



## Elektro – akustický převod Reproduktory

Co a proč hraje lépe?

**Pavel Kůrka**  
[www.audiolabk.cz](http://www.audiolabk.cz)

## Obsah

1. Úvod.....	3
2. Elektroakustické měniče .....	3
3. Elektrodynamický reproduktor přímo-vyřazující .....	4
3.1. Pohon reproduktoru.....	5
3.2. Membrána reproduktoru .....	8
3.3. Vystředění a závěs membrány .....	9
4. Situace na trhu s reproduktory .....	11
5. Shrnutí požadavků na elektroakustické měniče .....	11



# 1. Úvod

Minule jsme se zaměřili na zesílení signálu na úroveň potřebnou pro reproduktorové soustavy. Dnes se budeme zabývat vlastním elektroakustickým převodem elektrického signálu na akustický, tedy samotnými reproduktory.

## 2. Elektroakustické měniče

I když je dnes jasné, že existuje již relativně hodně realizovaných a fungujících principů pro převod elektrického signálu na akustický, jako jsou: Elektrodynamický, elektromagnetický, elektrostatický, piezoelektrický, plazmový, pneumatický atd. Zaměřím se pouze na elektrodynamické reproduktory, protože jsou jednak nejrozšířenější na současném trhu a také hlavně proto, že s těmito reproduktory jsem realizoval všechny své projekty a testy. I tyto reproduktory se vyrábí ve dvou provedeních, a to přímo-vyřazující anebo nepřímó-vyřazující.

**Přímo-vyřazující reproduktory** – jejich kmitající membrána je bezprostředně navázána na prostředí, do kterého je vyzařována akustická energie (takže ji vidíme, viz obrázky dole). Jsou to nejobvyklejší typy reproduktorů, jaké známe prakticky odevšad. Jejich obvyklá účinnost nepřevyšuje několik málo procent.

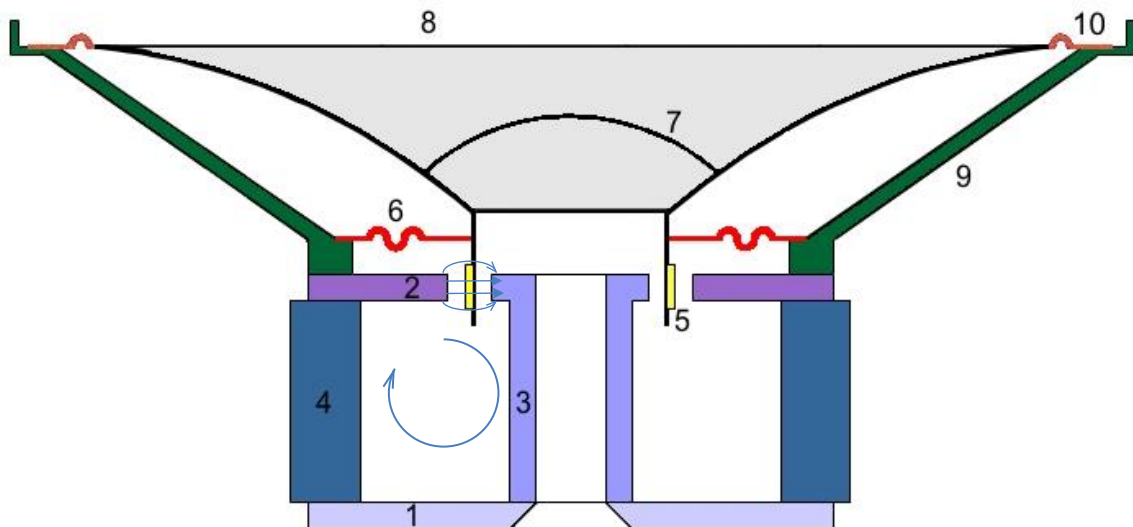


**Nepřímo-vyřazující (tlakové) reproduktory** – mají vložen mezi prostředím, do kterého se akustická energie vyzařuje a mezi membránou zvukovod, popřípadě další pomocné akustické obvody. Toto uspořádání obvykle zvyšuje účinnost takového elektroakustického měniče a umožňuje dosahovat vysokých vyzářených výkonů, nebo tvarovat směrový diagram případně jinak dále upravit vyzařovací charakteristiky. S těmito reproduktory se setkáváme zejména u profesionálních reproduktorových soustav pro ozvučení velkých sálů či koncertů.



