u = j\omega L i$$

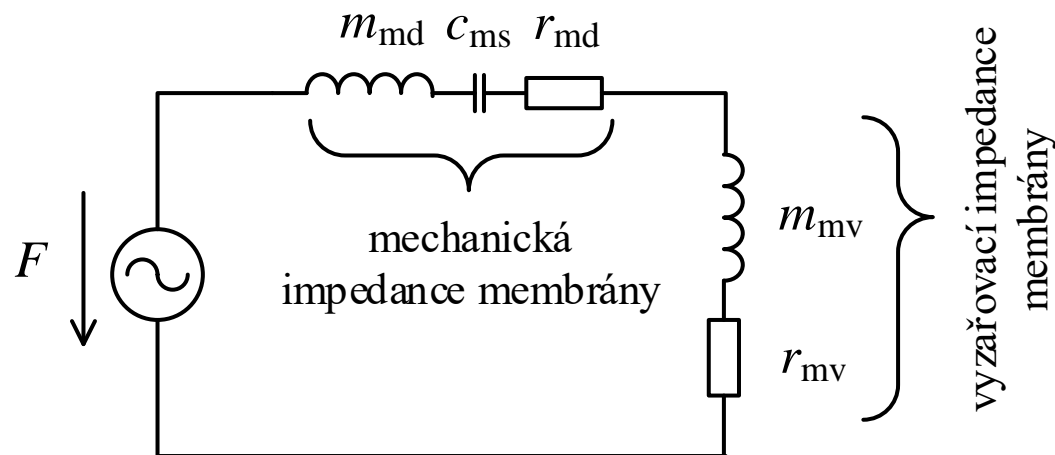
- poddajnost – kapacita

$$F = \frac{v}{j\omega c} \quad u = \frac{1}{j\omega C} i$$

- mechanický odpor – elektrický odpor

$$F = r v \quad u = R i$$

Náhradní schéma mechanické soustavy reproduktoru



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

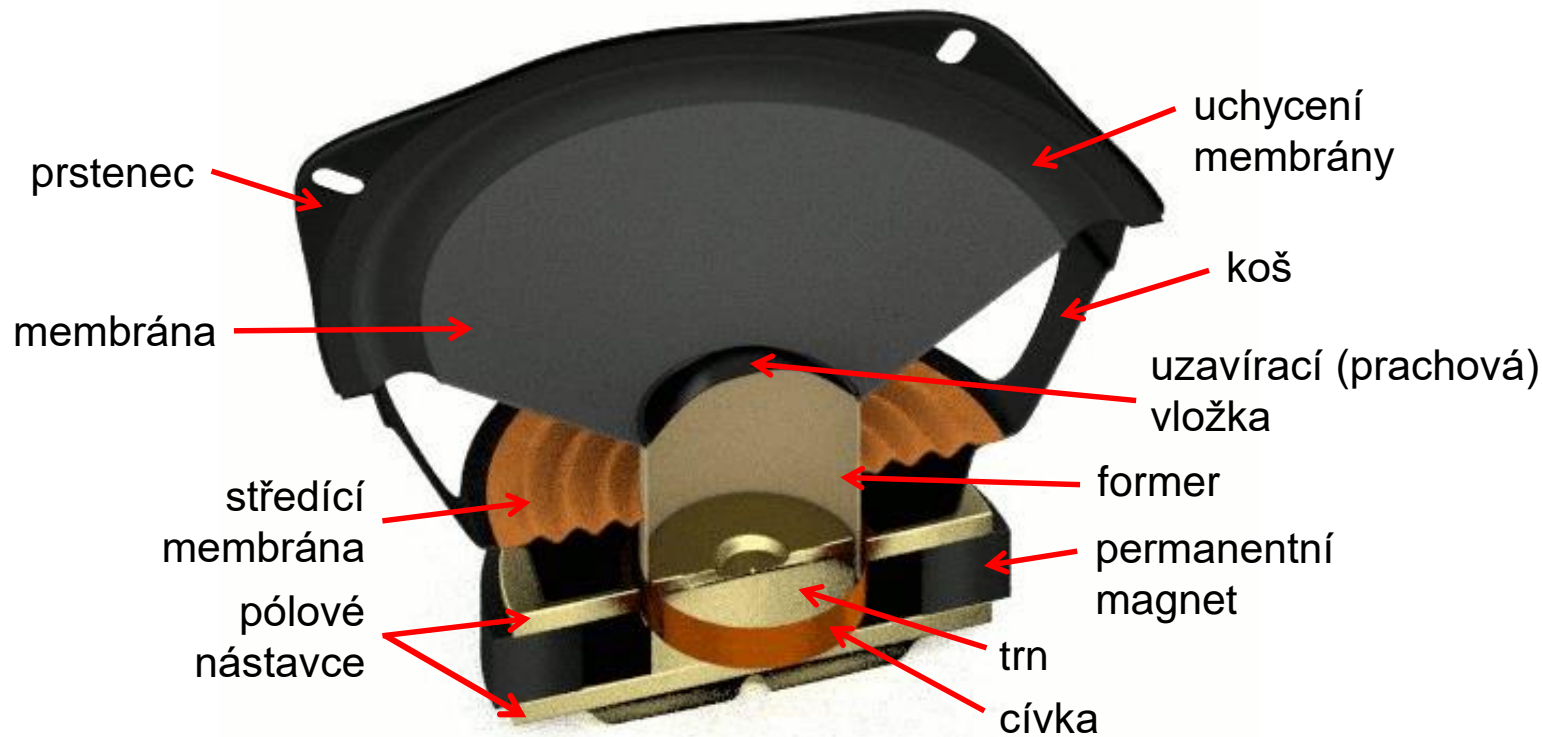
c_{ms} – poddajnost uložení membrány (okrajů i středící membrány)

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

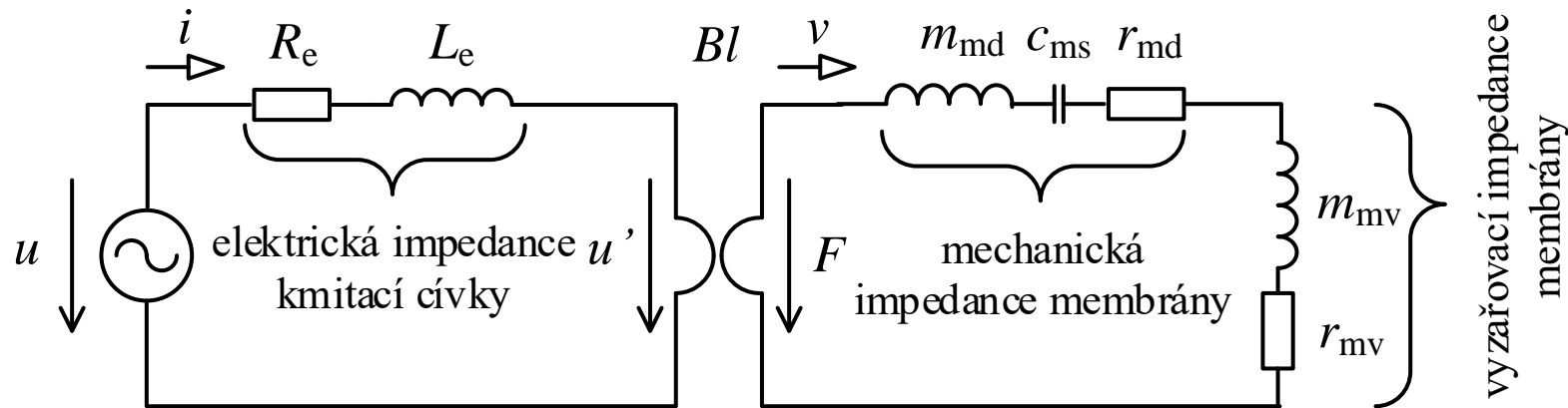
Elektrodynamický přímovyzářující reproduktor

Elektrodynamický reproduktor

- V současné době nejvíce používaný, princip vynalezli 1925 Rice a Kellog



Úplné náhradní schéma reproduktoru



R_e, L_e – stejnosměrný odpor a indukčnost cívky

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

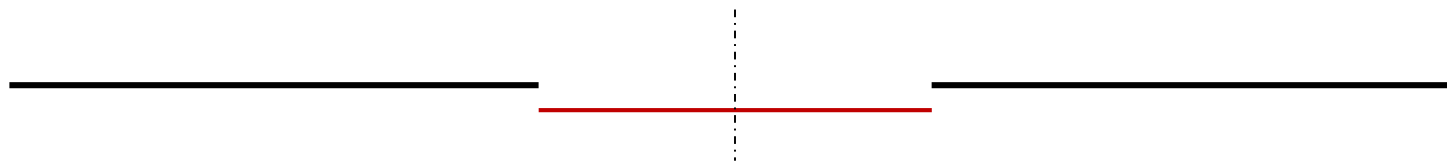
c_{ms} – poddajnost uložení membrány (okrajů i středící membrány)

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

m_{mv}, r_{mv} – vyzařovací impedance

Pístově kmitající kruhová membrána

- Membránu reproduktoru idealizujeme jako kruhovou plochu kmitající soufázově (pístově) v nekonečné stěně ve směru své normály



- Pro takovou membránu jsme schopni nalézt rovnici pro akustický tlak vyvářený membránou:

$$p(x) = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -j\omega\rho S \frac{\mathbf{v}_n}{2\pi} \frac{e^{-jkx}}{x} \frac{2J_1(kR \sin \alpha)}{kR \sin \alpha}$$

ρ – hustota prostředí, k – vlnové číslo, R – poloměr membrány, S – plocha membrány ($S=\pi R^2$), \mathbf{v}_n – normálová rychlost kmitání membrány, x – vzdálenost od membrány, $J_1(\cdot)$ – Besselovy funkce 1. řádu, α – úhel mezi osou vysílače a bodem, kde akustický tlak zjišťujeme

Kmitočtová charakteristika elektrodynamického reproduktoru

- Amplituda akustického tlaku v ose reproduktoru:

$$p = \frac{\rho S_d}{2\pi x} \omega \mathbf{v}_n$$

ρ – hustota vzduchu, S_d – aktivní plocha membrány, \mathbf{v}_n – normálová rychlost kmitání membrány, x – vzdálenost od membrány, ω – úhlový kmitočet

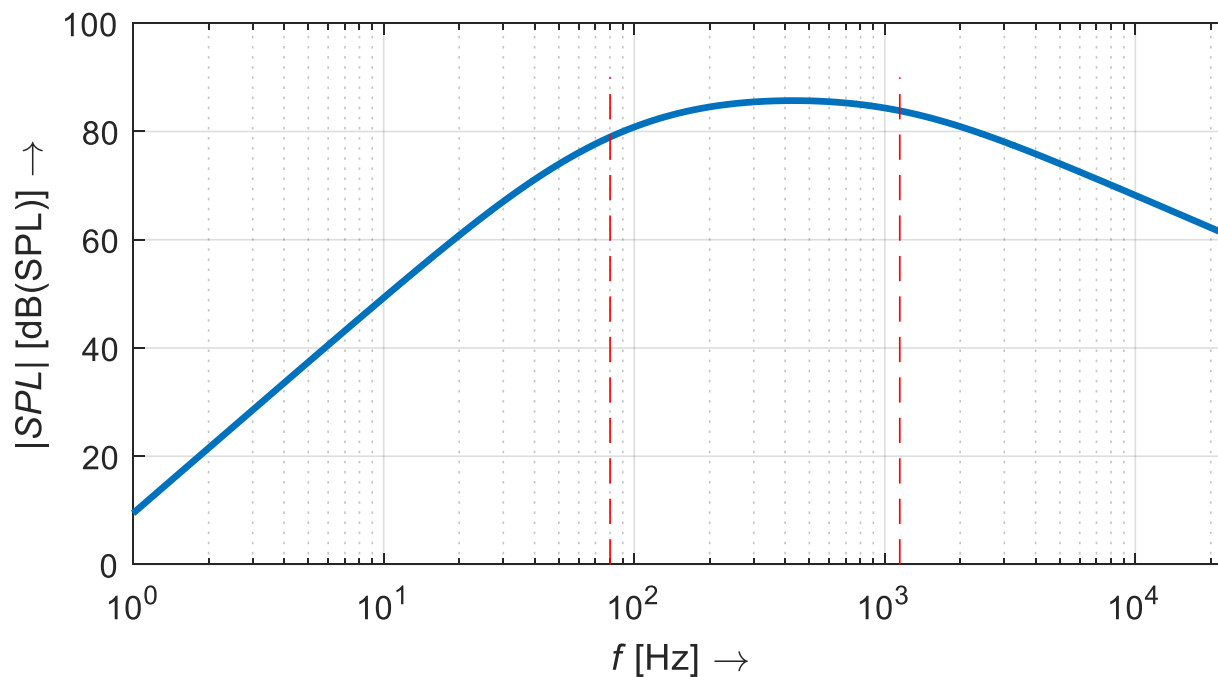
- Rychlost kmitání membrány je dána mechanickou impedancí a silou vytvářenou elektrodynamickým měničem $F = Bli$
- Amplituda akustického tlaku v ose reproduktoru:

$$p = \frac{\rho S_d}{2\pi x} Bl \frac{U}{R_e} \cdot \frac{1}{m_{ms}} \cdot \frac{q^2}{\sqrt{(q^2-1)^2 + \left(\frac{q}{Q_{ts}}\right)^2}} \quad Q_{ts} = 2\pi f_s \frac{m_{ms}}{r_{ms} + \frac{(Bl)^2}{R_e}}$$

U – budící napětí, Q_{ts} – celkový činitel jakosti, $q = f/f_s$ – poměrný kmitočet

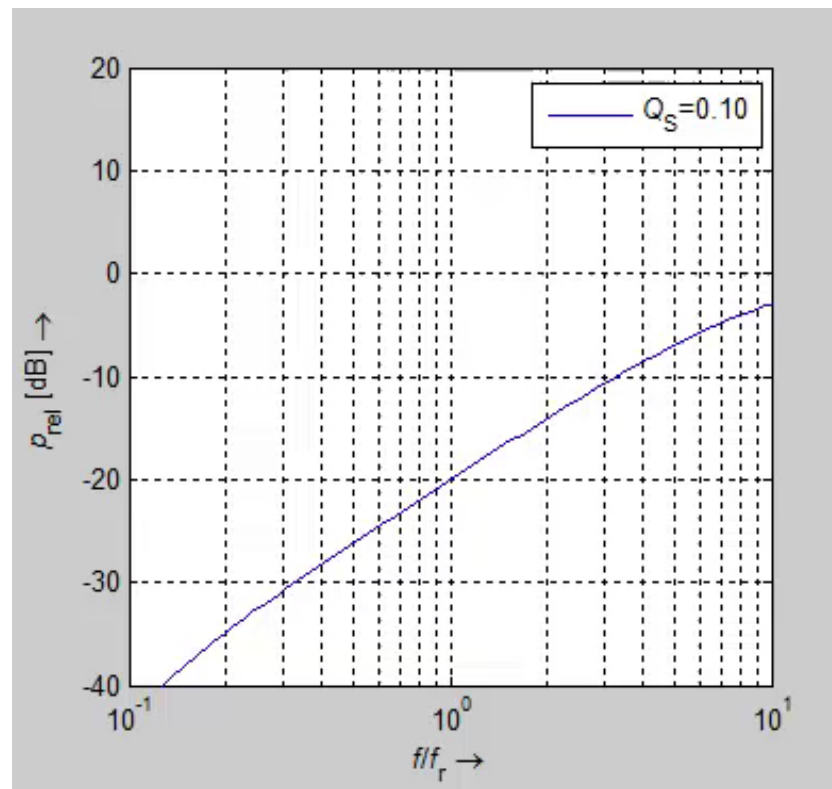
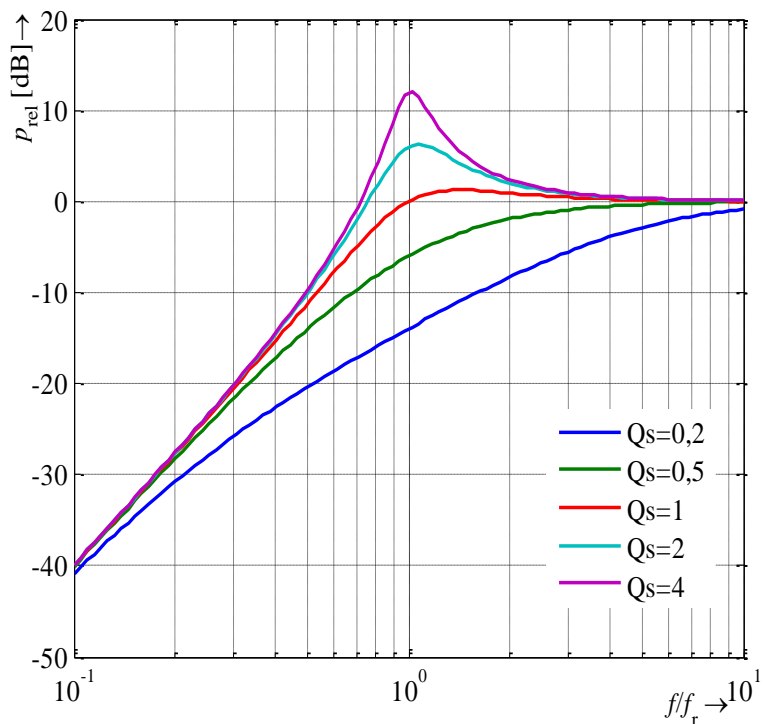
Kmitočtová charakteristika elektrodynamického reproduktoru

