

Radio- elektronická příručka

II



Poznámka:

Při studiu necht' si laskavý čtenář uvědomí stáří této publikace. Vývoj se nezastavil a v řadě případů bude dnešní názor poněkud odlišný. Např. nebudeme asi v moderním telefonu hledat uhlíkový mikrofon. . . Pro vysvětlení principů však možno považovat za dostatečné.



PRAHA
1972
PRÁCE

17. ELEKTROAKUSTICKÉ MĚNIČE

Ctirad Smetana

Obsah :

17.1. Fyzikální principy měničů	266
17.2. Mikrofony a snímání zvuku.	276
17.3. Reprodukce zvuku	295
17.4. Sluchátka	312
17.5. Speciální elektromechanické měniče	313

tj. zda měnič odevzdává na mechanické straně konstantní sílu při buzení elektrické strany konstantním napětím nebo proudem. Z tohoto hlediska můžeme měniče rozdělit do dvou typických skupin podle toho, jak se chovají jako přijímače:

měníče první skupiny odevzdávají konstantní výstupní napětí při buzení konstantní rychlostí na mechanické straně (princip elektrodynamický, elektromagnetický a magnetostrikční),

měníče druhé skupiny odevzdávají konstantní výstupní napětí při buzení jeho mechanické soustavy konstantní výchylkou (měnič piezoelektrický či elektrostatický).

Přehledně shrnutí těchto vztahů podrobněji popsaných dále je v *tab. 17-1*. Všimněme si, že ve všech případech je konstanta úměrnosti stejná pro při-

Tab. 17-1 Základní vztahy u elektromechanických měničů

	Měnič	Pracující jako	
		přijímač (u, i) = $k \cdot v$	vysílač $F = k(i, u)$
měniče první skupiny	elektrodynamický	$u = B \cdot l \cdot v$	$F = B \cdot l \cdot i$
	elektromagnetický	$u = \frac{n \cdot \Phi_0}{d} \cdot v$	$F = \frac{n \cdot \Phi_0}{d} \cdot i$
	magnetostrikční	$u = \frac{n \cdot k_{ms}}{R_m} \cdot v$	$F = \frac{n \cdot k_{ms}}{R_m} \cdot i$
měniče druhé skupiny	piezoelektrický	$i = \frac{\partial p}{c} \cdot \frac{S_p}{S_s} \cdot v$	$F = \frac{\partial p}{c} \cdot \frac{S_p}{S_s} \cdot u$
	elektrostatický	$i = \frac{U_0 \cdot C}{d} \cdot v$	$F = \frac{U_0 \cdot C}{d} \cdot u$
	odporový mikrofón	$u = \frac{R_s \cdot \Delta R}{R_0^2} U_0$	

jímač i vysílač. Pouze u odporového mikrofónu, který není recipročním měničem, platí jediný vztah.

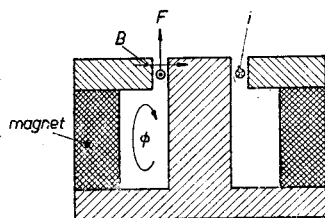
V dalším jsou uvedeny jednotlivé typy měničů v pořadí podle jejich dnešního uplatnění a rozšíření.

17.1-1 Měnič elektrodynamický

Měnič elektrodynamický využívá vzájemného působení sil mezi magnetickým polem vznikajícím kolem vodiče protékajícího signálovým proudem

a mezi konstantním magnetickým polem, např. polem trvalého magnetu (funkce vysílače). Naopak pohybujeme-li vodičem v konstantním magnetickém poli, vybudí se v tomto vodiči elektrické napětí úměrné rychlosti pohybu vodiče (funkce přijímače).

Jeho principiální konstrukce, používaná jak u měniče pracujícího jako vysílač (nejrozšířenější konstrukce reproduktorů), tak i u přijímačů (tzv. cívkové mikrofony), je na obr. 17-1. V mezeře přerušující magnetický obvod je uložen vodič protékající signálovým proudem i . Vznikající síla F [N], která působí na vodič, je tím větší, čím silnější je konstantní magnetické pole (B -magnetická indukce [T]), čím delší je aktivní část vodiče ležícího v magnetickém poli ($l = l' \cdot \sin \psi$ [m]; ψ je úhel mezi tečnou vodiče a směrem magnetických siločar) a čím větší proud protéká vodičem (i [A]).



Obr. 17-1. Elektrodynamic-
ký měnič

$$F = Bli \quad [\text{N}; \text{T}, \text{m}, \text{A}]. \quad (17-1)$$

Směr působící síly je určen pravidlem levé ruky (vznik síly — motor; palec = pohyb; ukazováček = pole; prostředníček = proud).