**Pavel Kůrka**  
[www.audiolabk.cz](http://www.audiolabk.cz)

### 3. Elektrodynamický reproduktor přímo-vyřazující



Na výše uvedeném obrázku vidíme standardní elektrodynamický reproduktor, který funguje na principu vzájemného ovlivňování dvou magnetických polí. První magnetické pole je tvořeno permanentním magnetem (4) a druhé magnetické pole elektrickou cívkou (5). Magnetický tok v prvním magnetickém obvodu tvořeném prstencovým permanentním magnetem (4) teče prioritně v magnetickém obvodu tvořeném z magneticky velmi dobře vodivých materiálů, a to z magnetu (4) přes horní desku (2), vzduchovou mezeru, ve které se pohybuje cívka (5), do pólového nástavce (3) a přes spodní desku (1) zpět do magnetu (4). Protože pohon reproduktoru je kruhový, vše se děje rovnoměrně po celém obvodu prstencového permanentního magnetu.

Přivedením akustického signálu do cívky (5) vzniká magnetické pole, které vyvolá pohyb cívky nahoru nebo dolů, podle polaritý signálu, a tím pohybuje membránou (8), která vytváří akustický signál přesně ve tvaru akustického signálu přivedeného do cívky (5).

Membrána je rozkmitávána silou  $F$ , která je zdrojem zvukové vlny.

$F = B \cdot I \cdot l$  [N], kde  $F$  je síla,  $B$  magnetická indukce,  $I$  proud,  $l$  délka.

Protože objem vzduchu vytlačovaný membránou představuje akustický tlak (čím větší vytlačený objem, tím větší akustický tlak) a vytlačovaný objem je plocha membrány krát výška zdvihu, je tedy zřejmé, že reproduktor 1 s dvakrát menší plochou než reproduktor 2 musí vytvářet výchylku membrány  $Y$ , která je dvakrát větší než u reproduktoru 2 s dvakrát větší plochou. Síla potřebná pro vytlačení daného objemu vzduchu (vytvoření požadovaného akustického tlaku), musí být dostatečně velká, aby daný objem vzduchu s danou rychlostí dokázala bez zkreslení vytlačit.

Pokud se podíváte na výše uvedený obrázek reproduktoru, uvidíte, že membrána je spojena s kostrou reproduktoru na dvou místech, a to dole středícím prvkem („středičkou“) (6) a nahoře závěsem membrány (10). Tyto dva prvky působí proti síle vytvářené cívkou (5), protože brání volnému pohybu membrány. Musí tu však být, protože jejich základní funkcí je držet membránu v pracovní poloze, aby cívka (5) byla umístěna správně v magnetické mezeře.

Z tohoto základního vysvětlení funkce je tedy zřejmé, že ideální elektrodynamický reproduktor by měl kromě své kvalitní a pevné kostry mít:

1. Nekonečně silný pohon.
2. Nekonečně lehkou a nekonečně pevnou membránu.
3. Nekonečně lehký závěs a poddajnou středičku ve směru pohybu membrány a nekonečně pevný závěs a středičku ve směru kolmém na požadovaný pohyb membrány.

To samozřejmě nelze splnit, pokud ovšem chceme co nejkvalitnější poslech, je dobré se tomu alespoň co nejvíce přiblížit.

### 3.1. Pohon reproduktoru

Velmi důležité je chápat, co se děje v magnetické mezeře. Na výše uvedeném obrázku vidíte dvě šipky rovné, znázorňující homogenní magnetické pole a dvě šipky zahnuté, znázorňující nehomogenní magnetické pole. Je zřejmé, že homogenní magnetické pole je pouze mezi vodorovnými stěnami, kde přechází magnetický tok z magneticky vodivého materiálu do vzduchu pod úhlem  $90^\circ$ . Magnetické siločáry znázorňující magnetický tok, který vzniká v prostoru pod a nad vzduchovou mezerou, nejsou rovné, ale zahnuté a mají větší délku. Magnetická indukce v tomto prostoru je menší a se vzdalováním se od prostoru vzduchové mezery se dále snižuje. Je tu tedy velmi nelineární! Cívka reproduktoru, která vytváří druhé magnetické pole se zde dokáže sice také pohybovat, ale její elektro-akustický přenos zde není lineární, protože pohybem ven ze vzduchové mezery klesá magnetická indukce a tím klesá síla působící na cívku a tím i na membránu reproduktoru. Reproduktor slábne a tím zkresluje. Chcete-li tedy, aby reproduktor co nejméně zkresloval, musíte mít dostatečně vysokou vzduchovou mezeru a to tak, aby i při uvažované maximální výchylce membrány nevyjela cívka mimo vzduchovou mezeru. Výše uvedený obrázek tedy ukazuje variantu reproduktoru, který bude zbytečně zkreslovat! Správně by výška cívky (5) měla být menší, než je tloušťka horní (a zároveň spodní) desky mínus předpokládaná maximální výchylka membrány krát dvě (cívka se nesmí ani při maximální hlasitosti vychýlit mimo vzduchovou mezeru ani nahoře ani dole).