- Akustický tlak v ose reproduktoru



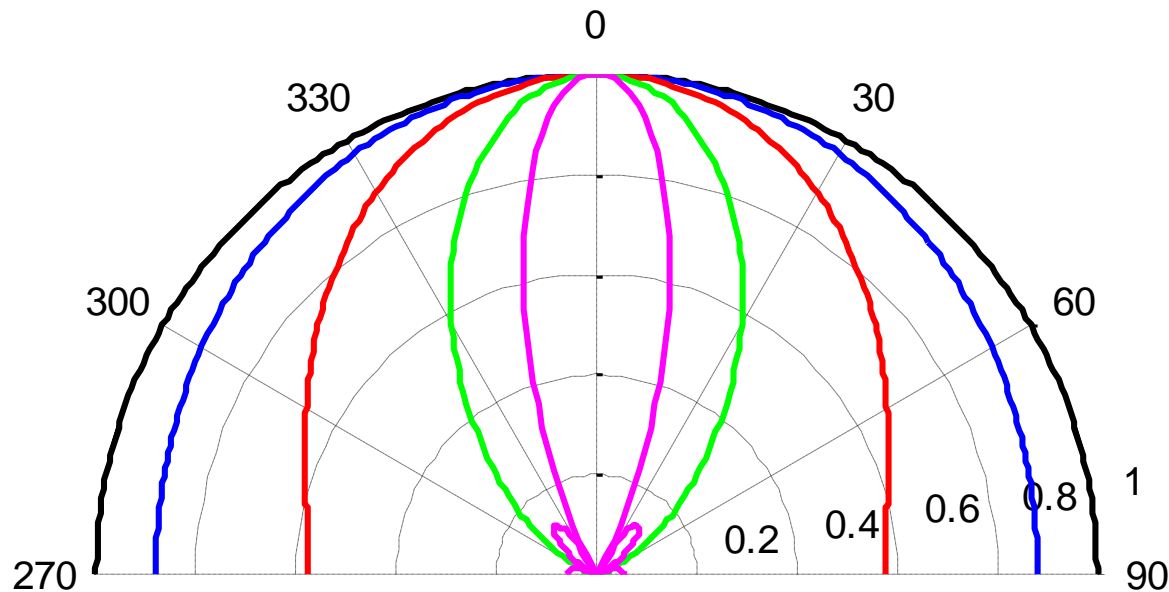
Kmitočtová charakteristika elektrodynamického reproduktoru

- Vliv činitele jakosti na kmitočtovou charakteristiku



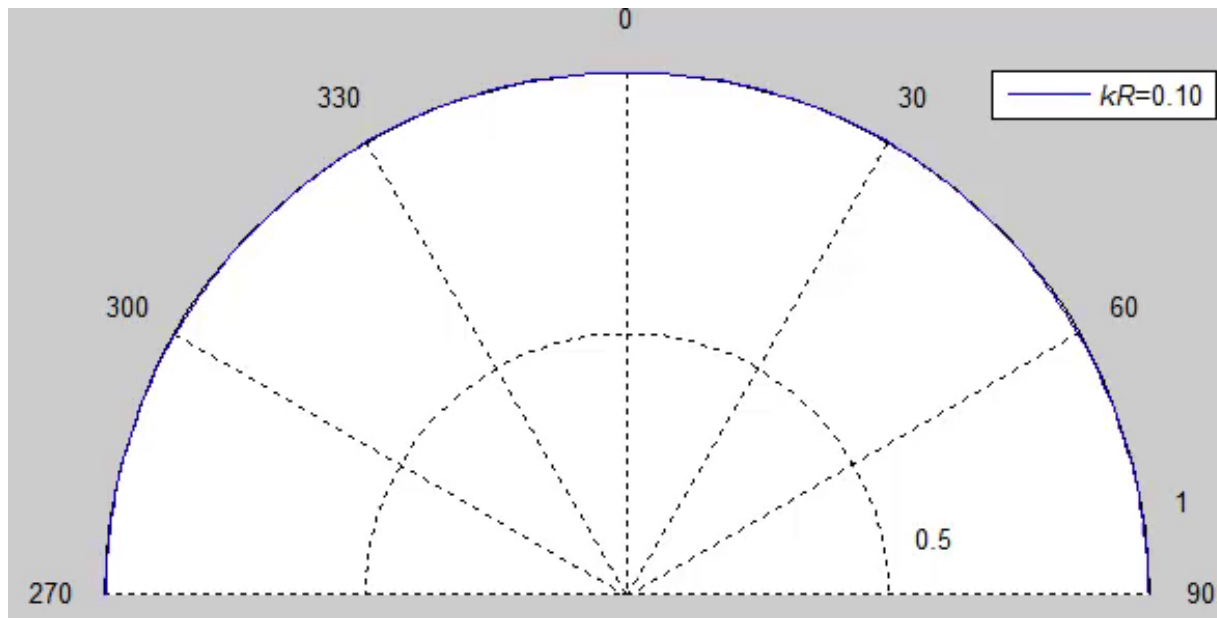
Směrová charakteristika

- Směrová charakteristika je do vlnové délky $\pi D_a < \lambda$, je kulová, pro kratší vlnové délky stoupá činitel směrovosti s druhou mocninou kmitočtu
- Pro kmitočty vyšší, než je kritický kmitočet membrány, pomáhá směrový účinek vyrovnat modulovou kmitočtovou charakteristiku.

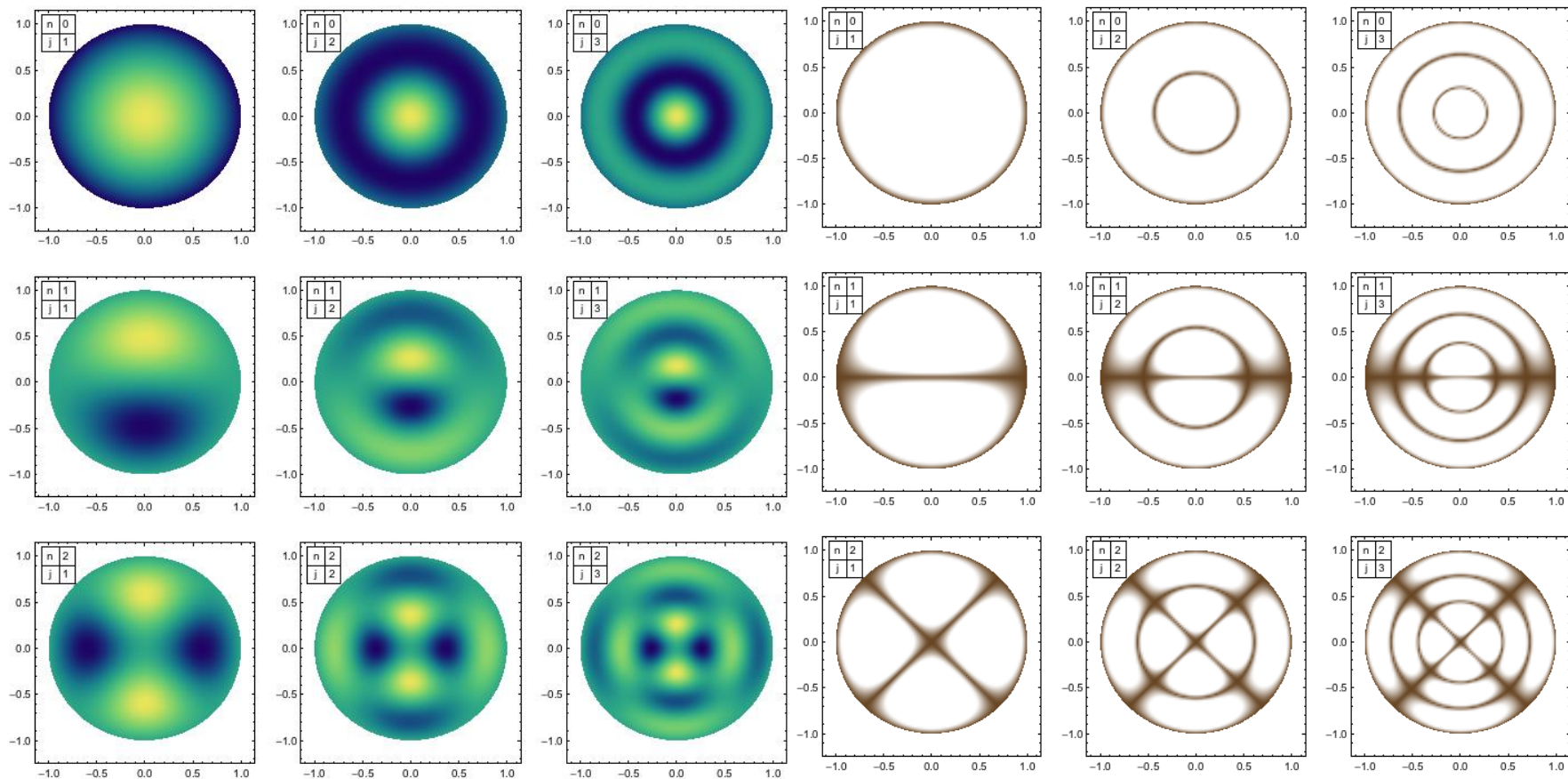


Směrová charakteristika

- Směrová charakteristika je do vlnové délky $\pi D_a < \lambda$, je kulová, pro kratší vlnové délky stoupá činitel směrovosti s druhou mocninou kmitočtu
- Pro kmitočty vyšší, než je kritický kmitočet membrány, pomáhá směrový účinek vyrovnat modulovou kmitočtovou charakteristiku.

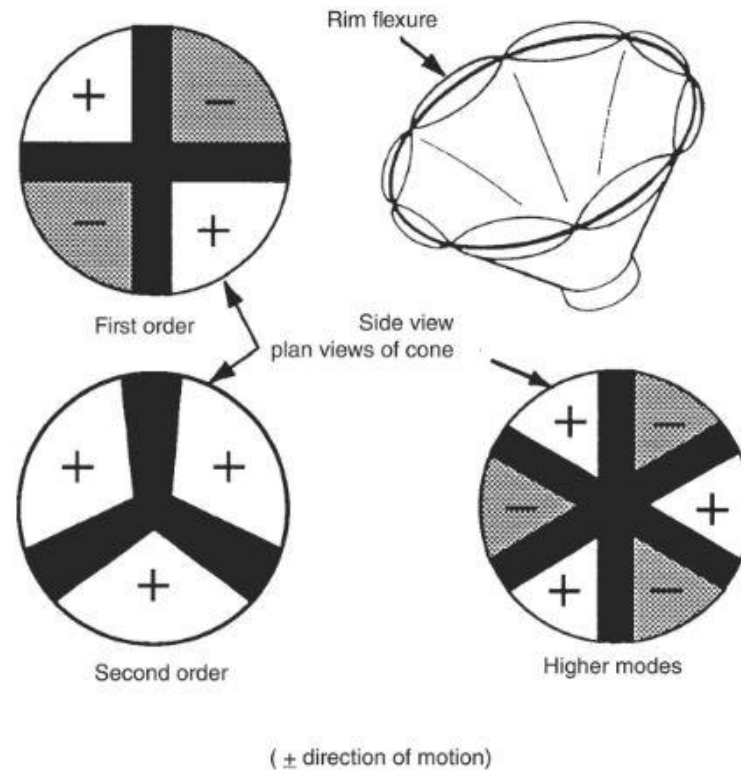
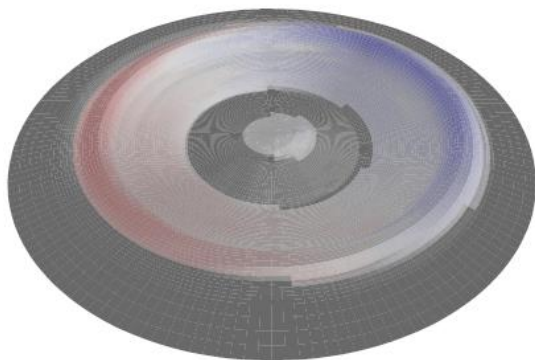
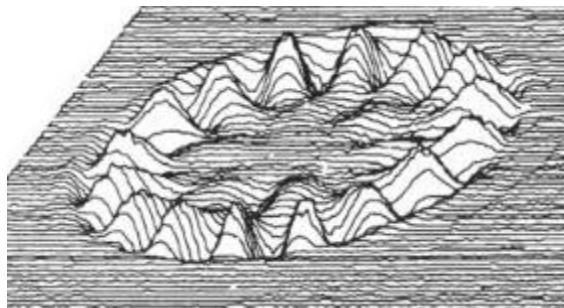


Módy kruhové membrány



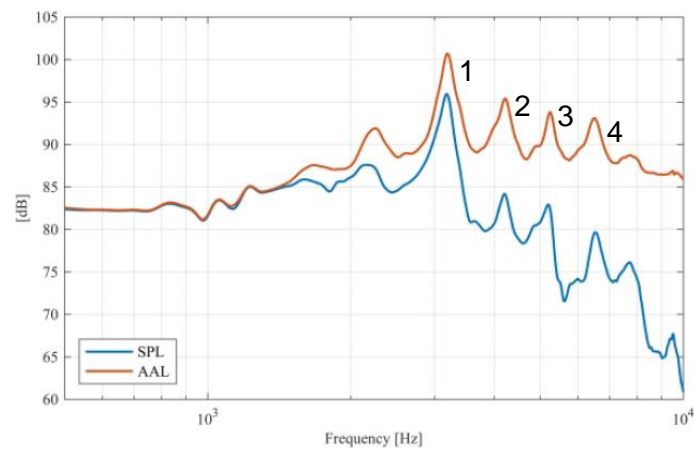
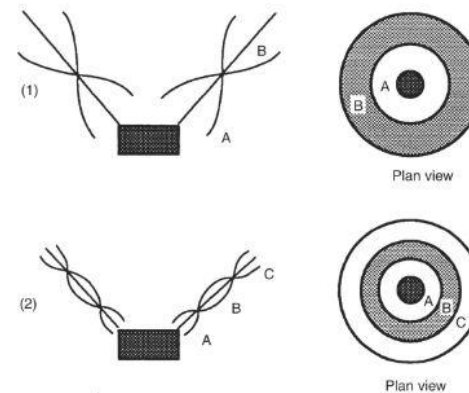
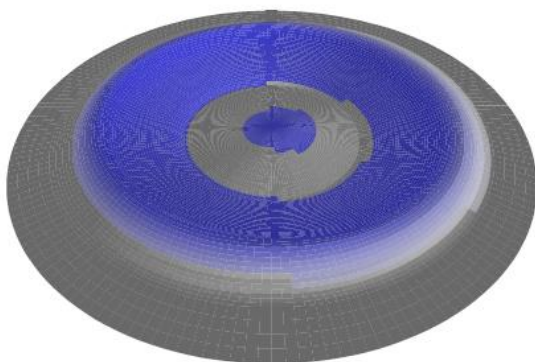
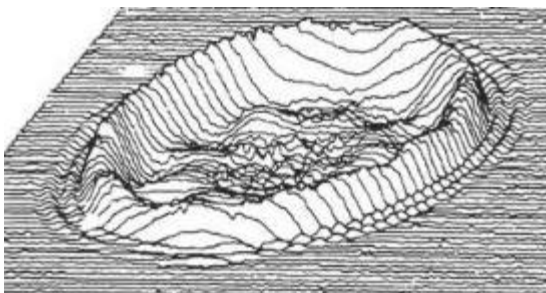
Módy kruhové membrány