Ve funkci přijímače, tj. mikrofonu, je vybudené elektrické napětí u [V] dáno při pohybu vodiče aktivní délky l [m], rychlosti pohybu vodiče v [ms^{-1}] v magnetickém poli o indukci B [T] vztahem

$$u = Blv \quad [\text{V}; \text{T}, \text{m}, \text{ms}^{-1}]. \quad (17-2)$$

Polarita vybudeného napětí je určena pravidlem pravé ruky (vznik napětí — dynamo).

U elektrodynamických měničů se používá konstrukce s cívkou v rotačně uspořádané mezeře magnetického obvodu, kde cívka je pevně spojena s membránou. Lze ale také použít jediného vodiče, např. pásku tenké fólie (která je současně membránou), uloženého v přímkové štěrbině magnetického obvodu (páskové mikrofony), viz také obr. 17-15.

17.1-2 Odporový mikrofon

V telefonech se používá odporový mikrofon, u kterého nevzniká energie úměrná akustickému signálu přeměnou energie mechanické (z energie působícího akustického pole), ale je dodávána z vnějšího zdroje. Elektrický signál vzniká ovlivňováním velikosti odporu, který klade uhlavý prach v komůrce mikrofonu a který leží v cestě proudu protékajícího měničem (obr. 17-2). Odpor komůrky se mění podle velikosti mechanického namáhání membrány mikrofonu akustickým signálem. Čím více jsou prachová zrníčka stlačena, tím menší je odpor komůrky. Proud i protékající mikrofonem je

určen napájecím napětím baterie U_0 a klidovým odporem prachové komůrky R_{00} v sérii se zatěžovacím odporem R_z

$$i = \frac{U_0}{R_0} \quad ; \quad R_0 = R_{00} + R_z. \quad (17-3)$$

Změna odporu prachové komůrky je ΔR , a pokud je odpor komůrky nepřímo úměrný stlačení, platí

$$i = \frac{U_0}{R_0 + \Delta R \sin \omega t}. \quad (17-4)$$

Úpravou podle binomické poučky a rozvedením goniometrických funkcí vyšších mocnin bude napětí u odevzdávané na zatěžovacím odporu signálovou složkou proudu i dáno vztahem

$$u = i_{st} \cdot R_z = - \frac{R_z U_0}{R_0} \left[\frac{\Delta R}{R_0} \sin \omega t + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2 \cos 2\omega t \right]. \quad (17-5)$$

Vyšší členy je možno zanedbat, neboť $\Delta R \ll R_0$.

První člen určuje napětí signálové

$$u = \frac{R_z R}{R_0^2} \cdot U_0 \cdot \sin \omega t. \quad (17-6)$$

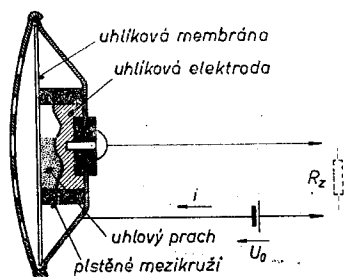
Z druhého členu můžeme určit zkreslení druhou harmonickou

$$\eta = \frac{\Delta R}{2R_0} \cdot 100 \%. \quad (17-7)$$

Zkreslení je nutným průvodním zjevem u odporového mikrofonu a ve skutečnosti je větší než podle vztahu (17-7), poněvadž změna odporu ΔR není lineárně závislá na výchylce membrány. U telefonní mikrofonní vložky může vznikat zkreslení až 25 %.

Běžné uhlíkové mikrofony pro telefony UB mají napájecí napětí 60 V. Jejich odpor leží obvykle v rozsahu 70 až 150 Ω , normální napájecí proud je asi 40 mA. Mikrofonní vložky pro MB stanice mají odpor 30 až 100 Ω a opět lze počítat s proudem asi 40 mA. Jejich citlivost bývá kolem 100 mV/Nm⁻² a přenáší pásmo kmitočtů 200 až 4000 Hz v mezích ± 15 dB. Citlivost a láce je jediným důvodem, proč se v telefonní technice stále ještě uplatňují.

Podobný odporový měnič, využívající ale proměnné vodivosti polovodi-



Obr. 17-2. Odporový mikrofon

čového krystalu, např. germania, se řídí prakticky stejnými rovnicemi jako klasický odporový mikrofon. Polovodičový materiál je namáhán např. určitým tlakem a změny tohoto tlaku vyvolávají změny odporu. Podle použitého typu polovodičového materiálu p nebo n lze dosáhnout se vzrůstem tlaku buď zvětšování, či zmenšování odporu. Změny odporu jsou úměrné výchylce, a tedy odpor celého elementu je

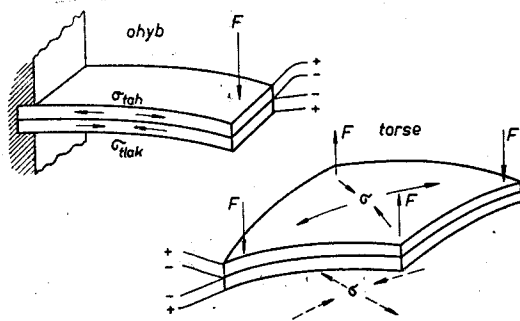
$$R = R_0 + \Delta R = R_0 + k \cdot y, \quad (17-8)$$

kde k je konstanta úměrnosti a y výchylka (jako míra mechanického namáhání).