Kdo již někdy počítal magnetické obvody, tak ví, že pokud použiji stejný magnet a dám k němu vyšší horní a spodní desku, zvýší se mi sice vzduchová mezeru, ale

sníží se mi magnetická indukce v mezeře a pohon reproduktoru bude mít menší sílu!! (Klesne jeho citlivost). (Viz níže uvedený vzorec pro výpočet síly).

Mohu sice vzduchovou mezeru zkrátit, čímž sice zvýším magnetickou indukci v mezeře, zmenším tím ale prostor pro pohyb cívky (5) a může se stát, že cívka bude drhnout o horní desku a reproduktor bude nepoužitelný. Jediná rozumná možnost je tedy použít silnější magnet (4). To ale zásadně prodraží reproduktor, a to je možná ten hlavní důvod, proč to už dnes téměř nikdo nedělá.

Pokud se podíváte na vzorec výpočtu síly pohonu reproduktoru,

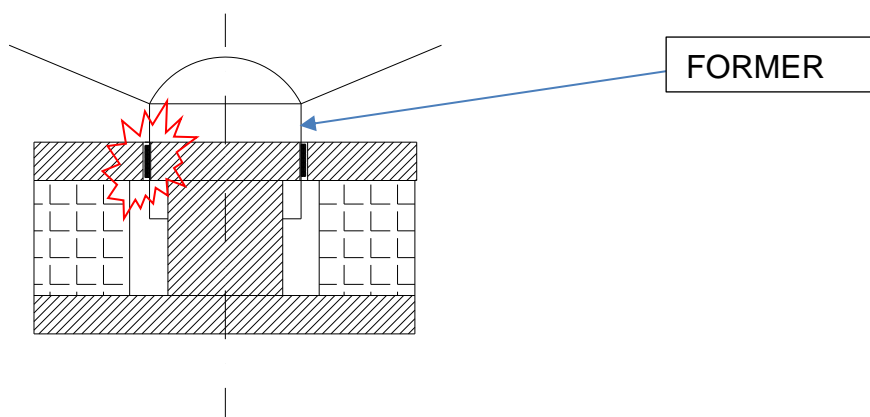
$$F = B \cdot I \cdot l$$

uvidíte, že sílu pohonu můžeme zvýšit i zvýšením proudu přes cívku (5) nebo zvýšením délky vodiče cívky pracující ve vzduchové mezeře.

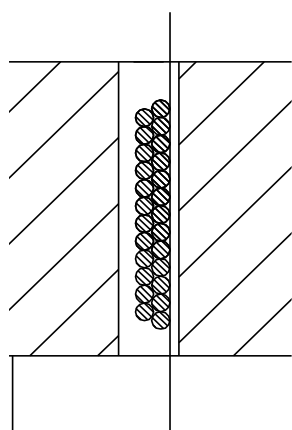
Pokud budete zvyšovat proud, limituje vás teplo vznikající průtokem proudu. Cívku sice můžete vyrobit ze silnějšího vodiče, toho se vám ale do dané vzduchové mezery nevejde moc a tím ho zkracujete a vyrábíte cívku s velmi nízkou impedancí, se kterou může mít problém výstupní zesilovač. V minulosti se kvůli koncovým zesilovačům, které v té době byly elektronkové používaly reproduktorové soustavy s impedancemi 16 nebo 32 Ohmů. Postupem času, a hlavně vývojem polovodičových zesilovačů schopných pracovat i s nižšími impedancemi, se začaly používat impedance 8 a 4 Ohmy. Dnes už, zejména kvůli automobilovému průmyslu, kde se používá napájecí napětí pouze 12V, se používají běžně i impedance 2 Ohmy. U takovýchto nízkých impedancí je velmi těžké realizovat složitější výhybky, které by byly rozumně kvalitní, takže pro vysoce kvalitní sestavy používáme impedance vyšší, a to 8 ale i 16 Ohmů.