- Kruhové módy



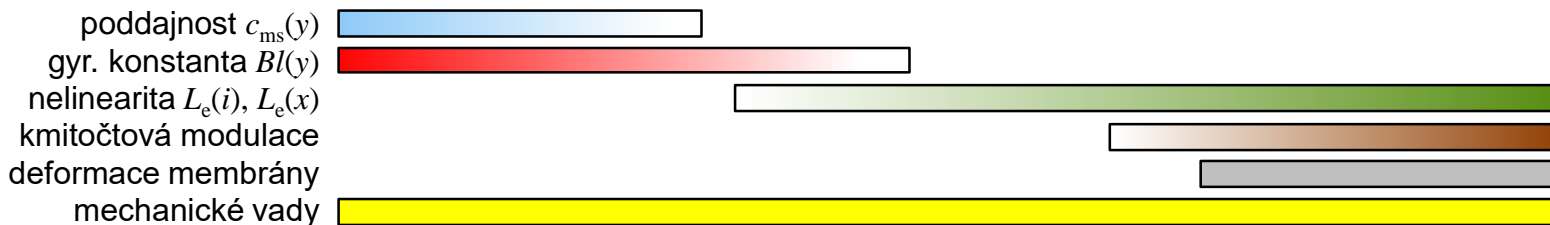
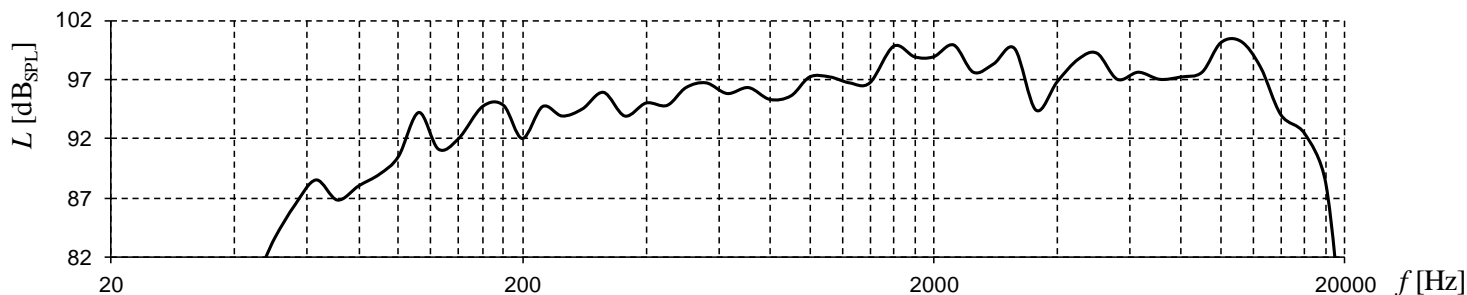
Módy kruhové membrány

- Radiální módy



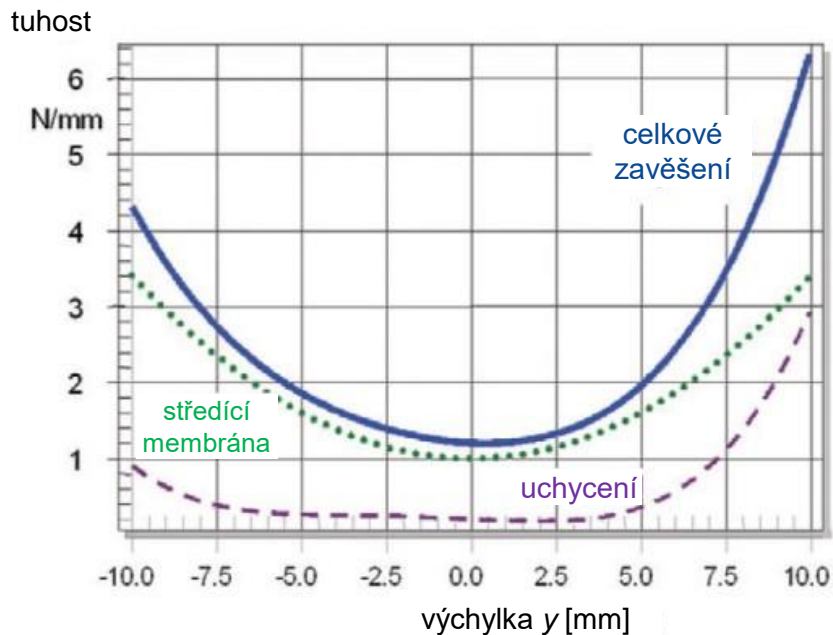
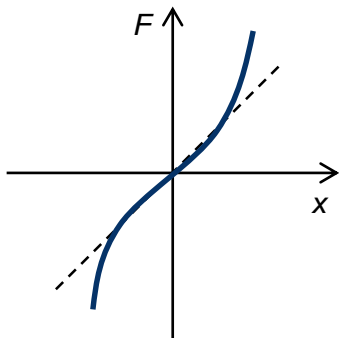
Zkreslení reproduktorů

- 1) nelinearita poddajnosti c_{ms} uchycení kmitacího systému v závislosti na výchylce membrány
- 2) proměnná hodnota Bl v závislosti na výchylce membrány
- 3) nelinearita indukčnosti L_e v závislosti na proudu a výchylce membrány
- 4) kmitočtová modulační (Dopplerův jev)
- 5) deformace membrány při kmitání (parciální kmity)
- 6) mechanické vady v konstrukci kmitacího systému



Zkreslení reproduktorů

- Nelinearita tuhosti uchycení kmitacího systému
 - nelineární závislost síly působící proti pohybu membrány na její výchylce, výchylka s kmitočtem klesá → uplatňuje se na nízkých kmitočtech
 - vznikají vyšší harmonické složky, výrazná je druhá a třetí

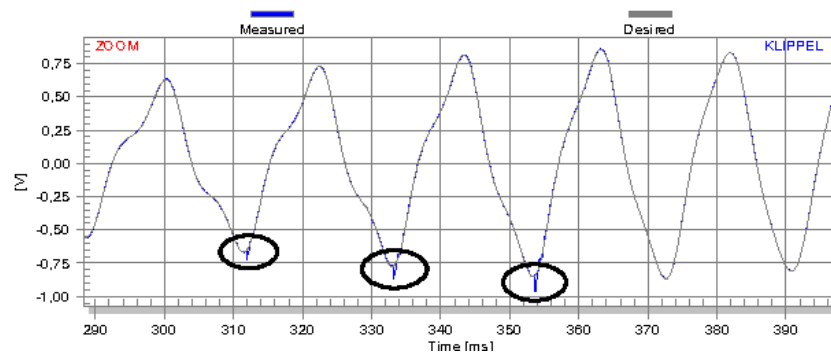
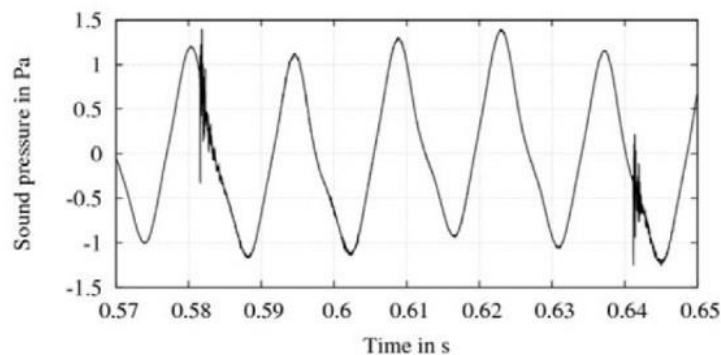


Zkreslení reproduktorů

- Proměnná hodnota gyrační konstanty závislosti na výchylce membrány
 - pokud kmitací cívka má tak velkou amplitudu, že se s výchylkou membrány ocitá část závitů cívky mimo magnetický obvod, mění hodnota gyrační konstanty Bl , výchylka s kmitočtem klesá → uplatňuje se nejvíce na nízkých kmitočtech
 - důsledkem je amplitudová modulace a intermodulační zkreslení
- Nelinearita indukčnosti kmitací cívky
 - v magneticky nelineárním prostředí (zejména u feromagnetik) se indukčnost mění s protékajícím proudem, nejprve vzrůstá ke svému maximu a poté klesá
 - pokud se část závitů cívky ocitne vlivem velké výchylky mimo magnetický obvod, klesá magnetický tok cívkou a tím i indukčnost
 - uplatňuje se s rostoucím kmitočtem, způsobuje vznik vyšších harmonických složek
- Zkreslení kmitočtovou modulací
 - vyzařuje-li reproduktor současně signál o nízkém a vysokém kmitočtu, mění se následkem Dopplerova jevu při pohybu membrány periodicky kmitočet signálu s vyšším kmitočtem

Zkreslení Rub&Buzz

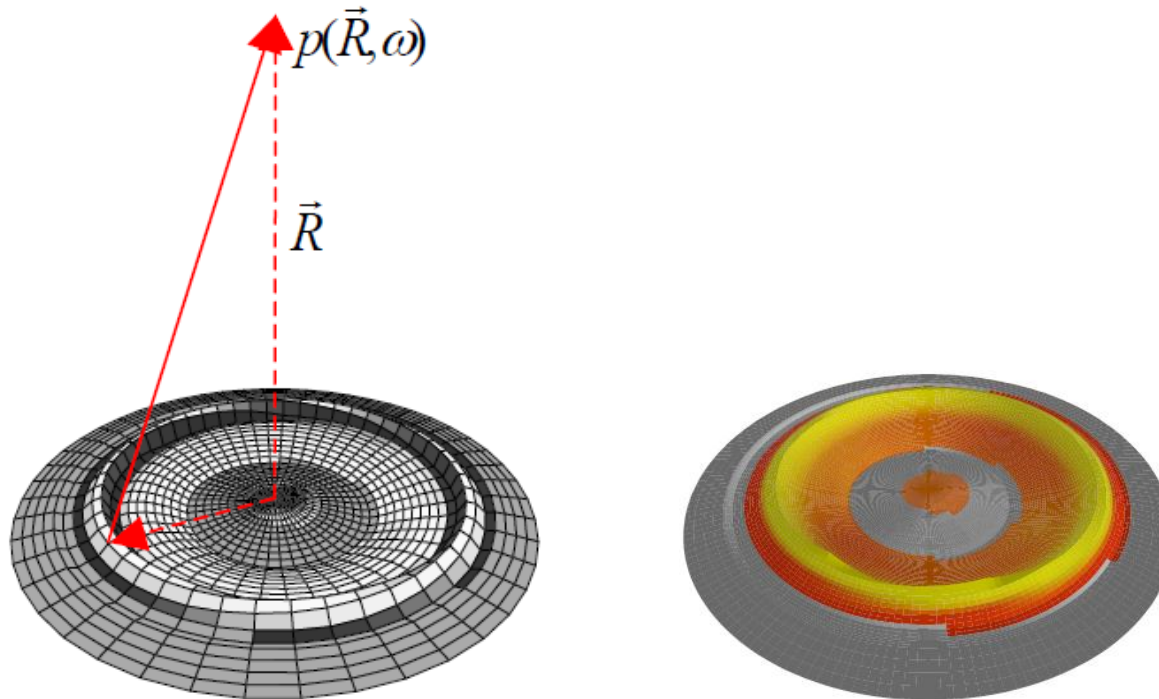
- Nepravidelné zkreslení impulsního charakteru s nízkou energií, ale širokopásmovým spektrem → slyšitelný a nepříjemný zvuk



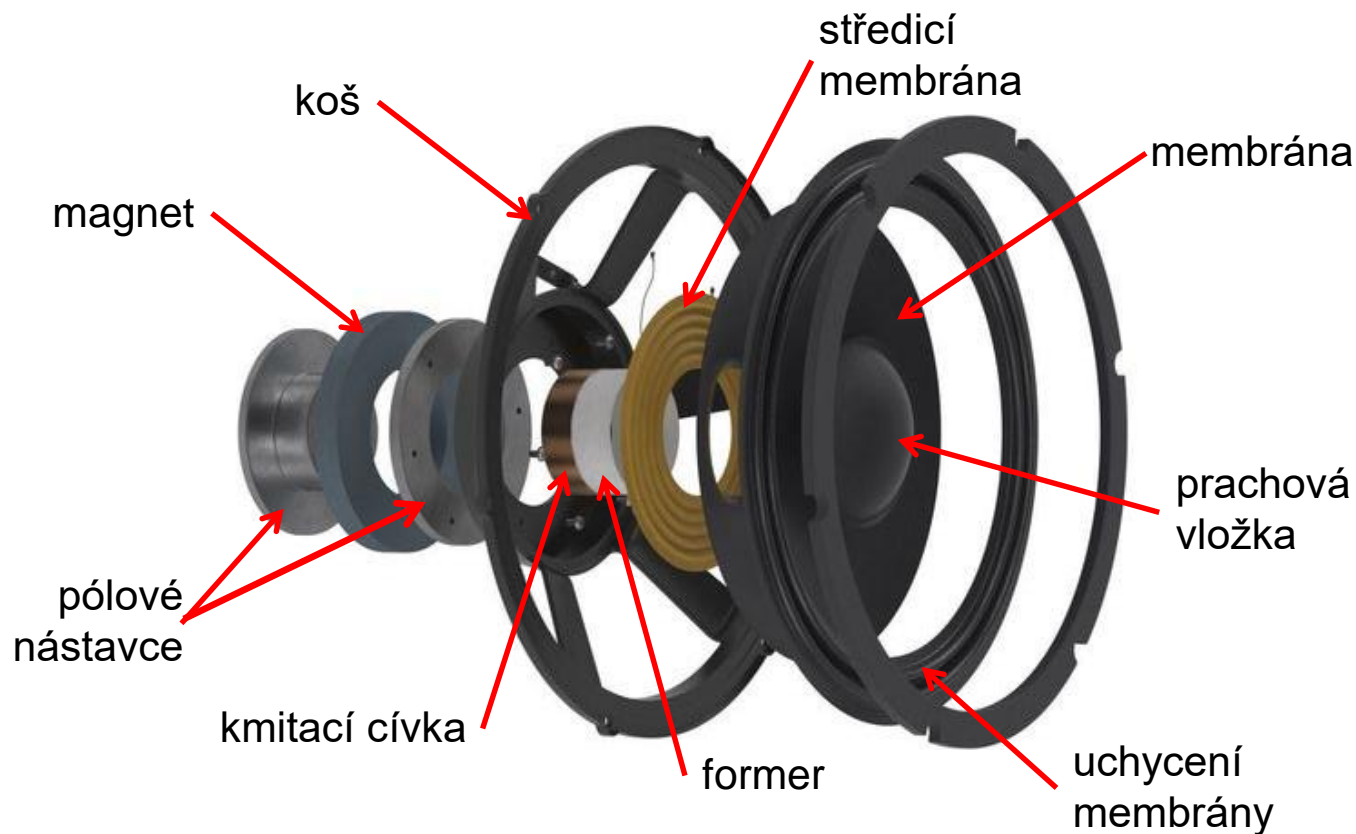
- Příčiny: drhnutí kmitací cívky v mezeře, narážení do koše, drnčení a klepání mechanických prvků (např. přívodní vodiče), proudění zvuku v prachové vložce a netěsných uzavřených konstrukcích a reproduktorových skříních, volné částice, ...

Fázové zkreslení

- V blízkém poli reproduktoru se příspěvky akustického tlaku vytvořené elementárními plochami membrány sčítají s nezanedbatelným fázovým posunem

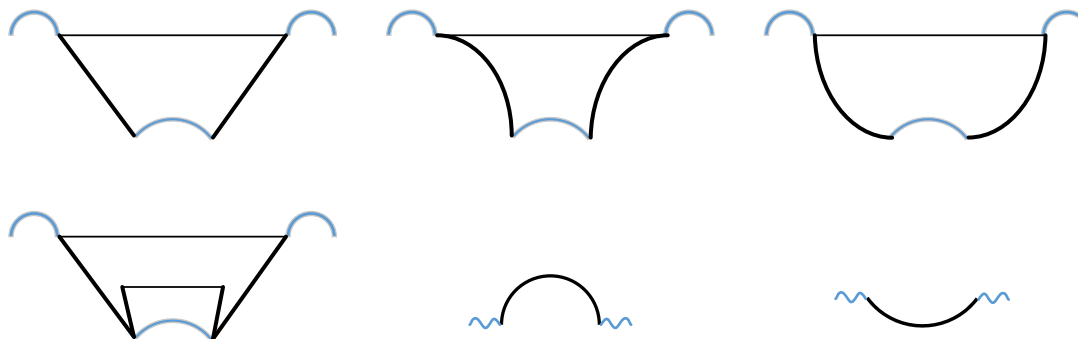


Prvky elektrodynamického cívkového reproduktoru



Tvar membrány

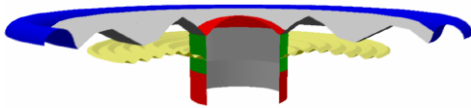
- Účel změn tvaru membrány:
 - 1) potlačení módů membrány (rozšíření oblasti pístového pohybu)
 - 2) minimalizace fázového zkreslení
 - 3) úprava směrové charakteristiky (rozšíření vyzařovacího úhlu)