Tento typ snímače se nazývá piezorezistivní a jev není reciprokový; energie snímaného signálu je odvozena ze změn odporu v obvodu při vnějším napájení. Proto zde také platí vztahy (17-4) až (17-7). Proti odporovému mikrofonu, u něhož je základní šum dán šumem na jednotlivých přechodech mezi zrnky uhlového prachu, je zde šum podstatně menší. Proto stačí daleko menší změny odporu pro vyvolání snímatelného a dále zpracovatelného signálu, a tím je i vznikající zkreslení podle vztahu (17-7) daleko menší. Dosahované hodnoty zkreslení lze udržet pod 1 %.

17.1-3 Měníč piezoelektrický

U nejmasověji vyráběných laciných mikrofonů a gramofonových snímačích vložek se používá měničů piezoelektrických. U piezoelektrického jevu vzniká při mechanickém stlačování určitých krystalů (buď na plochách, které jsou stlačovány — longitudinální jev —, např. křemen, nebo na dvojici protilehlých stěn, tj. kolmo na stěny stlačované — jev transverzální — např. Seignettova sůl, BaTiO_3) elektrický náboj úměrný mechanickému namáhání krystalu. Odevzdávaný náboj je úměrný mechanickému namáhání



Obr. 17-3. Ohybové a torzní namáhání a odevzdávané napětí u výbrusu ze Seignettovy soli

a piezoelektrickému modulu, který je největší u Seignettovy soli. Piezoelektrické krystaly jsou anizotropní, a proto záleží na správné volbě orientace výbrusu z krystalu.

Náboj na plochách se sbírá polepy u výbrusů slepených většinou do dvojčat, neboť namáhání samostatných výbrusů dává pro praxi nepoužitelně malá napětí. Stmelením se mechanické namáhání zmnoho-

násobí. Používané typy namáhání jsou pro výbrusy ze Seignettovy soli na obr. 17-3.

U piezokeramiky — např. baryumtitanátu (BaTiO_3) nebo tzv. baryum plumbit zirkonátu (bývá značen PTZ), jde o polykrystalický materiál, u kterého je piezoelektrický jev vyvolán dodatečně, tj. po zhotovení výbrusů, polarizací v silném elektrickém poli (za určité teploty výbrusů se přiloží na jejich polepy vnější napětí volitelné polarizace). Sestavená dvojčata jsou proto výhradně ohybová a při torzním namáhání neodevzdávají náboj. Piezokeramická dvojčata odevzdávají při sinusovém mechanickém namáhání kromě napětí základního kmitočtu i složky druhých harmonických, jejichž amplituda je úměrná velikosti polarizačního napětí a mechanického namáhání. Polarizace piezokeramiky časem ustupuje, klesá dosažený piezomodul, a tím i citlivost. Ani harmonické zkreslení (bývá za běžných podmínek do 2 %), ani pokles citlivosti (za první rok 1 až 3 dB, asi po třech až pěti letech se pokles prakticky zastaví) nejsou závažnou překážkou použití těchto měničů.

Piezokeramika (BaTiO_3 a PTZ) dosahuje stále většího rozšíření, poněvadž může pracovat až do teplot cca 120 °C, proti Seignettově soli, jejíž krystaly se rozloží ve vlastní krystalické vodě při teplotě 52 °C. Krystaly Seignettovy soli se zničí také v extrémních vlhkostních podmínkách. Při relativních vlhkostech asi nad 85 % relativní vlhkosti se krystal rozpustí (povrchová impregnace dovolí krátkodobé působení relativní vlhkosti až 95 %) nebo při relativních vlhkostech cca pod 30 % krystal dehydruje a rozpadá se v prášek.

V elektroakustice používáme prakticky pouze piezoelektrických materiálů využívajících transversálního jevu. Napětí u odevzdávané na polepech výbrusů je dáno vztahem

$$u = \frac{\vartheta_p}{cC_0} \cdot \frac{S_p}{S_s} \cdot y = \frac{\vartheta_p}{C_0} \cdot \frac{S_p}{S_s} \cdot F, \quad (17-8)$$

kde ϑ_p je tzv. piezoelektrický součinitel [$C/N = 3 \cdot 10^4 \text{ cm}^1/2\text{g}^1/2\text{s}$],

c — mechanická poddajnost výbrusů [m/N],

C_0 — kapacita výbrusů [F],

S_p — plocha polepů pro odvádění náboje [m^2],

S_s — plocha, ve které působí síla F (tlakem $p = F/S_s$), [m^2 ; N ; N/m^2],

y — výchylka [m].