Vlastní cívka se většinou namotává na tzv. former (v nejjednodušší formě se jedná o papírovou ruličku), který se potom přilepí k membráně. Pokud pro výrobu cívky používáme standardní vodič s kruhovým průřezem, dostaneme nepříliš dobrý činitel plnění cívky, protože mezi jednotlivými závitů vzniká vždy vzduchová mezera. Pro kvalitnější reproduktory se proto začalo využívat vodičů s obdélníkovým průřezem, kde mezi jednotlivými závitů nevzniká prakticky žádná vzduchová mezera a celý prostor je vyplněn mědí pracovního vodiče, která přenáší maximální množství proudu a tím pracuje s nejvyšší možnou silou. Rozdíl mezi oběma variantami (kruhový a obdélníkový průřez vodiče je vidět na následujících obrázcích. První obrázek znázorňuje v řezu, kde se nachází cívka ve vzduchové mezeře magnetického obvodu reproduktoru, druhý obrázek znázorňuje detail cívky v provedení z kruhového vodiče, kde vidíte výše zmiňované vzduchové mezery mezi jednotlivými závitů, a na třetím obrázku vidíte provedení cívky z páskového vodiče obdélníkového průřezu, který prakticky nemá mezi závitů vzduchové mezery a využívá tím lépe prostor vzduchové mezery než varianta s vodičem s kruhovým průřezem.

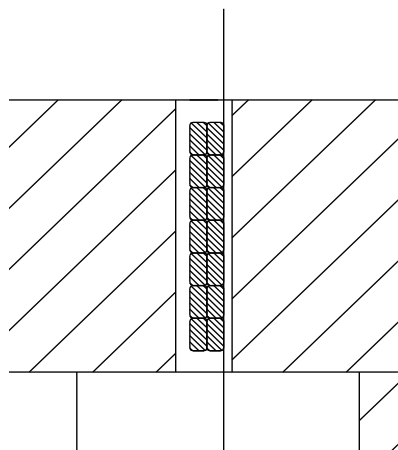
## Znázornění umístění cívky reproduktoru



## Detail provedení cívky reproduktoru s vodičem o kruhovém průřezu



## Detail provedení cívky reproduktoru s páskovým vodičem obdélníkového průřezu



Někteří výrobci z důvodů odvodu tepla z cívky vyrábí former z hliníkového plechu, který působí jako přídavný chladič, protože má zásadně větší plochu než cívka samotná. Reproduktor pak umožňuje přenášet velmi vysoké výkony. Pro kvalitní audio se však vůbec nehodí, protože hliníkový kroužek působí ve vzduchové mezeře jako závit nakrátko, takže celý systém zásadně brzdí a reproduktor vůbec nehraje detaily.

Pokud se jedná o výšku cívky, vyrábí hodně výrobců cívky o hodně vyšší, než je výška vzduchové mezery. Využívají tím i řídňoucí magnetické pole i mimo vzduchovou mezeru. Má to ale dva zásadní problémy. Magnetické pole kolem vzduchové mezery v tomto provedení magnetického obvodu, který se používá pro elektrodynamické reproduktory není nikdy stejné nad a pod vzduchovou mezerou. Takže síly působící na horní část se liší od sil působících na spodní část a reproduktor zkresluje. Kdyby byl magnetický obvod dostatečně vysoký (magnet by musel být vysoký) a provedení vzduchové mezery by zajistilo stejné magnetické pole nad a pod vzduchovou mezerou (do hodně velké vzdálenosti) a cívka by byla vyšší, než účinek tohoto magnetického pole + výška zdvihu, pak by to fungovalo správně. To ale nikdo nedělá.