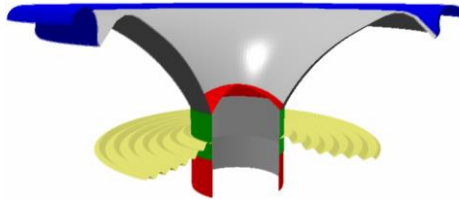
Tvar membrány

- Potlačení radiálních módů

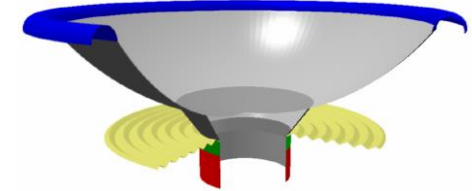
rovinná



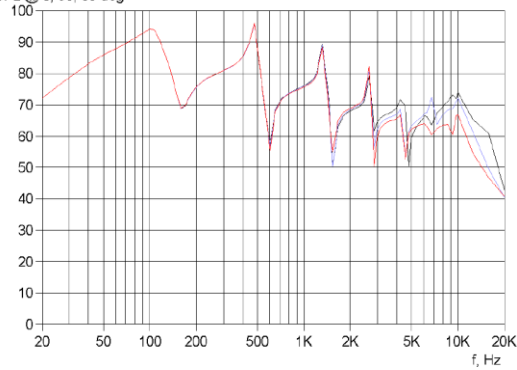
konvexní



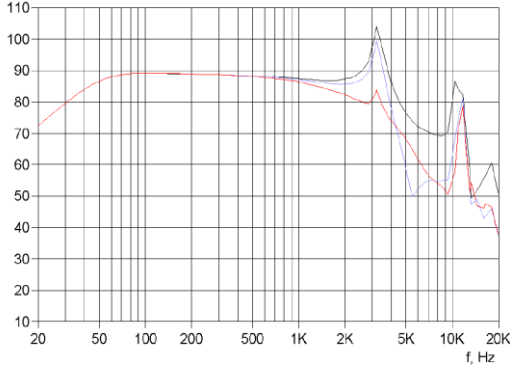
konkávní



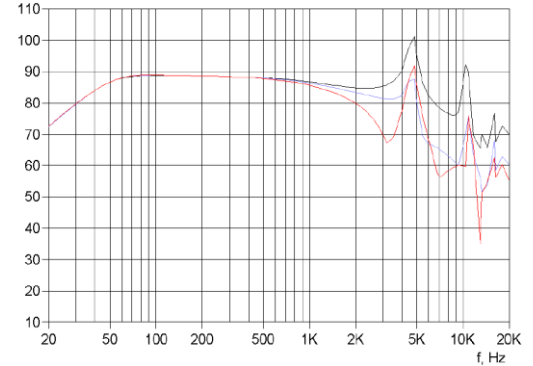
dB SPL @ 0, 30, 60 deg

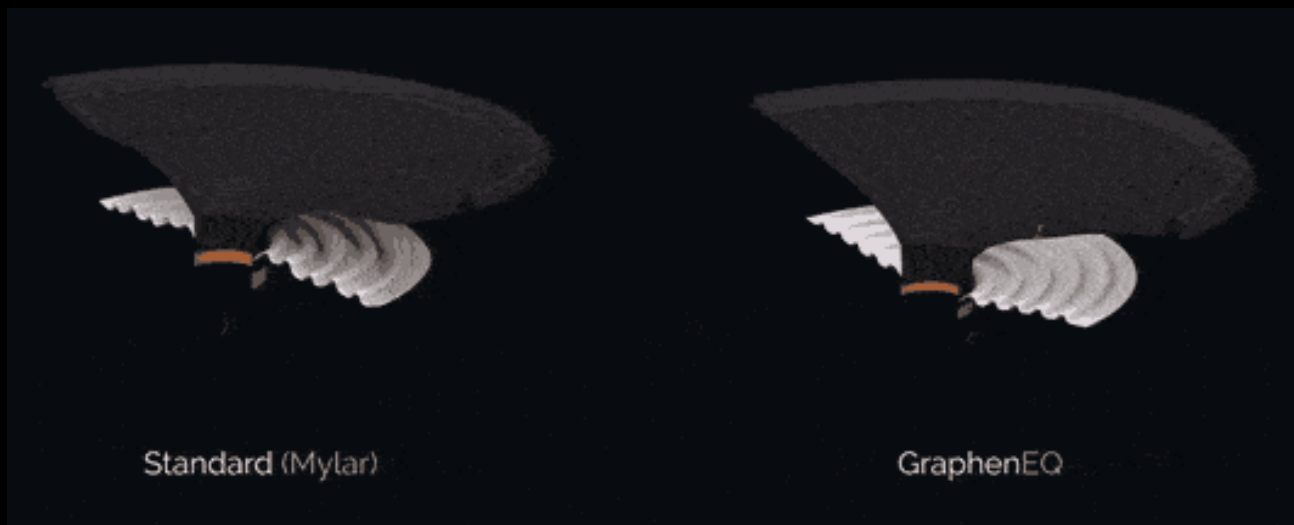


dB SPL



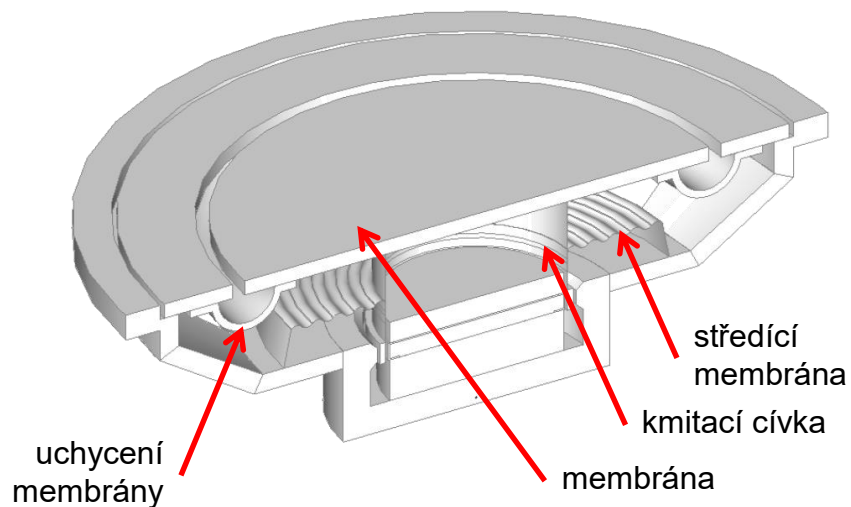
dB SPL





BMR (Balanced Mode Radiator)

- Hybridní technologie, pístově kmitající plochá tuhá membrána
 - módy potlačeny pomocí vyvažovacích hmotností
 - na nízkých kmitočtech se chovají jako reproduktor, ale mají větší směrovost
 - na středních a vysokých kmitočtech se chovají jako ploché panely (DML)



Parametry reproduktorů

Parametry reproduktorů

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

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

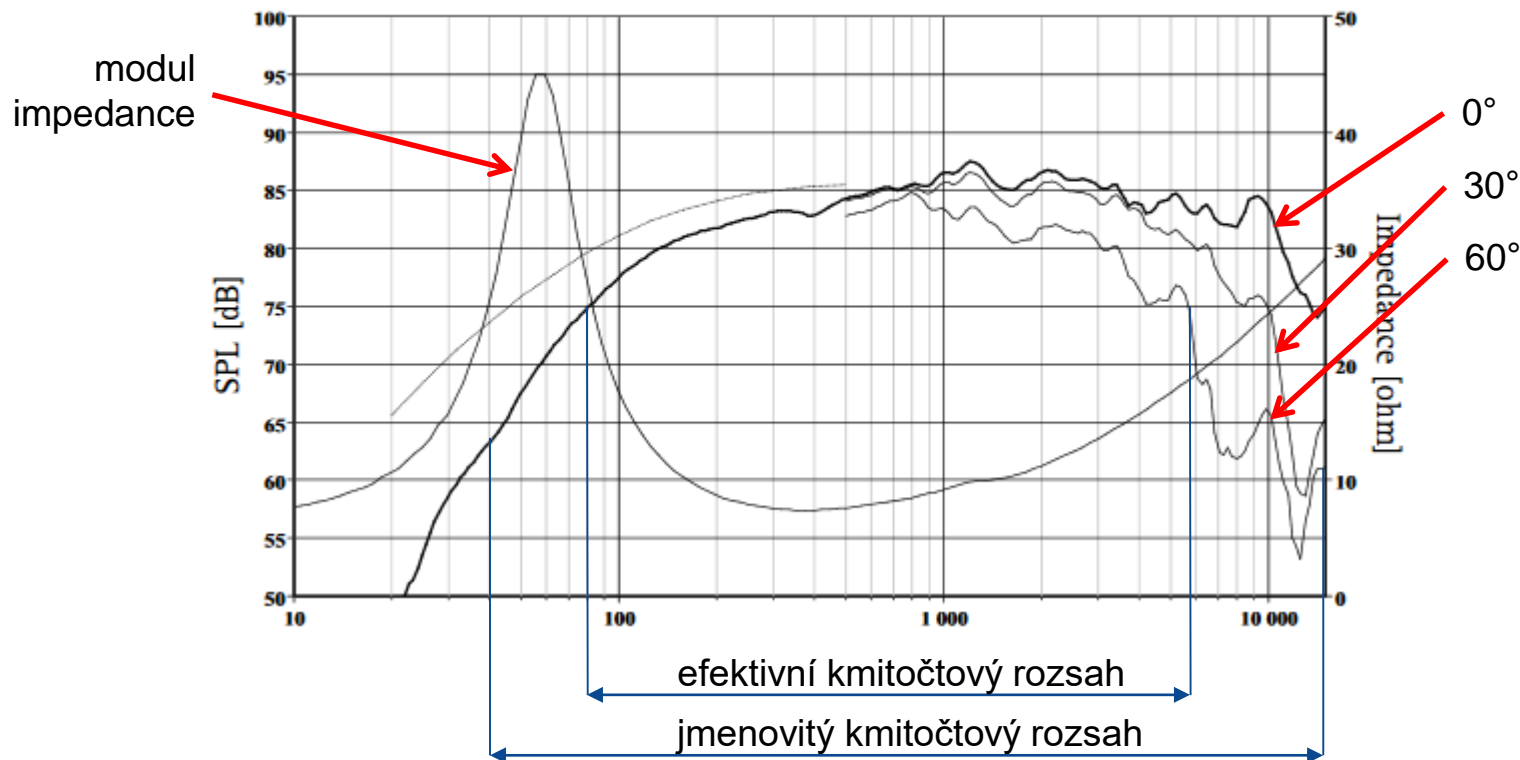
- **Krátkodobý maximální příkon:** 1 sekunda bez trvalého poškození (60 opakování po 1 minutě)
- **Dlouhodobý maximální příkon:** 1 minuta bez trvalého poškození (10 opakování po 2 minutách)
- **Jmenovitý sinusový příkon:** efektivní hodnota napětí harmonického signálu, který reproduktor vydrží bez tepelného nebo mechanického poškození po dobu 100 hodin
- **Zatížitelnost (jmenovitý příkon) podle AES2:** příkon, který reproduktor vydrží po dobu 2 hodin bez trvalé změny vlastností větší než 10%

Parametry reproduktorů

- **Jmenovitý kmitočtový rozsah:** výrobcem stanovený rozsah kmitočtů, pro jejichž reprodukci je výrobek určen
- **Efektivní kmitočtový rozsah:** definován pro pokles modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru o 10 dB oproti průměrné hodnotě akustického tlaku v oktávových pásmech
- **Rezonanční kmitočet:** nejnižší kmitočet, při němž nabývá hodnota impedance reproduktoru maximální hodnotu
- **Přenosová funkce:** závislost amplitudy a fáze akustického tlaku v určitém bodě před reproduktorem při konstantním napětí 1V na svorkách reproduktoru

Kmitočtová charakteristika reproduktoru

- Závislost hladiny akustického tlaku v určitém bodě před reproduktorem při konstantním napětí na svorkách reproduktoru



Parametry reproduktorů

- **Akustický výkon:** celkový akustický výkon vyzářený reproduktorem
 - pro zdroj kulového záření platí

$$P_A = \frac{4\pi x^2}{\rho c_0} p^2$$

p – akustický tlak ve vzdálenosti x , c_0 - rychlost zvuku, ρ - hustota vzduchu

- **Charakteristická citlivost η :** průměrná velikost efektivní hodnoty ak. tlaku v akustické ose reproduktoru ve vzdálenosti 1 m od referenčního bodu při buzení růžovým šumem v kmitočtovém rozsahu reproduktoru se standardním příkonem 1 W.
- **Hladina charakteristické citlivosti** – vyjádření v dB: $20\log(\eta/2 \cdot 10^{-5})$
- **Účinnost η_p :** poměr celkového vyzářeného akustického výkonu k jmenovitému příkonu, vyjádření v dB: $10\log(\eta_p)$
 - přepočítání na hladinu charakteristické citlivosti: $\eta = 112 + 10\log \eta_p$
 - 1% ~ 92 dB, 10% ~ 102 dB, typická účinnost reproduktorů 84 až 105 dB

Parametry reproduktorů

- **Činitel směrovosti:** poměr akustického tlaku v referenční ose reproduktoru ve vzdálenosti 1 m k akustickému tlaku vytvořenému ve stejném místě všesměrovým zdrojem se stejným akustickým výkonem

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

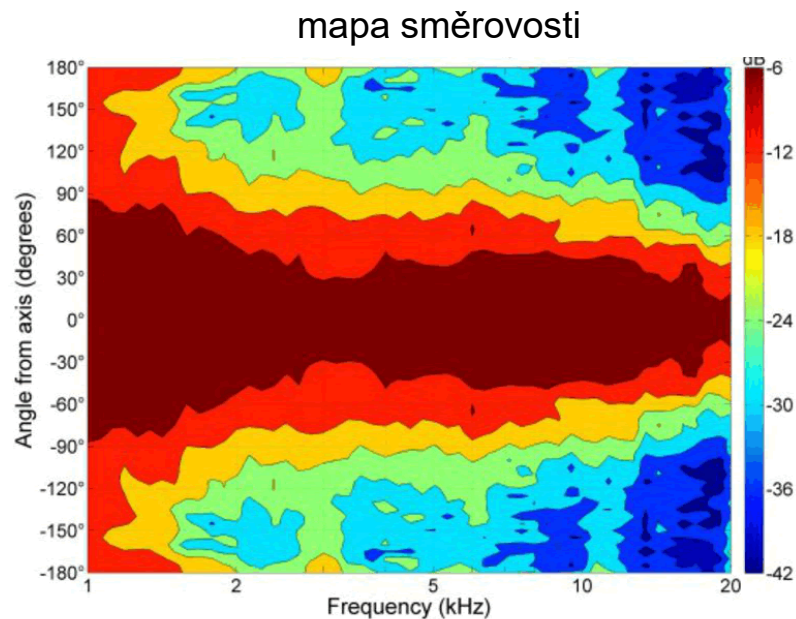
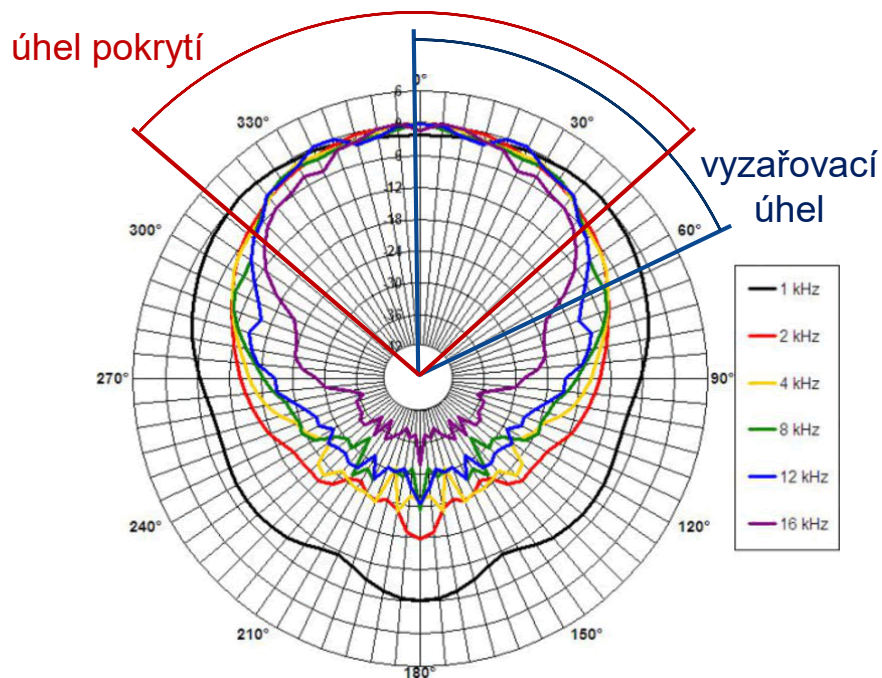
- **Index směrovosti (Directivity Index):** vyjádření Q v dB

$$I_Q = L_{p\alpha} - L_{p\text{stř}} = 10 \log Q$$

- **Vyzařovací úhel:** úhel mezi akustickou osou reproduktoru 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

Směrová charakteristika reproduktoru

- Závislost hladiny akustického tlaku na úhlu mezi spojnicí referenčního bodu a bodu měření s referenční osou reproduktoru