Napětím přiloženým na výbrus lze způsobit jeho deformaci, měnič působí jako vysílač; pro tento reciproký jev platí vztah

$$y = \vartheta_p \cdot \frac{S_p}{S_s} \cdot u. \quad (17-9)$$

Piezelektrický součinitel ϑ_p je vázán s piezelektrickým modulem ε_p (bývá také značen e_{xx} [$C/m^2 = 3 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1/2} \text{ g}^{1/2} \text{ s}^{-1}$]) vztahem

$$\vartheta_p = \frac{\varepsilon_p}{E}, \quad (17-10)$$

kde E je modul pružnosti materiálu. Konstanty anizotropních materiálů bývají značeny různými způsoby a bývají zaměňovány i moduly a součinitele. Pro správné použití je nutno porovnat fyzikální rozměry.

Tab. 17-2 Vlastnosti nejpoužívanějších piezelektrických materiálů

	Seignettova sůl KNT*)	Baryumtitanát BaTiO ₃	Baryumzirkonát PTZ
ϑ_p [C/N]	$3,8 \cdot 10^{-10}$ (d_{14})	$1 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-10}$
E [N/m ²]	$1,2 \cdot 10^{10}$ (c_{44})	$1 \cdot 10^{11}$	—
ρ [kp/m ³]	$1,8 \cdot 10^3$	$5,7 \cdot 10^3$	$7,6 \cdot 10^3$
ε_r **)	14 °C—200 20 °C—500 max 24 °C až 3500 (ε_{r11})	500 až 2000	300 až 3000
Curieova teplota °C	28° C	120 až 150° C	150 až 380 °C

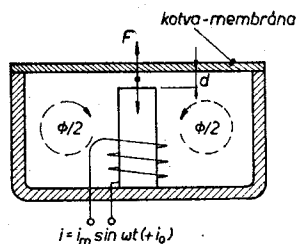
*) vřinan sodnodraselný, sůl sv. Rocha
**) $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r = \varepsilon_r \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}$ [F/m]; (relativní permitivita)

Pro přehled dosažitelných vlastností jsou v tab. 17-2 shrnuty nejdůležitější konstanty nejrozšířenějších piezelektrických materiálů.

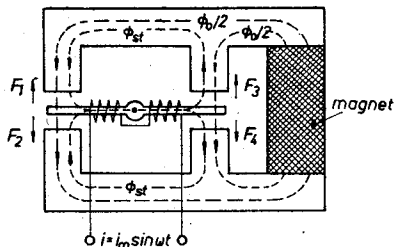
17.1-4 Měníč elektromagnetický

U elektromagnetických měničů rozeznáváme v podstatě dvě konstrukce: asymetrické uspořádání, kde pohyblivá kotva uzavírá jedinou mezeru v magnetickém obvodu (tzv. dvoupólové uspořádání, obr. 17-4), nebo uspořádání symetrické, kde se využívá rozdílových magnetických toků, tzv.

čtyřpólové uspořádání, naznačené na obr. 17-5. Proti dvoupólové konstrukci naznačené v obr. 17-4 může být kotva také uchycena jednostranně jako vetknutý nosník a v klidové poloze držena např. pružností materiálu kotvy. Síla vyvolávající pohyb kotvy vzniká tím, že stálý magnetický tok se zvětšuje či zmenšuje o magnetický tok vznikající průtokem signálového proudu budicí cívkou, a mění tak přitažlivé síly působící na pohyblivou část — kotvu — ve vzduchové mezeře. Stálý magnetický tok je vyvolán buď trvalým magnetem (umístěným v magnetickém obvodu měniče), nebo průtokem stejnosměrného proudu budicí cívkou. Elektromagnetický měnič se používá



Obr. 17-4. Dvoupólový elektromagnetický měnič



Obr. 17-5. Čtyřpólové uspořádání elektromagnetického měniče

hlavně v telefonních sluchátkách a v rycích hlavách pro gramofonový záznam. Dříve se používal i u reproduktorů.