Protože velké basové reproduktory (15 a více palců) se vyrábí zejména pro akustické soustavy pro velké (venkovní) ozvučení, jsou konstruovány zejména na velmi vysoké výkony. Běžně i 1000 W. Aby se reproduktor při tak vysokých výkonech mechanicky nepoškodil, používá se běžně i více střediček a velmi pevné závěsy membrány. Reproduktor sice zvládne i tak vysoké výkony, jenže jeho kvalita zásadně klesá, velmi často i rezonanční kmitočet je vyšší než nejnižší tóny hudebních nástrojů, takže výsledek je žalostný.

Výrobci zaměřující se na excelentní kvalitu i při vyšších výkonech vyrábí former z nehořlavých a elektricky a magneticky nevodivých materiálů (např. Kaptonu skelných vláken apod.).

## 3.2. Membrána reproduktoru

Membrána reproduktoru má za úkol celou svou plochou homogenně vyzvednout daný objem vzduchu odpovídající požadovanému akustickému tlaku. Jenže cívka tlačí na membránu pouze na malém mezikruží uprostřed, membrána je středěna a držena v pracovní poloze dole středičkou a nahoře po jejím obvodu závěsem. Pokud ovšem není dostatečně pevná, tak dochází na její ploše při jejím pohybu (když na ně zespoda tlačí cívka a brzdí je středička, závěs a hmotnost vytlačovaného vzduchu) k ohybům, které způsobují nehomogenní vytlačování objemu vzduchu v různých místech membrány a tím ke zkreslení.

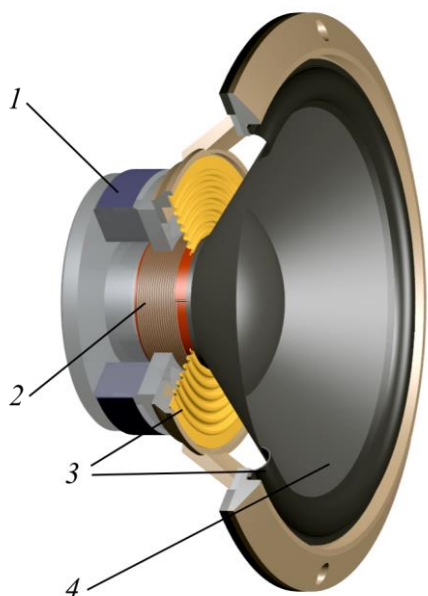


Membrány musí proto být velmi pevné a velmi lehké, aby s nimi pohon reproduktoru zvládal pracovat. Levnější High-End řešení používají papírové membrány vyztužené speciálními laky nebo i speciálními vlákny. Střední cenové kategorie používají polypropylenové materiály nebo kevlar a uhlíková vlákna. Existuje dnes i výrobce, používající velmi tenké a lehké kaloty (membrány vysoko tónových reproduktorů) z umělého diamantu, ty jsou ale velmi drahé. Velmi kvalitně hrají i kalotové reproduktory s hedvábnou kalotou a dají se i zaplatit. Nikdy jsme nedosáhly dobrých výsledků s kovovými membránami, které někteří výrobci také používají. Jsou sice pevné a lehké, kov ale většinou velmi dobře vodí zvuk, takže se velmi jednoduše dostává do vlastních rezonancí. Tyto rezonance jsou navíc většinou ve středním zvukovém pásmu, kde je lidský sluch nejcitlivější a jsou tím velmi rušivé.

### 3.3. Vystředění a závěs membrány

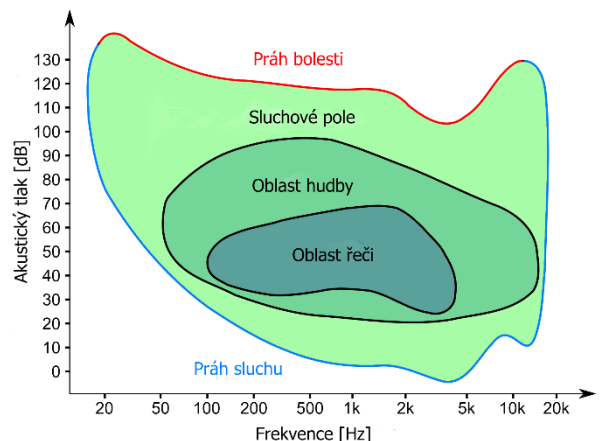
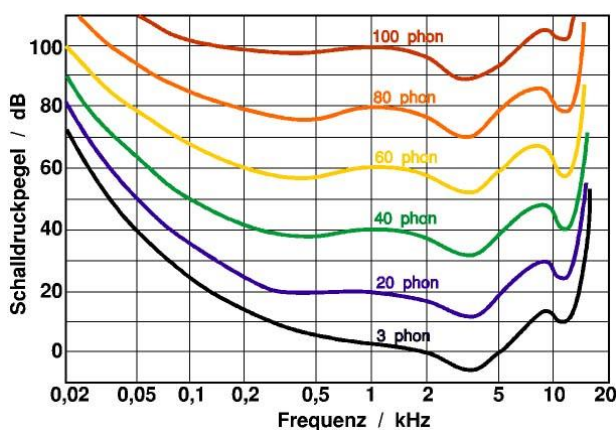
Zřejmě nejobtížněji řešitelná část reproduktoru. Jak jsme si již řekli, potřebujeme udržet membránu s cívkou uprostřed ( v ose) vzduchové mezery a nechceme, aby ani středička ani závěs membrány, jakkoliv bránily pohybu membrány ve směru akustického výstupu.