Parametry reproduktorů

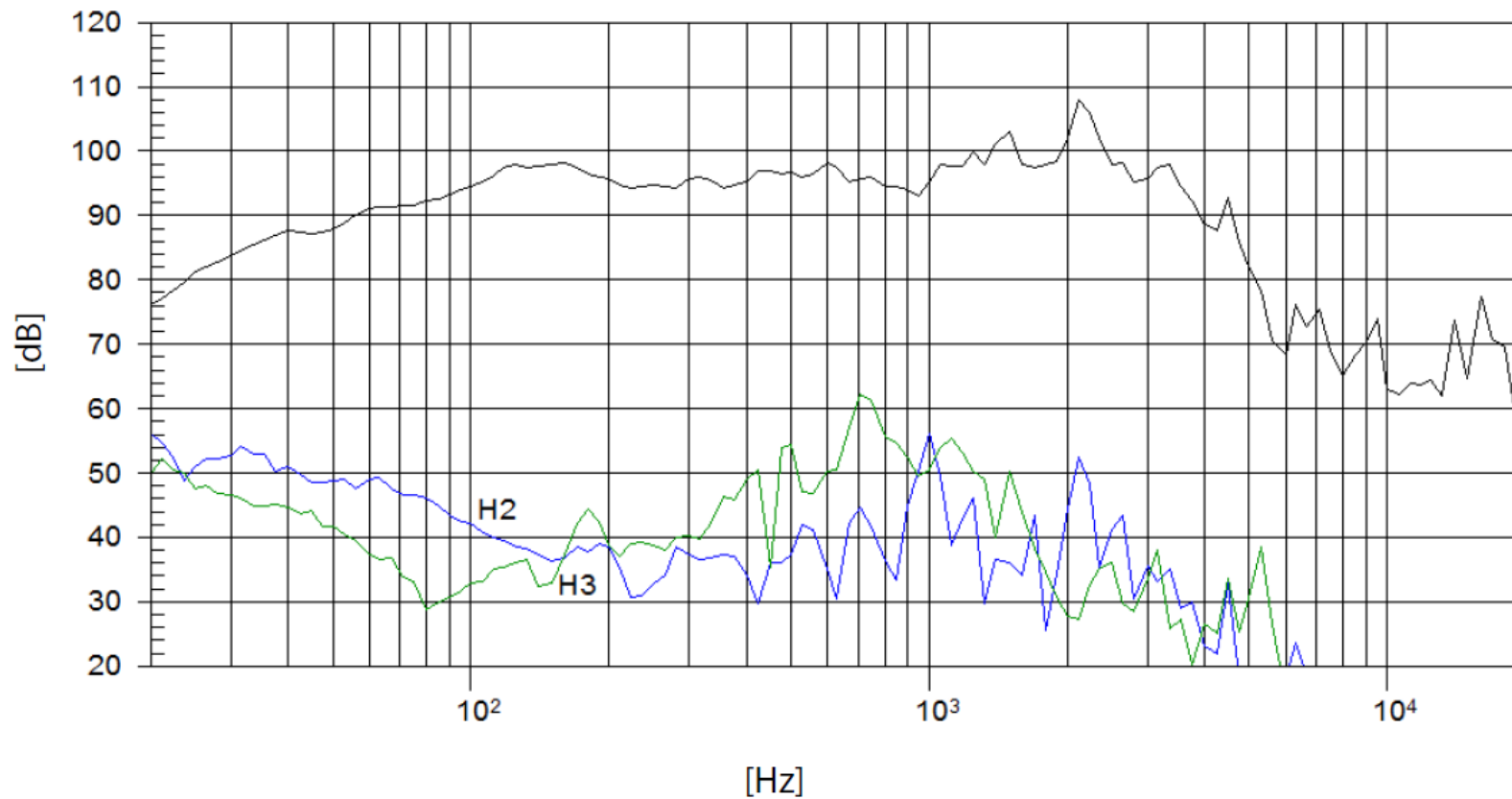
- **Celkové harmonické zkreslení:** poměr efektivní hodnoty akustického tlaku všech vyšších harmonických složek k efektivní hodnotě první harmonické složky při měření ve vzdálenosti 1 m při jmenovitém příkonu

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} P_n^2}}{P_1} \cdot 100 [\%] \quad THD_{dB} = 20 \log \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} p_n^2}}{P_1} [\text{dB}]$$

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

$$THD_n = \frac{P_n}{P_1} \cdot 100 [\%]$$

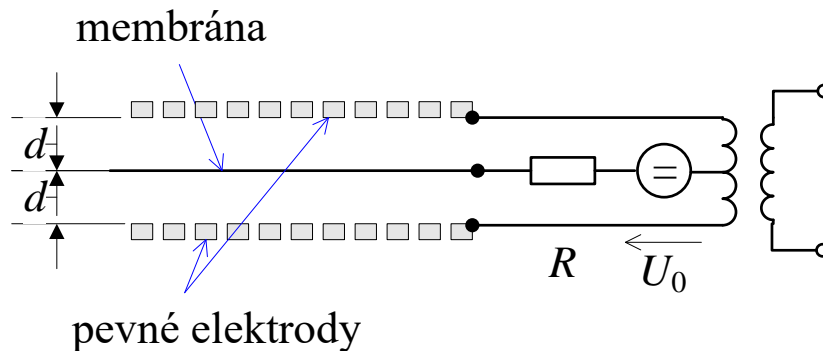
Harmonické zkreslení



Další typy přímovyzářujících reproduktorů

Elektrostatický reproduktor

- Mezi dvěma pevnými perforovanými elektrodami je umístěna tenká membrána z polovodičivého materiálu o velkém povrchovém odporu, na niž je přivedeno přes velký odpor polarizační napětí
 - nízké kreslení, málo zvlněná kmitočtová charakteristika
 - vysoká cena



Elektrostatický reproduktor

- Akustický tlak v oblasti středních kmitočtů:

$$p = C \frac{U_0}{d} \cdot \frac{1}{3\sqrt{S}} \cdot u \frac{1}{x}$$

C – kapacita reproduktoru

U_0 – polarizační napětí

d – polovina vzdálenosti pevných elektrod

S – plocha membrány

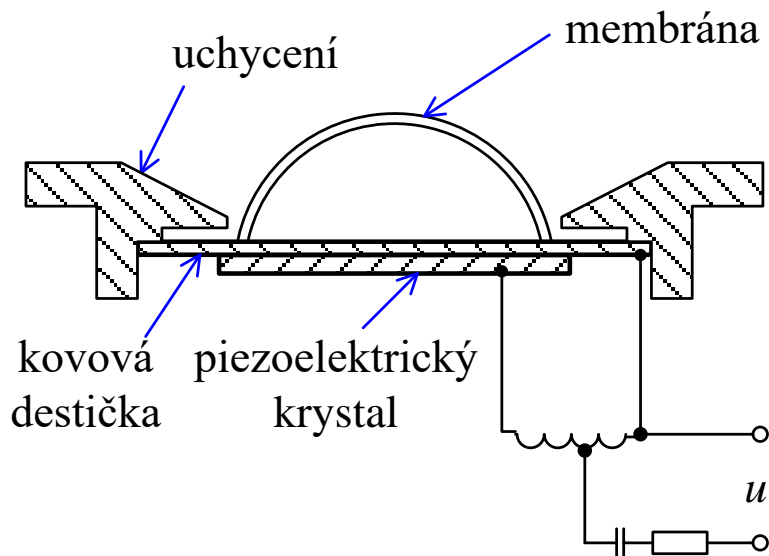
x – vzdálenost od referenčního bodu reproduktoru

u – budící střídavé napětí mezi pevnými elektrodami



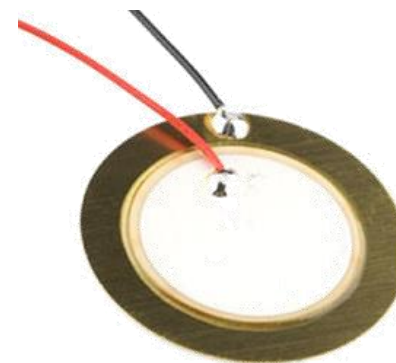
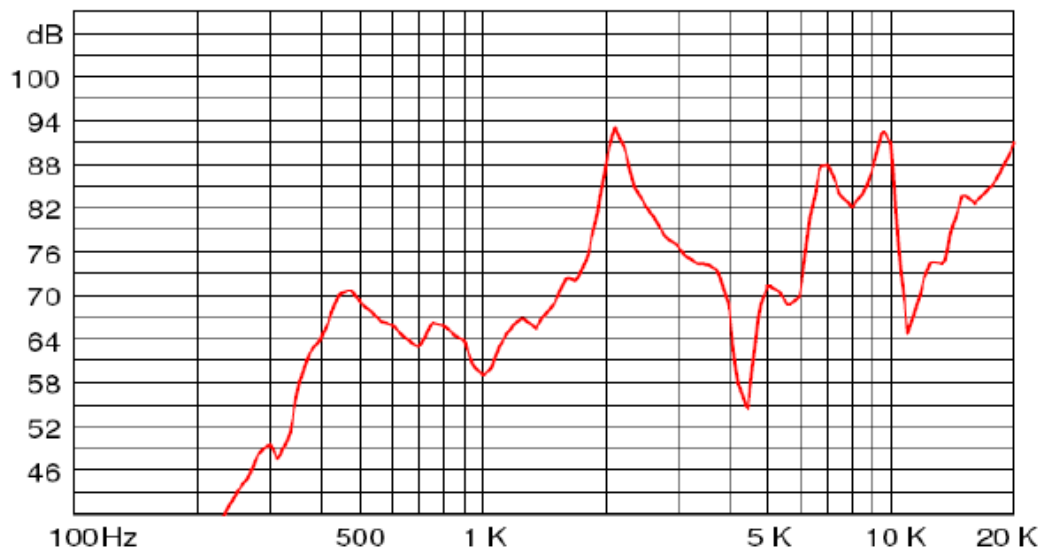
Piezelektrický reproduktor

- Membrána připojená k piezelektrickému elementu, většinou kruhového nebo cylindrického tvaru (disc bender)



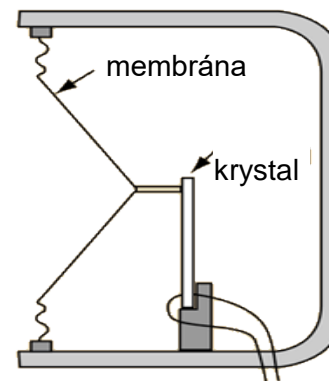
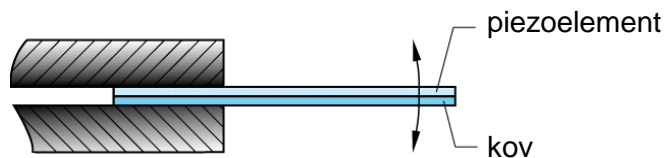
Piezelektrický reproduktor

- Levné, malé vysoká účinnost
- Omezený kmitočtový rozsah, použití pouze u výškových reproduktorů
- Velké zkreslení, zvlněná kmitočtová charakteristika



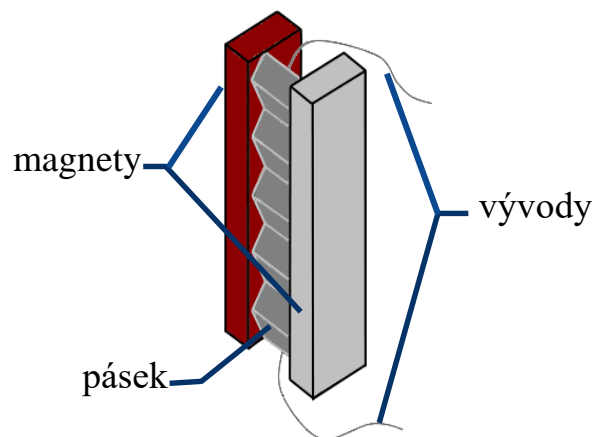
Piezelektrický reproduktor

- Piezelektrické dvojče (bimorph)
 - destička z piezelektrického materiálu spojená s kovovou destičkou, po přiložení napětí se piezelektrický materiál smršťuje, ale destička ne → ohýbání dvojčete
 - místo kovové destičky lze použít dva piezelektrické elementy spojené opačně nebo více vrstev (multimorph)

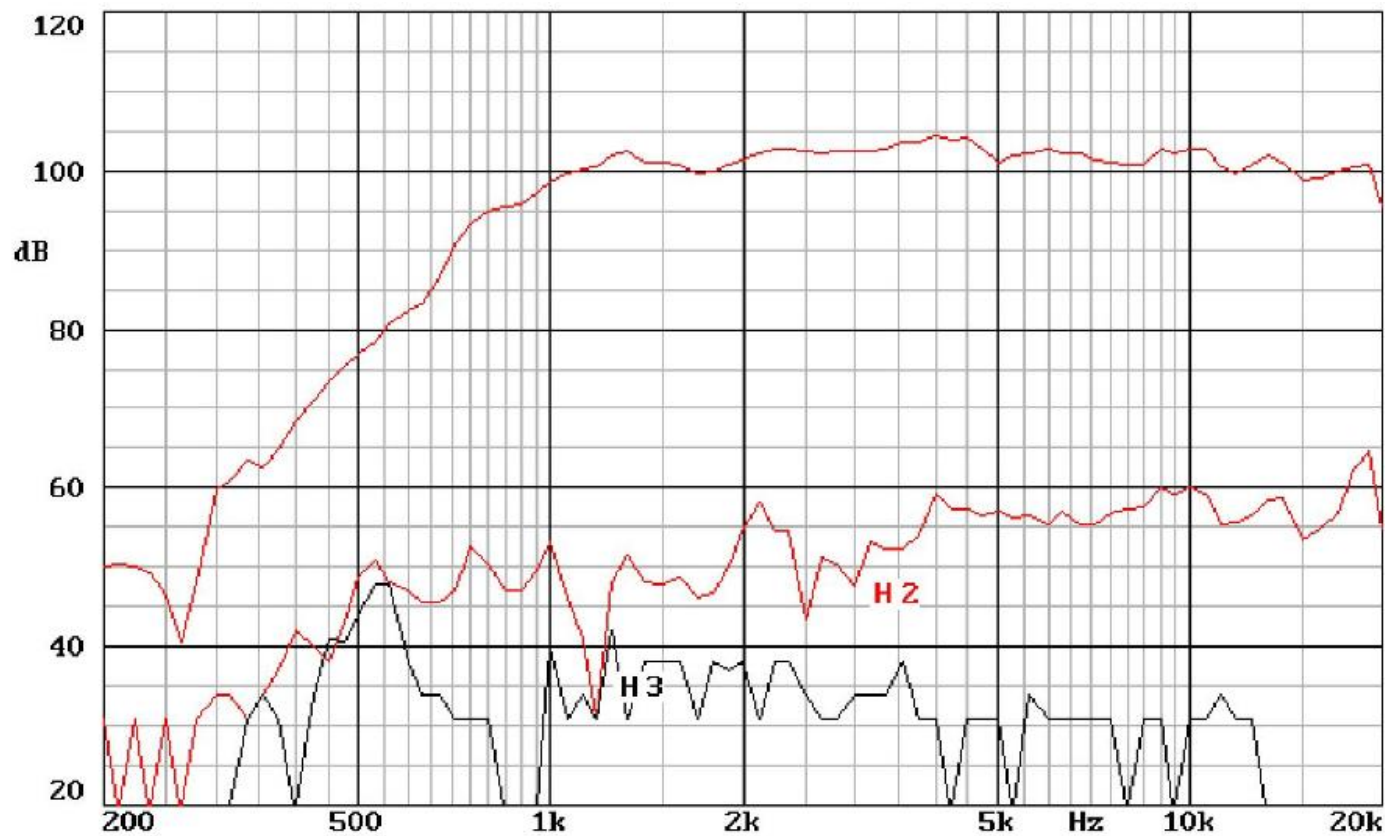


Páskové reproduktory

- Elektrodynamický princip reciproký k páskovému mikrofonu
 - 1) Pásek se pohybuje v poli permanentního magnetu
 - 2) Air-motion: pásek je natahován a smršťován
- transformátor pro přizpůsobení impedance (desetiny Ω na jednotky Ω)
- nízká hmotnost membrány vs. malá výchylka \rightarrow vhodné pro střední a vysoké kmitočty
- nízké zvlnění kmitočtové charakteristiky