Síla působící na kotvu dvoupólového systému (obr. 17-4) je

$$F = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S} \quad [\text{N}; \text{Wb}, \text{m}^2], \quad (17-11)$$

kde μ_0 — $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H m⁻¹] je permeabilita vzduchu,

S — plocha průřezu vzduchové mezery [m²],

Φ — magnetický tok daný součtem stálého magnetického toku Φ_s a proměnným tokem Φ_{st} ,

$$\Phi_{st} = \frac{i n}{R_m}, \quad (17-12)$$

vybuzeným průtokem signálového proudu $i = i_m \sin \omega t$ [A], při počtu závitů budicí cívky n a je-li v magnetickém obvodu vzduchová mezera o magnetickém odporu (magnetický odpor železa v obvodu zanedbáváme) R_m ,

$$R_m = \frac{d}{\mu_0 S}. \quad (17-13)$$

Za předpokladu malých výchylek kotvy proti rozměru vzduchové mezery d dojdeme úpravou ke vztahu

$$F = \frac{1}{2\mu_0 S} \cdot \left[\Phi_0^2 + \frac{(i_m n)^2}{2R_m^2} + 2\Phi_0 \frac{i_m n}{R_m} \sin \omega t - \frac{(i_m n)^2}{2R_m^2} \cos 2\omega t \right]. \quad (17-14)$$

Člen se $\sin \omega t$ určuje přeměnu elektrického signálu v proměnnou sílu působící na pohyb kotvy. Člen $\cos 2\omega t$ definuje zkreslení vznikající v měničích. Poněvadž jsou dva první členy konstantní, můžeme vztah pro vybuzenou sílu přepsat v závislosti na protékajícím signálovém proudu

$$F' = \frac{n\Phi_0}{d} \cdot i = \frac{nB_0 S}{d} \cdot i_m \cdot \sin \omega t, \quad (17-15)$$

kde B je indukce v mezeře [T].

Zkreslení vznikající druhou harmonickou je při stejném značení

$$\sigma = \frac{\mu_0 n i_m}{4dB_0} \cdot 100 \%. \quad (17-16)$$

Pro funkci přijímače je napětí vybuzené v cívice pohybem kotvy určeno z indukčního zákona

$$u = \frac{\Phi_0}{d} \cdot n \cdot v = \frac{B_0 S}{d} \cdot n \cdot v, \quad (17-17)$$

kde v je rychlost kotvy [m/s].

Symetrické — čtyřpólové — uspořádání má tu přednost, že u rozdílově působících sil F_1 až F_4 se zkreslující složky vyruší a výsledný vztah je lineární jak pro funkci vysílače

$$F = \frac{n\Phi_0}{d} \cdot i_m \cdot \sin \omega t, \quad (17-18)$$

tak i při reciprokém jevu ve funkci přijímače

$$u = \frac{n\Phi_0}{d} \cdot v. \quad (17-19)$$

U čtyřpólového systému nemůže být potřebné stejnosměrné magnetické pole buzeno stejnosměrnou složkou v buďící cívice a musí mít trvalý magnetický tok buzen v jiné, pro obě větve symetricky položené části magnetického obvodu.

17.1-5 Měníč elektrostatický

Nejkvalitnější mikrofony jsou tzv. mikrofony kondenzátorové, vycházející z principu měniče elektrostatického. V poslední době se objevují i elektrostatické reproduktory pracující většinou jako doplňkové pro reprodukci vysokých tónů.

Mezi membránou a protielektrodou (obr. 17-6) musí být stejnosměrné napětí U_0 , tzv. polarizační napětí. Tzv. klidová kapacita C mezi membránou a protielektrodou váže náboj, jehož hodnota se nebude měnit (nestačí odtéci), pokud odpor R v sérii s polarizační baterií

$$R \gg \frac{1}{\omega C} \quad (17-20)$$

Změna klidové kapacity vyvolaná pohybem membrány ΔC bude úměrná její výchylce a v poměru ke vzdálenosti membrána — protielektroda platí

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{y}{d}, \quad (17-21)$$

pokud jsou výchylky mnohem menší

než d . Ve stejném poměru se mění i signálové napětí u vznikající na zatěžovací odpor R ; docházíme tím k základnímu vztahu elektrostatického měniče

$$\frac{u}{U_0} = \frac{\Delta C}{C} = \frac{y}{d} \quad (17-22)$$

Není-li splněna podmínka, že výchylky y jsou daleko menší než vzdálenost membrána — protielektroda d , a pokud by neplatil vztah (17-20), pak vznikají zkreslující složky, které mohou být potlačeny (vyruší se) v symetrickém uspořádání (obr. 17-6b).

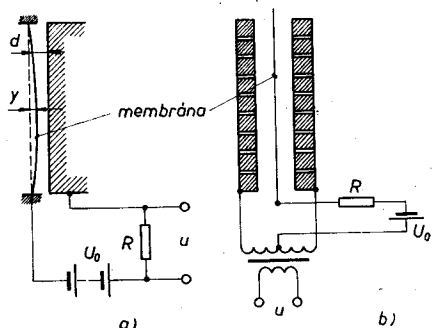
V reciproké funkci bude síla působící na membránu

$$F = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot S \cdot \left(\frac{U}{d} \right)^2, \quad (17-23)$$

kde $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ [F/m] je permitivita vakua a napětí $U = U_0 + u$.