Jenže čím větší výchylka membrány, tím větší je vliv odporu středičky a závěsu membrány. Na níže uvedeném obrázku jsou středička a závěs pod číslem tři. Středička na obrázku je žlutá a vystředuje former ve vzduchové mezeře a závěs na obrázku je černý a slouží k uchycení vnějšího okraje membrány ke kostře reproduktoru.



U výškových reproduktorů je pohyb membrány tak malý, že se ani středičkou ani závěsem zabývat nemusíme. U středových reproduktorů je to už ale nutné. U

středových reproduktorů dostupných na trhu většinou není problém se středíčkou, ale hlavně s pohonem reproduktoru a někdy s materiálem membrány a závěsu. Kdo se již výrobou reproduktorových zabýval, ví, že středové reproduktory jsou absolutním základem věrné reprodukce. Jenže zkuste na trhu najít kvalitní středový reproduktor se silným pohonem, kvalitními materiály membrány, středíčky a závěsu. Protože citlivost lidského sluchu je největší cca v pásmu 300 až 5 kHz a rozdíl v citlivosti oproti okrajům pásma slyšitelnosti je i při dost vysokých hlasitostech poslechu běžně i 20dB, musí tato část pásma být vždy hrána co nejkvalitnějším elektroakustickým měničem! (Pro lepší představu o rozdílu v citlivosti lidského sluchu je nutné si uvědomit, že pokles o 20dB v akustickém tlaku představuje 100x menší akustický výkon!). Frekvenční charakteristiky lidského sluchu jsou uvedeny na obr. níže.



Na druhém obrázku vidíte barevně odlišené oblasti akustických tlaků, ve kterých je použitelný lidský sluch. Nejtmaší část ukazuje oblast při standardním rozhovoru, světlejší oblast znázorňuje to, co nás zajímá v okamžiku kvalitního poslechu hudby a zbytek ukazuje hraniční možnosti lidského sluchu od prahu slyšitelnosti do prahu bolesti.

Z uvedených grafů také vyplývá, že pro stejnou úroveň hlasitosti basů (frekvencí pod 0,1 kHz, řekněme při hlasitosti 80 phon – v grafu označeno žlutě), budeme-li porovnávat lidský hlas, dejme tomu 500 Hz, např. s velkým bubnem – dupákem, který má cca 63Hz, pak musíme být schopni vytvořit svým basovým reproduktorem akustický tlak o 20dB při 63Hz vyšší než akustický tlak hlasu při 500 Hz. Jak jsme si již řekli ve článku 3.2., vyšší akustický tlak vyrobíme vyšším vytlačeným objemem vzduchu nad plochou membrány. Protože rozdíl požadovaných akustických tlaků je tak vysoký, musí být tak vysoký i rozdíl vytlačených objemů. Z toho je jasné, že basový reproduktor bude vždy velmi namáhaný vysokými zdvihy membrány a tím velmi ovlivňován nejen pevností membrány, ale i kvalitou středíčky a závěsu. A jak již víme, čím vyšší zdvih membrány, tím vyšší zkreslení reproduktoru. Pro co nejlepší poslech basů, musí tedy být membrána basového reproduktoru co největší, aby mohl být jeho zdvih pro daný akustický tlak co nejmenší. Pro co nejkvalitnější přenos i nejnižších frekvencí je proto nutné mít i v sestavě pro domácí poslech basový

**Pavel Kůrka**  
[www.audiolabk.cz](http://www.audiolabk.cz)

reproduktor dostatečných rozměrů (min. 12 palců). Ten vůbec nemusí být na 1000 W. Stačí max. 200 nebo 300 W, stačí jedna velmi měkká střediska a pevná a lehká membrána. Nutný je i nízký rezonanční kmitočet. Vždy musí být pod nejnižším kmitočtem poslouchaného hudebního nástroje. Jak jsme se již zmínili ve článku 3.1. je však velmi těžké takový reproduktor sehnat.