Páskové reproduktory

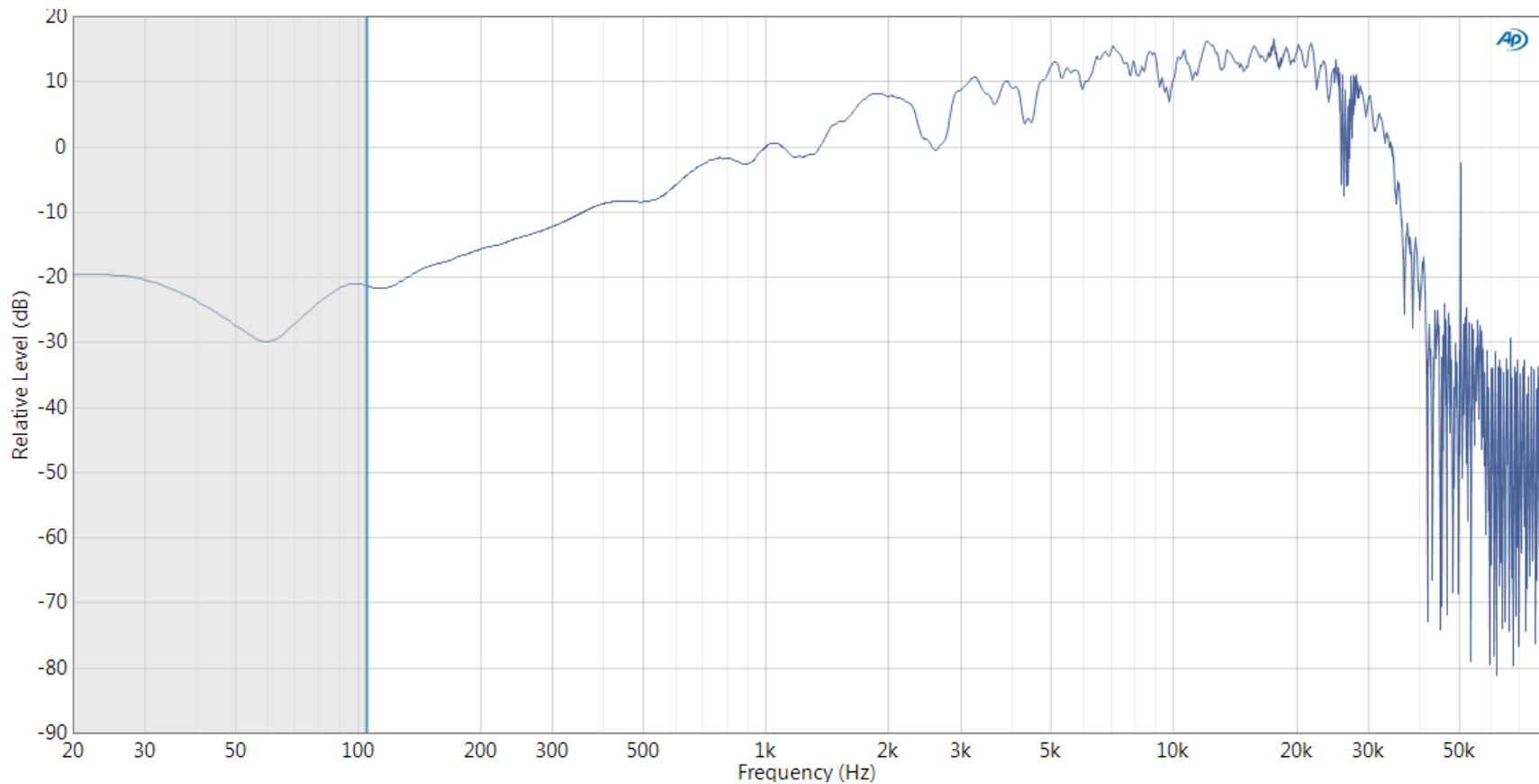


Plazmový (iontový) reproduktor

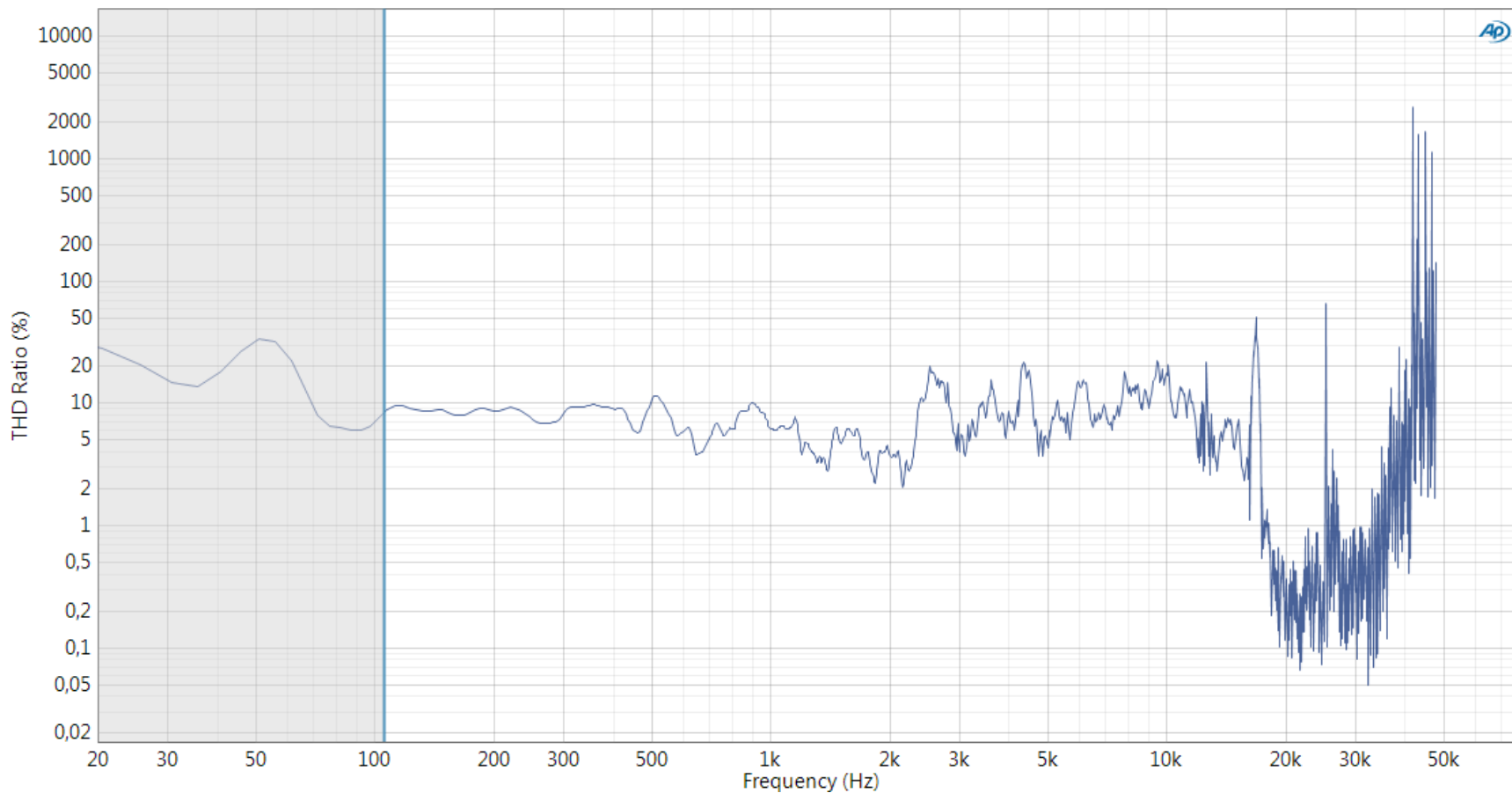
- Místo pevné membrány je změna tlaku vzduchu (akustický tlak) vyvolána změnou velikosti plazmového výboje nebo elektrického oblouku (obvykle koronární), který se chová jako nehmotný vyzařovací prvek a vytváří ve vzduchu kompresní vlny ve slyšitelném spektru.
 - omezený kmitočtový rozsah (výškové reproduktory)
 - vysoké zkreslení
 - vysoká cena



Plasmový reproduktor

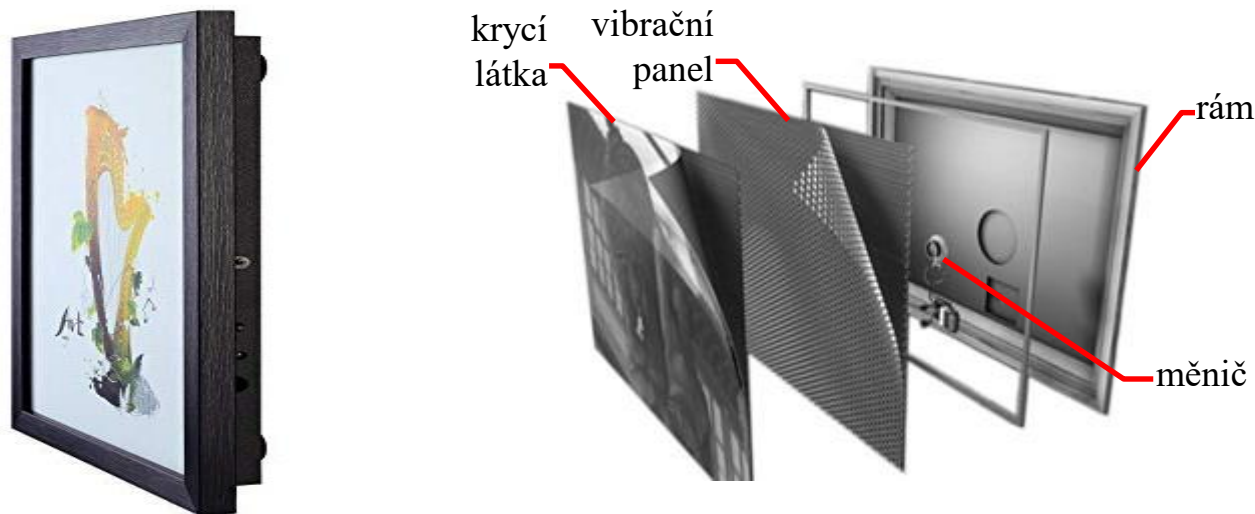


Plasmový reproduktor



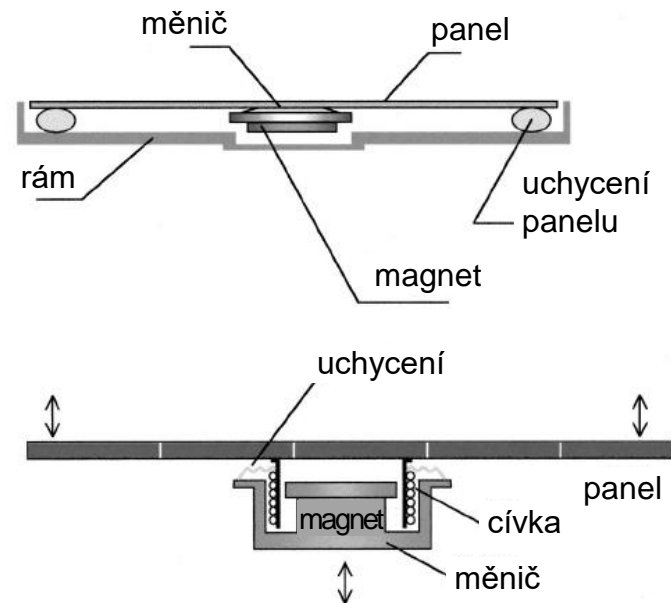
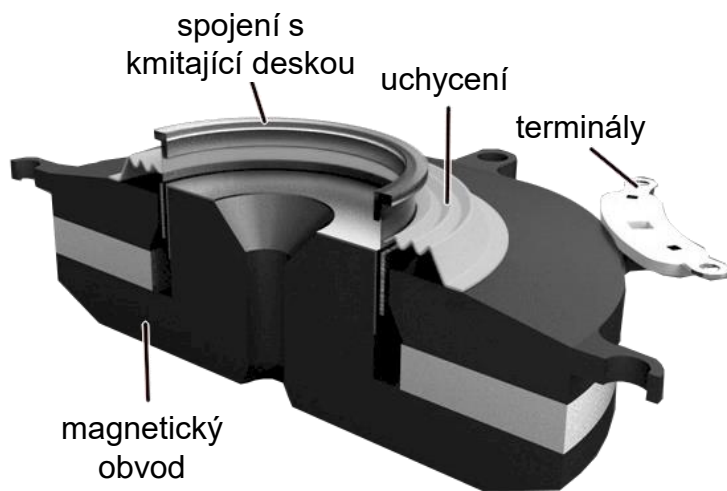
DML (Distributed Mode Loudspeaker)

- Plochý panel, ve kterém je zvuk produkován pomocí měničů vytvářejících rovnoměrně rozložené vibrační módy
 - méně zvlněná kmitočtová charakteristika do vyšších kmitočtů
 - širší vyzařovací úhel → lepší pokrytí poslechového prostoru

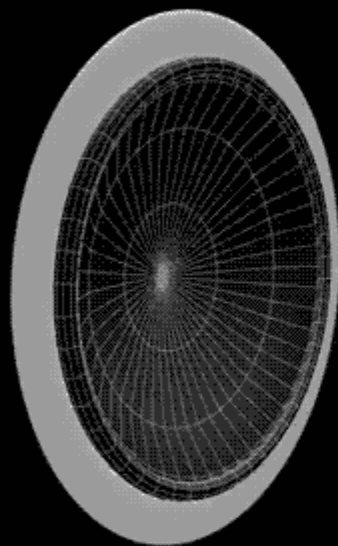


DML (Distributed Mode Loudspeaker)

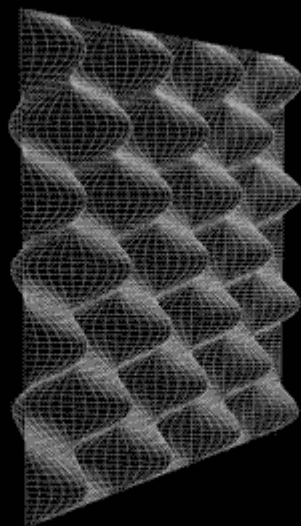
- Buzení: elektrodynamické a piezoelektrické měniče umístěné tak, aby odpovídaly přirozenému rezonančnímu módu panelu



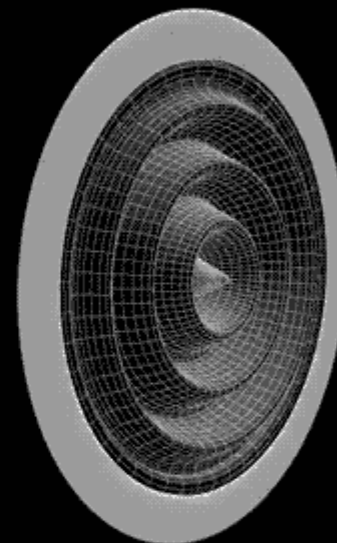
How does BMR speaker technology work?



Pistonic speaker driver



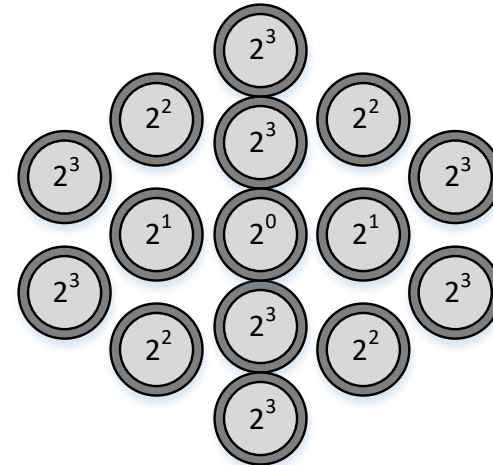
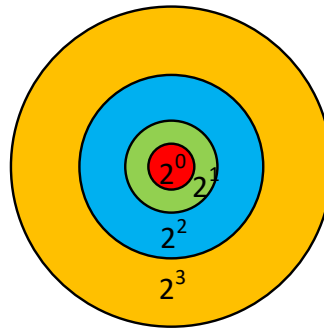
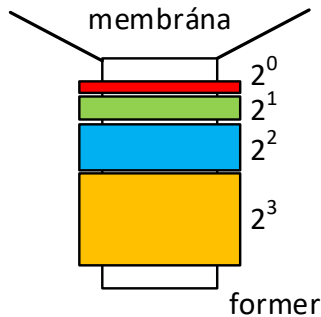
Flat panel speakers



BMR speaker technology

Digitální reproduktory

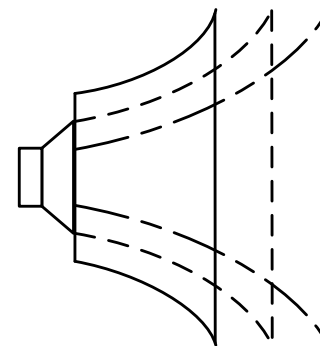
- Bity digitálního zvukového signálu se přivedou na měniče, jimiž generované akustické tlaky jsou přímo úměrné váze jednotlivých bitů
 - 1) sčítání mechanických sil v měniči s více cívkami s váhovaným počtem závitů (gyrační konstantou Bl)
 - 2) sčítání akustických tlaků vyvolaných měniči s membránami s váhovanými aktivními plochami (převod síly na akustický tlak $p = F/S_d$)
 - 3) sčítání akustických tlaků vyvolaných větším počtem měničů se stejnou aktivní plochou membrány, počet měničů je součtem geometrické řady 1, 2, 4, 8, ...