Podobně jako tomu je u měniče ve funkci přijímače, je i u funkce vysílače člen úměrný přiváděnému signálovému napětí u ve vztahu pro působící sílu dán lineární závislostí, pokud $u \ll U_0$.

$$F = \frac{U_0}{d} \cdot C \cdot u \quad (17-24)$$



Obr. 17-6. Elektrostatický měnič (a) a jeho symetrická uspořádání (b)

17.1-6 Měníč magnetostrikční

Tento typ měniče se používá pouze v oboru ultrazvuku a využívá deformačních sil ve feromagnetických látkách protékaných magnetickým tokem. Změnou magnetického toku se mění rozměr materiálu ve směru magnetických siločar. Ve vztazích udaných v *tab. 17-1* je k_{ms} magnetostrikční materiálová konstanta, R_m magnetický odpor obvodu a n počet závitů cívky.

17.2 MIKROFONY A SNÍMÁNÍ ZVUKU

Pro snímání akustických signálů jsou dnes nejrozšířenější mikrofony: cívkový nebo páskový mikrofón (elektrodynamický), piezoelektrický membránový nebo bezmembránový (nesprávně krystalový),

kondenzátorový mikrofón (elektrostatický),

mikrofón odporový (viz *část 17.1-2*).

Přihlédneme-li k akustické veličině, na kterou mikrofón reaguje, můžeme rozlišovat

a) mikrofony tlakové, odevzdávající výstupní napětí úměrné akustickému tlaku (tj. mikrofony gradientní nultého řádu),

b) mikrofony rychlostní, odevzdávající výstupní napětí úměrné akustické rychlosti (nebo gradientu akustického tlaku — gradientní prvního řádu). Zde je nutno upozornit na rozdíl mezi rychlostním mikrofónem a rychlostním elektromechanickým měničem v konfrontaci s úvodem kap. 17.1,

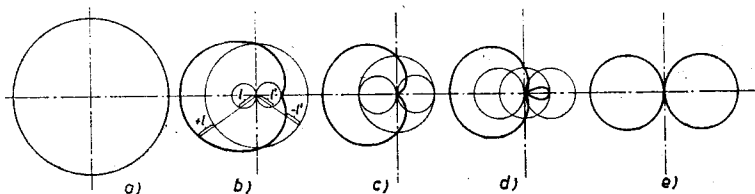
c) gradientní mikrofony vyšších řádů, odevzdávající výstupní napětí úměrné vyšším derivacím akustického tlaku,

d) kombinované mikrofony, kde výsledné výstupní napětí je dáno kombinací napětí odevzdávaného dvěma nebo více mikrofony, nebo kde u jednoho měničového obvodu je (většinou akustickými obvody) vyvozeno kombinované působení veličin akustického pole, tj. akustického tlaku a akustické rychlosti.

17.2-1 Základní vlastnosti mikrofonů

Toto rozdělení mikrofonů je v těsné vazbě na směrové charakteristiky mikrofonů. Tak mikrofony tlakové mají typickou směrovou charakteristiku všesměrovou, kulovou (*obr. 17-7a*), mikrofony rychlostní mají charakteristiku osmičkovou (*obr. 17-7e*). Větším či menším podílem složky rychlostní ve vztahu k složce tlakové dosáhneme kombinovaných typů směrových charakteristik (*obr. 17-7b, d*) s jejich nejtypičtějším představitelem — směrovou charakteristikou kardioidní (*obr. 17-7c*).

Pro číselné vyjádření směrové charakteristiky se používá pojmu činitele směrovosti nebo indexu směrovosti. Čítel směrovosti Q je definován jako poměr čtverce výstupního napětí mikrofonu U_0 — dopadá-li na něj při určitém akustickém tlaku zvuková vlna ve směru jeho akustické osy (směru maximální citlivosti) — ke čtverci výstupního napětí U_d při stejném akustickém tlaku — je-li mikrofon umístěn v dokonale difúzním akustickém



Obr. 17-7. Základní typy směrových charakteristik mikrofonů

a - tlakový mikrofon, e - rychlostní mikrofon, c - kardioidní mikrofon, stejný podíl rychlostní a tlakové složky, b, d - přechodné typy

poli. Známe-li citlivost mikrofonu η_φ pro jednotlivé úhly dopadu φ , platí při symetrické směrové charakteristice pro čítel směrovosti vztah

$$Q = \frac{U_0^2}{U_d^2} = \frac{2}{\int_0^\pi \eta_\varphi^2 \cdot \sin \varphi \, d\varphi} \quad (17-25)$$

Z činitele směrovosti je index směrovosti I_Q definován v logaritmické míře v dB vztahem

$$I_Q = 10 \cdot \log Q = 20 \cdot \log D \quad [\text{dB}], \quad (17-26)$$

kde $D = \sqrt{Q}$ nazýváme činitelem vzdálenosti, neboť udává poměr vzdáleností mikrofonu od zdroje, při němž je stejný poměr přímého a rušivého signálu (dokonale difúzního) jak u mikrofonu sledovaného, tak i u mikrofonu ideálního s kulovou směrovou charakteristikou.