## 4. Situace na trhu s reproduktory

Podle našich dosavadních zkušeností nebudete mít problém sehnat kvalitní výškové reproduktory. Výrobců je mnoho a pokud zvolíte správné pracovní body, tak budou hrát velmi dobře. Pokud přejdeme na střední pásmo, dostanete se do mnohem větších problémů, protože kvalitní středové reproduktory pro námi požadované frekvenční pásmo prakticky nejsou. Má-li středový reproduktor bez problémů a s plnou kvalitou zahrát frekvence od cca 80 Hz, nepočítejte s tím, že použijete běžně nabízené čtyř nebo pěti palcové reproduktory. Kdo zná trochu teorii o výhybkách tak ví, že má-li reproduktor hrát kvalitně od 80 Hz, musí být schopen hrát i frekvence téměř o oktávu nižší, aby se dal kvalitně doplnit basovým reproduktorem a nevytvářel na dělicím kmitočtu fázové problémy. Máme vyzkoušené, že optimální velikost je cca 8 palců, protože takový reproduktor má velmi nízký rezonanční kmitočet a pokud má silný pohon, lehkou a velmi pevnou membránu, tak dokáže hrát bez problémů přes 10 kHz. Navázání výškového reproduktoru je pak kvalitní a umožní nám použít výhybky s lineární fází.

Pokud se jedná o basové reproduktory, tak situace na světovém trhu se také zásadně změnila, protože skvělé basové reproduktory s velmi vysokou kvalitou vyráběla jedna firma v jižní Americe. Jenže firma byla koupena silnější Americkou konkurencí a ta okamžitě tuto řadu basových reproduktorů přestala vyrábět. Můžete si sice koupit reproduktory nového majitele, jenže oficiálně prezentovaná naměřená jakost je i více než čtyřikrát nižší. Možná se i kvalitní reproduktory vyrábí, možná je má třeba B&W, jenže samotné reproduktory si nekoupíte a celé soustavy jsou velmi drahé. Vysoce kvalitní reproduktory se dají vyrobit i u nás. Pokud se podíváte na stránky [www.nve.cz](http://www.nve.cz), najdete zde reproduktorové soustavy, do kterých si akustické měniče vyrábí výrobce sám, protože s požadovanou (a i dosahovanou) kvalitou nikdo takové reproduktory nevyrábí. Obrázek takové reproduktorové soustavy máme na stránce s obsahem. Nutné samozřejmě slyšet.

## 5. Shrnutí požadavků na elektroakustické měniče

Pokud si upravíte svou poslechovou místnost (návod na jednoduché úpravy najdete ve volně stažitelném souboru na našem webu), pak druhým nejdůležitějším krokem

je vyřešit způsob reprodukce. Připravte se ovšem na to, že to není vůbec jednoduché. Tržní podmínky nutí výrobce stále více šetřit, a protože existuje spousta zákazníků, kteří si nikdy neposlechli prakticky nic ve vysoké kvalitě a stále méně lidí chodí na koncerty, kde by poznali, jak znějí akustické hudební nástroje a světem vládne vysoce komprimované mp3, klesá poptávka po kvalitních řešeních a výrobci snižují náklady na výrobu šetřením na materiálu a stále více se svým řešením odklánějí od řešení ideálního reproduktoru, který jsme si popsali na začátku čl. 3.

Problém samozřejmě není jen v samotných reproduktorech, ale i v provedení ozvučnice, použití kabeláže a provedení frekvenční výhybky. O tom všem zase někdy jindy. Děkuji za pozornost a jste kdykoliv zváni na poslech do naší poslechové místnosti v Břeclavi. Je dobré slyšet, co mohu od domácího poslechu očekávat.