Nepřímovyzářující reproduktory

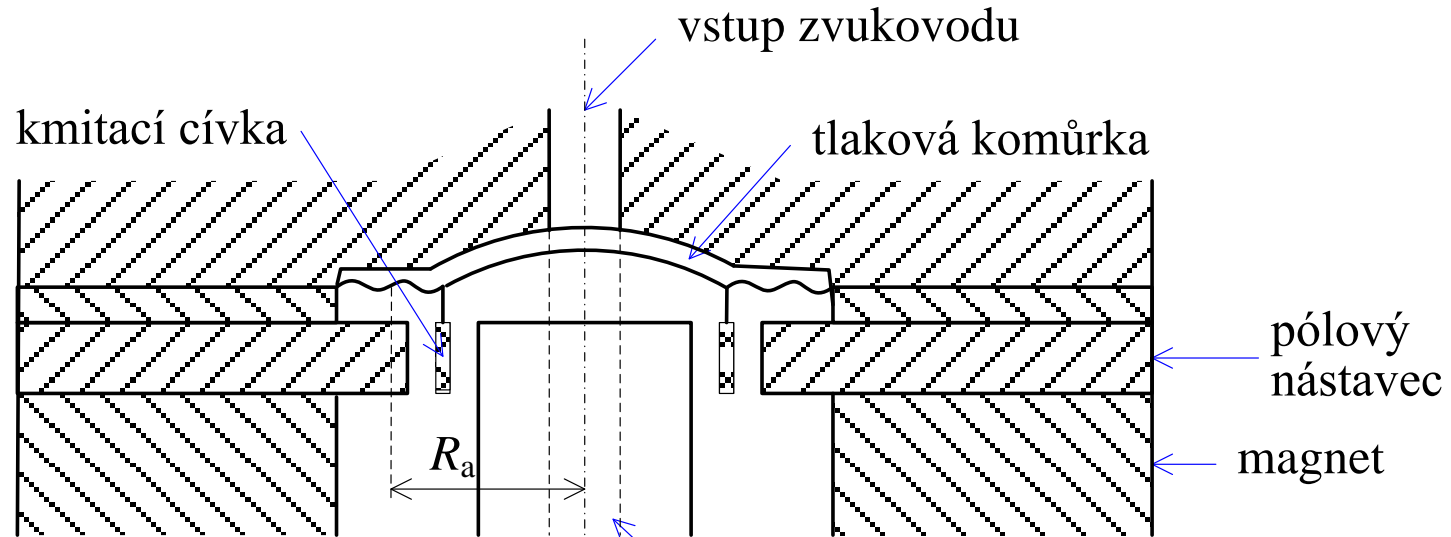
Nepřímovyzářující reproduktory

- Membrána je s vnějším prostředím spojena zvukovodem (tlakový měnič)
 - plocha membrány je menší než hrdlo zvukovodu
 - plocha membrány je stejná jako hrdlo zvukovodu – zvětšení zatížení membrány, vyšší vyzářený akustický výkon
 - vstupní plocha zvukovodu je menší než plocha membrány (kompresní měnič) – transformace vyzářeného výkonu v poměru čtverců ploch membrány a zvukovodu



Nepřímovyzařující reproduktory

Uspořádání elektrodynamického tlakového reproduktoru



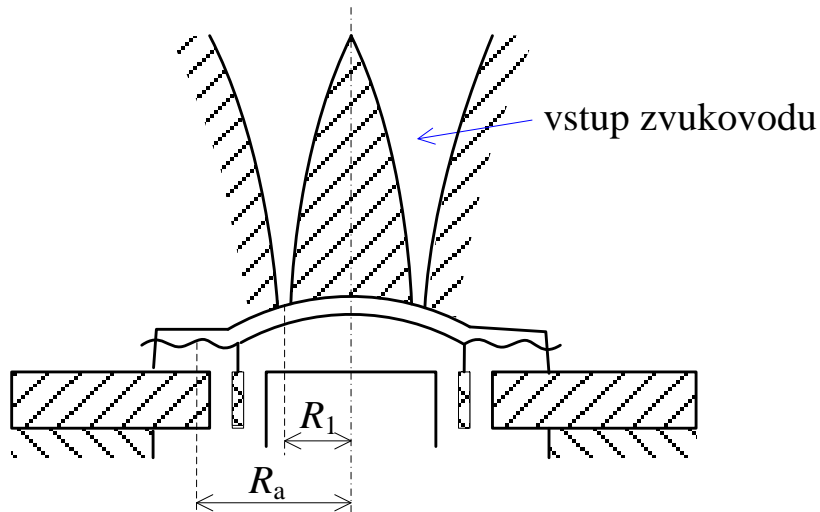
Nepřímovyzařující reproduktory

- Pokud není délka vlny přenášeného signálu větší než průměr membrány, vznikají v prostoru tlakové komůrky radiální kmity, které ovlivní kmitočtovou charakteristiku, to lze omezit změnou vyústění zvukovodu, tzv. fázovou vsuvkou.



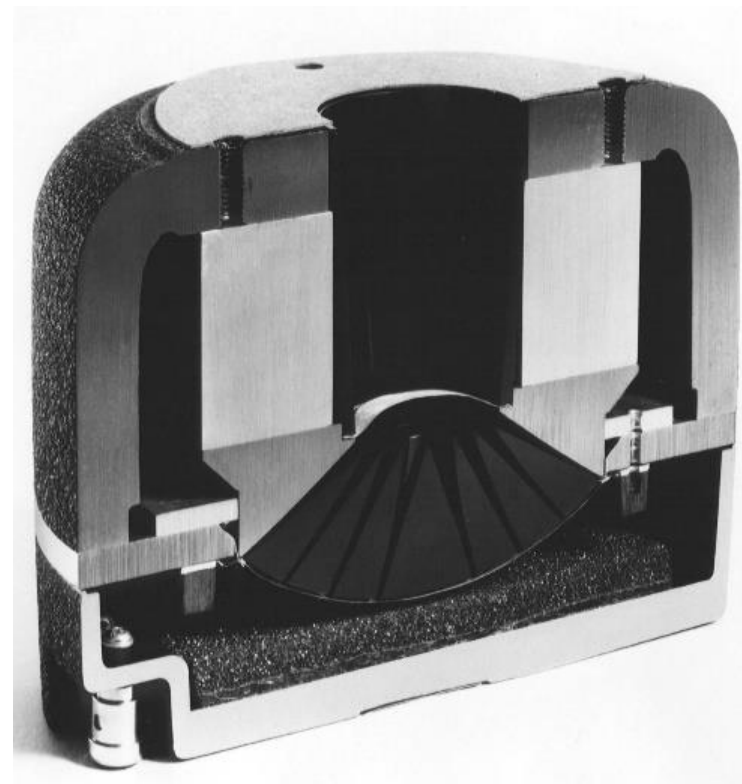
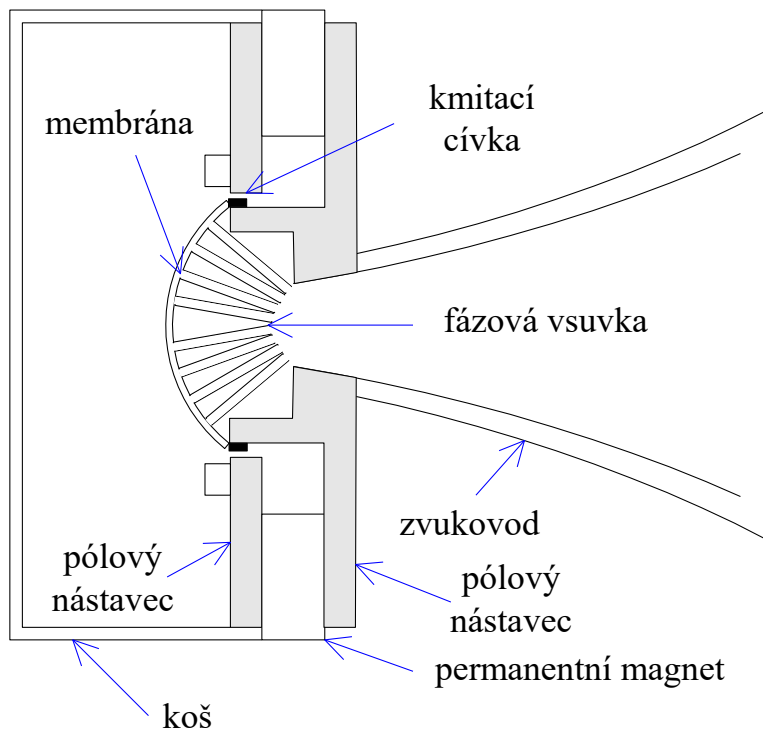
Nepřímovyzařující reproduktory

- Konvexní kompresní měnič



Nepřímovyzařující reproduktory

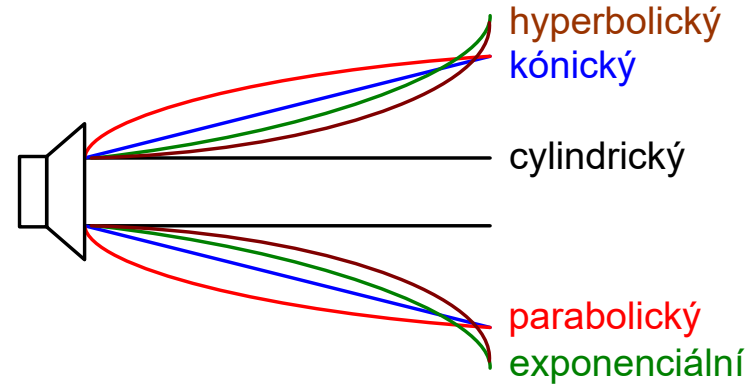
- Konkávní kompresní měnič



Typy zvukovodů

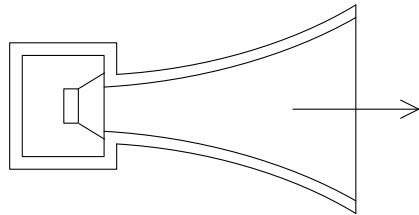
- Tvar:

- hyperbolický
- parabolický
- exponenciální
- kónický
- cylindrický

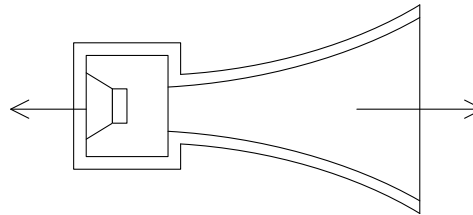


- Umístění reproduktoru:

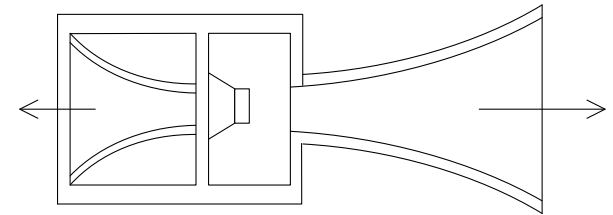
front-loaded



back-loaded

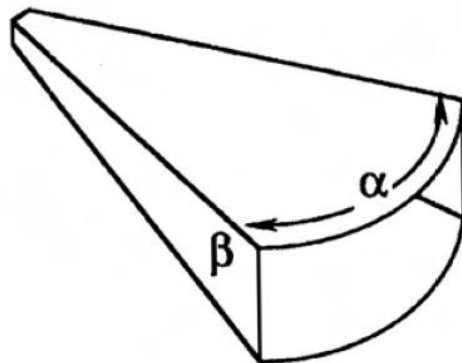


kombinace



Směrová charakteristika zvukovodu

- Tvar zvukovodu ovlivňuje směrovou charakteristiku reproduktoru v horizontální a vertikální rovině

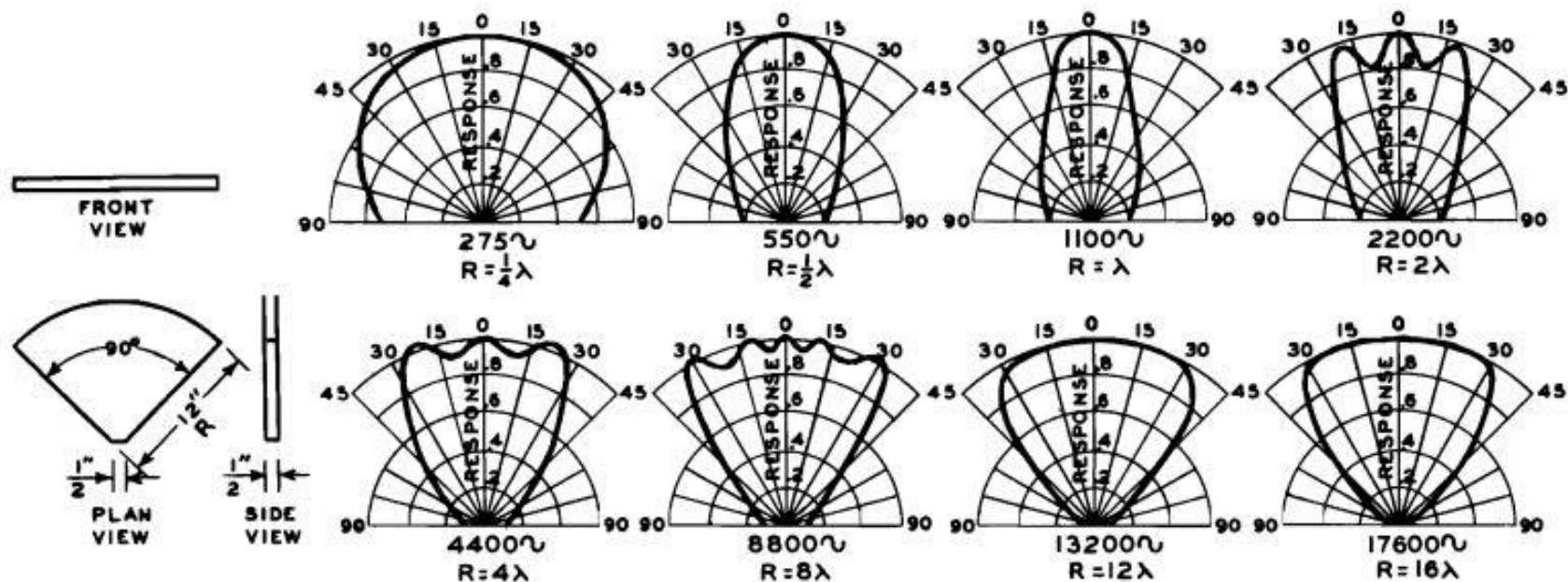


$$Q = \frac{\pi}{\arcsin\left(\sin\frac{\alpha}{2}\sin\frac{\beta}{2}\right)}$$

Směrová charakteristika zvukovodu

- Tvar zvukovodu ovlivňuje směrovou charakteristiku reproduktoru v horizontální a vertikální rovině

směrová charakteristika štěrbinového kónického zvukovodu různé délky



Sluchátka

Typy sluchátek

- s uzavřeným objemem (circumaural, around-ear): dutina náušníku přiléhá na povrch hlavy a překrývá celé ucho
- náušní (supra-aural, on-ear): přikládá se na vnější ucho
- vkládané za záhyb boltce (supra-concha, small on-ear): přikládá se na okraj vnějšího zvukovodu
- vkládané do dutiny boltce (intra-concha, earbud): vkládají se do ústí zvukovodu, akustický výstup u vstupu zvukovodu
- vsuvné (insert, in-ear): spojené s nástavcem vkládaným se částečně nebo zcela do vnějšího zvukovodu



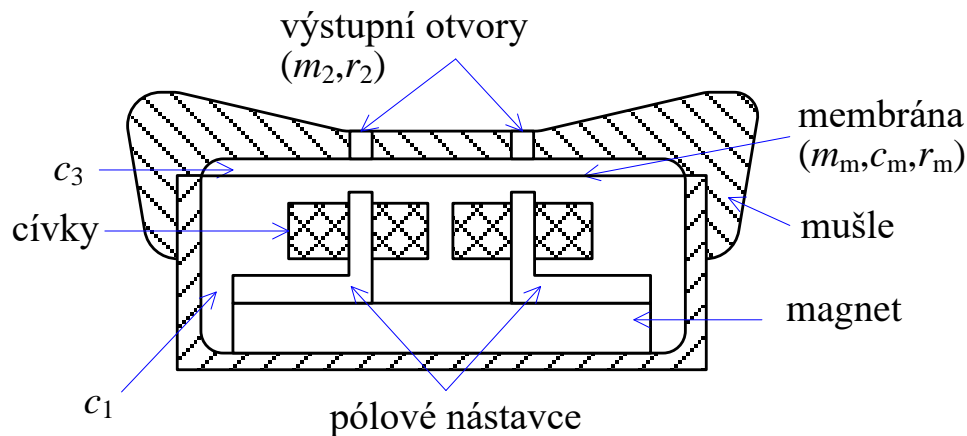
Typy sluchátek

- Akustická vazba mezi vnějším prostředím a ušním kanálem:
 - akusticky otevřená sluchátka (acoustically open earphone) – záměrně obsahuje akustickou cestu mezi vnějším prostředím a zvukovodem
 - akusticky uzavřená sluchátka (acoustically closed earphone)
- Vyzařování zadní stranou měniče:
 - sluchátko s otevřenou zadní stranou (open-back earphone) vyzařuje významné akustické záření ze zadní strany měniče do vnějšího prostředí
 - sluchátko s uzavřenou zadní stranou (closed-back earphone)