Tab. 17-3 Číselné vyjádření směrových vlastností mikrofonů

Směrová charakteristika	Čítel směrovosti Q	Čítel vzdálenosti D	Index směrovosti I_Q [dB]
kulová	1	1	0
kardioidní	3	1,7	4,7
osmičková	3	1,7	4,7
grad. II. řádu	5	2,24	7,0
spec. směrové mikrofon. až	10	3,2	10

Pro porovnání jsou tyto tři veličiny popisující směrové vlastnosti mikrofonů uvedeny pro různé směrové charakteristiky v *tab. 17-3*.

Vlastnosti mikrofonů jsou definovány pro určitou zatěžovací impedanci; nesprávné zatížení ovlivní citlivost mikrofonu i jeho kmitočtovou charakteristiku.

Citlivostí mikrofonu rozumíme poměr výstupního napětí mikrofonu k akustickému tlaku ve volném akustickém poli. Citlivost udáváme v napětí [mV], které mikrofon odevzdává při správné zatěžovací impedanci a při působícím akustickém signálu 1 kHz s tlakem 1 N/m². Ve starých jednotkách akustického tlaku — μb (mikrobar) je citlivost udaná v mV/ μb desetkrát menší než v mV/Nm⁻² (10 mV/Nm⁻² = 1 mV/ μb). Někdy se udává (hlavně v angloamerické literatuře) citlivost v dB, které jsou vztaženy buď k 775 mV

Tab. 17-4 Převod v údajích citlivosti mikrofonů

Citlivost [mV/Nm ⁻²]	Citlivost [mV/ μbar]	dBm*)	dBV*)
1	0,1	-77,8	-80,0
2	0,2	-71,8	-74,0
3	0,3	-68,2	-70,4
4	0,4	-65,8	-68,0
5	0,5	-63,8	-66,0
6	0,6	-62,2	-64,4
8	0,8	-59,8	-62,0
10	1,0	-57,8	-60,0
12	1,2	-56,2	-58,4
14	1,4	-54,9	-57,1
16	1,6	-53,7	-55,9
18	1,8	-52,7	-54,9
20	2,0	-51,8	-54,0
22	2,2	-51,0	-53,2
24	2,4	-50,2	-52,4
26	2,6	-49,5	-51,7
28	2,8	-48,8	-51,0
30	3,0	-48,2	-50,4
35	3,5	-46,9	-49,1
40	4,0	-45,8	-48,0
45	4,5	-44,8	-47,0
50	5,0	-43,8	-46,0
60	6,0	-42,2	-44,4
70	7,0	-40,9	-43,1
80	8,0	-39,8	-42,0
100	10,0	-37,8	-40,0
120	12,0	-36,2	-38,4
150	15,0	-34,3	-36,5
200	20,0	-31,8	-34,0

*) pro akust. tlak 1 μbar

(= 1 mW na 600 Ω), nebo k 1 V. Údaj není jednoznačný a je nutno znát, k čemu jsou dB vztaženy. Pro vztažnou úroveň 0,775 V se používá někdy též značení dBm; při vztažné úrovni 1 V (zde není definováno na jaké impedanci) bývá značení dBV. V USA skoro vždy je vztažná úroveň 1 V (tab. 17-4).

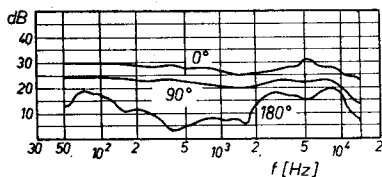
Pro určitá použití mikrofonů je nutné znát také výstupní impedance mikrofonů, šumové výstupní napětí mikrofonu a jeho citlivost pro rušivá elektrická a magnetická pole. U dnešních mikrofonů již takřka není nutno mluvit o harmonickém zkreslení (s výjimkou u mikrofonu odporového) a pouze pro speciální případy o mezním akustickém tlaku (tj. o maximálním akustickém tlaku, nad kterým může dojít k poruše mikrofonu či k rychlému vzrůstu zkreslení).