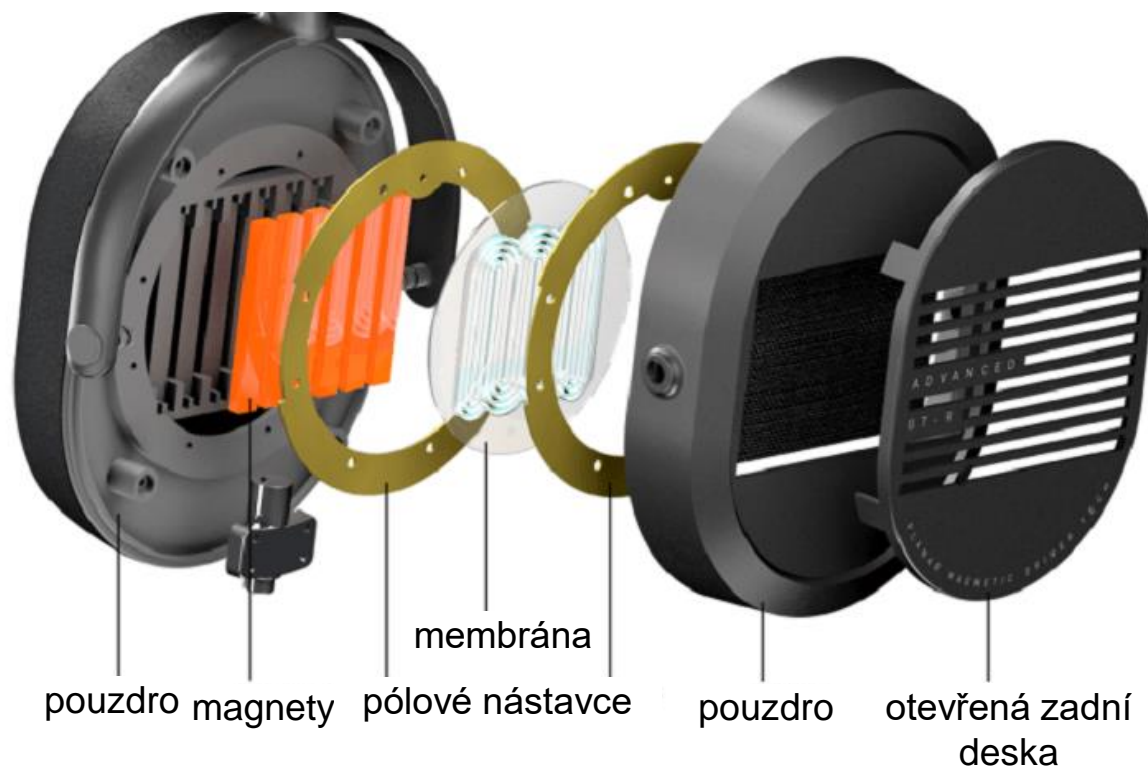
Elektromagnetická sluchátka

- Nesymetrické nebo symetrické elektromagnetické měniče
- Mušle sluchátka se přikládá těsně k ušnímu boltci aby dutina mezi výstupními otvory mušle a vstupem ucha byla utěsněna
- Membrána tvoří část magnetického obvodu



Elektromagnetická sluchátka

- Planární technologie



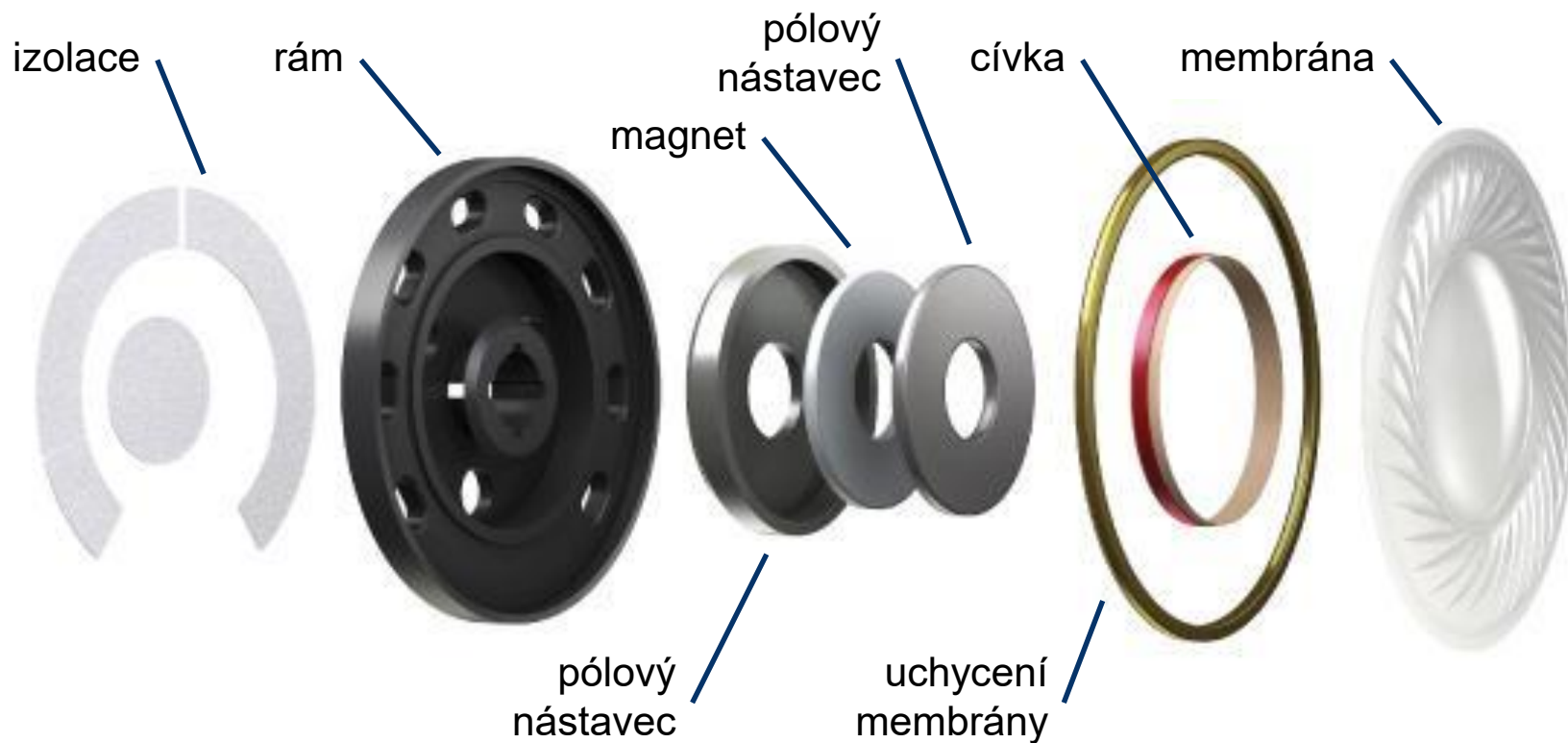
Elektrodynamická sluchátka

- Princip konstrukce s kmitací cívkou shodný s elektrodynamickým reproduktorem
- Lehká membrána (plastové fólie, polymery, kompozitní, grafen, ...)



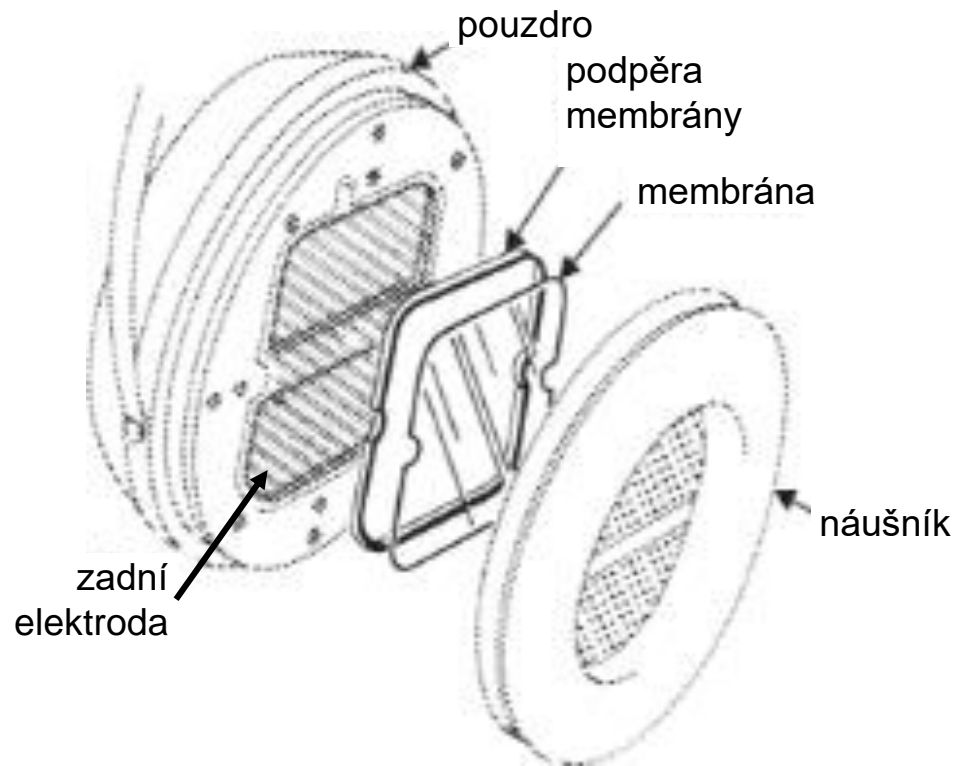
Elektrodynamická sluchátka

- Praktické provedení



Elektrostatická sluchátka

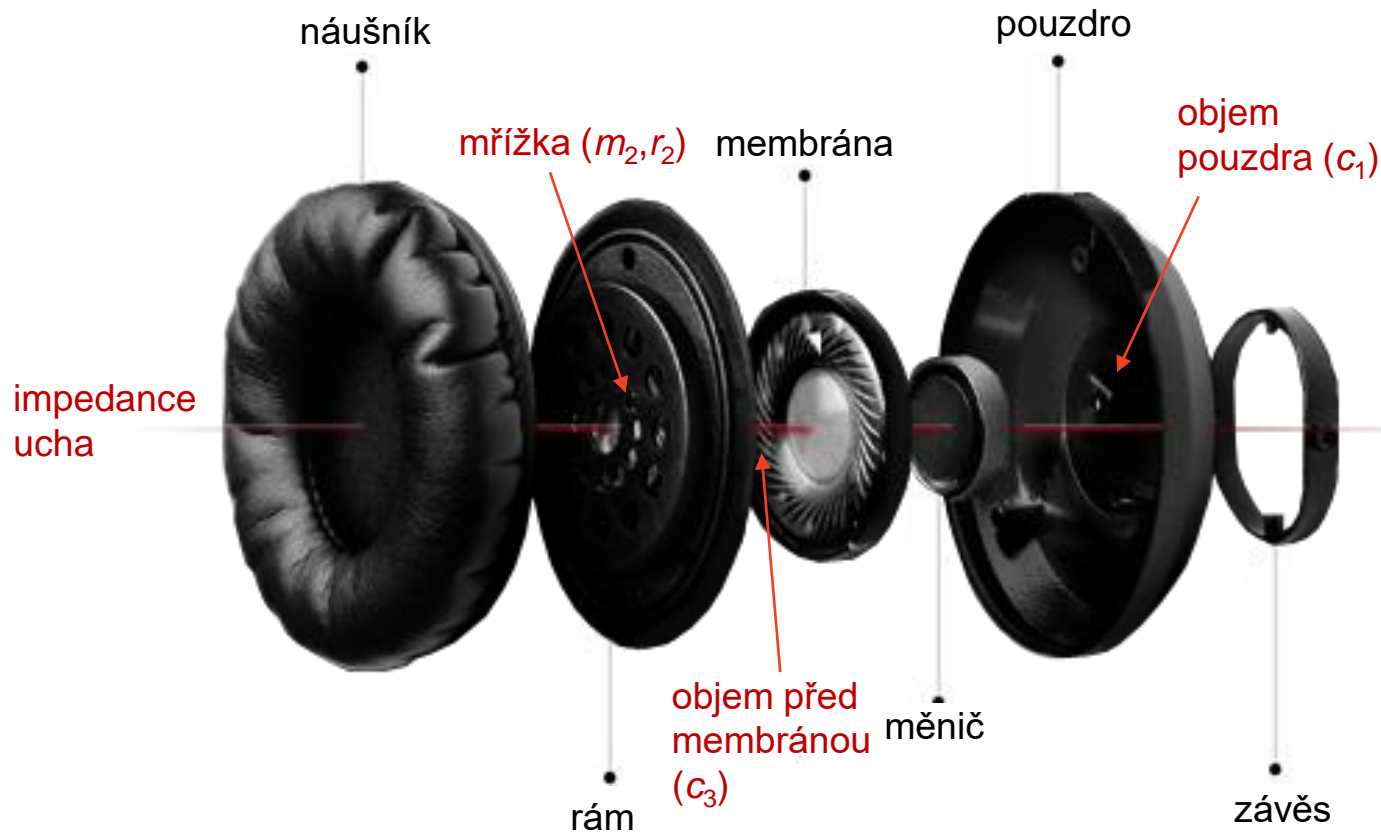
- Extrémně tenká membrána, nutnost polarizačního napětí
- Nízké zkreslení, vysoká cena



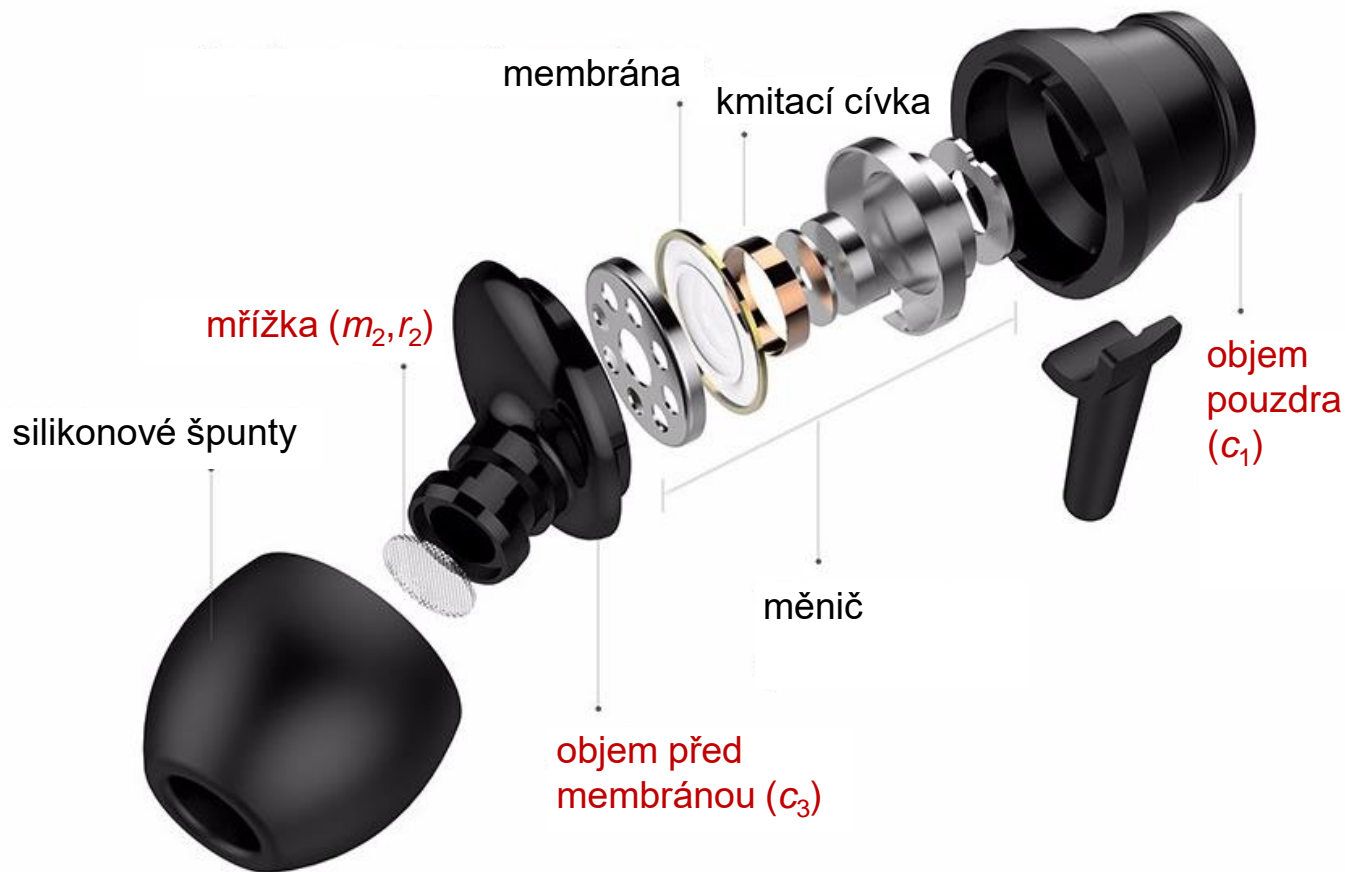
Sluchátka s uzavřeným objemem

- Náušníky o velkém objemu ($>20 \text{ cm}^3$)
- Vliv stojatých vln v dutině náušníku se potlačuje vyplněním prodyšným pěnovým materiálem (pěnovým polyuretanem)
- V oblasti středních kmitočtů soustava funguje jako akustický odporový dělič s kmitočtově nezávislým dělicím poměrem
- V oblasti vysokých kmitočtů membrána sluchátka vyzařuje akustickou energii jako přímovyzařující reproduktor, což je umožněno velkou dutinou náušníku

Sluchátka s uzavřeným objemem



Vsuvná sluchátka



Reproduktory a sluchátka