Pro snadné vyjádření rušivých signálů odevzdávaných mikrofonem se používá pojmu ekvivalentní hladiny akustického tlaku, tj. takové hladiny akustického tlaku, která by odpovídala napětí odevzdávanému mikrofonem (bez vnějšího buzení akustickým signálem), vyvozenému pouze rušivým signálem, např. vlastním šumem, elektromagnetickým polem apod. Tato hodnota může být udána také např. hladinou zvuku, tj. v hodnocení přes určitý váhový filtr (psofometrické, zvukoměrné filtry — nejčastěji „A“ apod.). Ekvivalentní hladinu udáváme pak v dB vztažených k prahu slyšení, tj. k akustickému tlaku $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ N/m² vztahem

$$L_{eq} = 20 \log \frac{p}{p_0} . \quad (17-27)$$

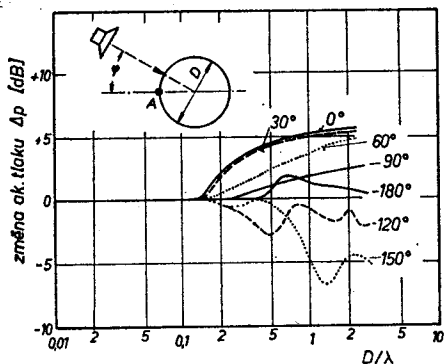
Při kladení maximálních požadavků na kmitočtovou věrnost přenosu signálu musíme věnovat pozornost i rozdílným kmitočtovým charakteristikám mikrofonů pro různé úhly dopadu akustického signálu (obr. 17-8). Již pouhé vložení mikrofonu do akustického pole deformuje toto akustické pole; deformace akustického pole je dána geometrickými rozměry a tvarem vloženého předmětu v závislosti na kmitočtu a úhlu dopadu akustického signálu. Pro typické případy jsou změny akustického tlaku před překážkou (mikrofonem) zakresleny v obr. 17-9 až 17-12; D je rozměr vloženého tělesa a λ je délka vln dopadajícího akustického signálu ($\lambda = c_0/f = 343/f$ [m]). Tyto grafy můžeme použít i při určení deformací akustického pole jakýmkoli předmětem v těsné blízkosti mikrofonu.

Při připojování mikrofonů se velký podíl rušivých napětí naindukuje do mikrofonního přívodu; podíl je tím větší, čím větší je impedance na připojo-

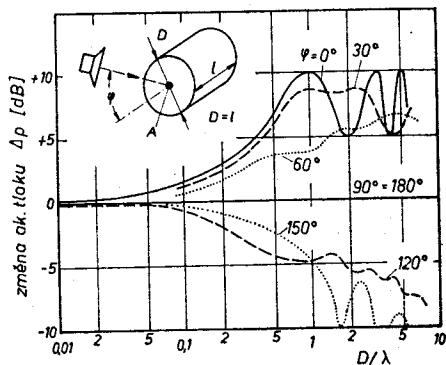


Obr. 17-8. Kmitočtové průběhy páskového mikrofonu AMP 460 Tesla, (kardioida) pro různé úhly dopadu signálu

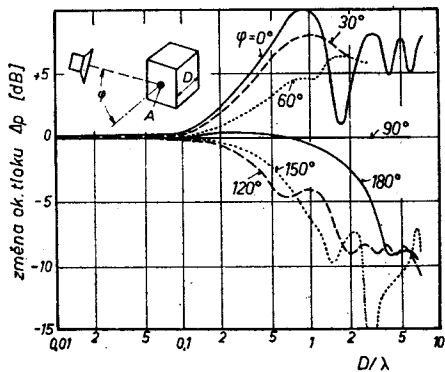
vacím kabelem (paralelní kombinace vnitřní impedance mikrofonu a vstupní impedance zesilovače). Proti elektrostatické indukci, která vznikne nejnadnější, jsou příklady mikrofonů chráněny vždy alespoň stíněním a mohou být buď symetricky, či nesymetricky vůči zemi zapojeny (obr. 17-13). Teprve u zesilovačů zařazujeme např. zvyšovací transformátory, které zvýší napětí odevzdávané mikrofonem, ale současně i impedanci, a proto mezi transfor-



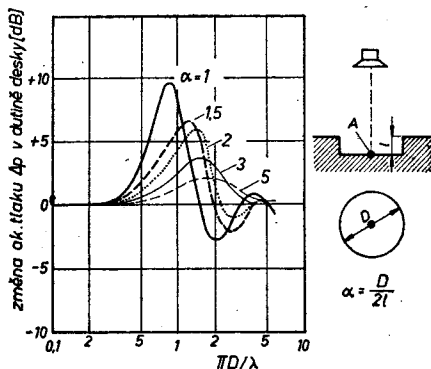
Obr. 17-9. Změny akustického tlaku na povrchu koule v bodě A pro různé úhly dopadu signálu proti akustickému tlaku bez její přítomnosti



Obr. 17-10. Změny akustického tlaku v bodě A na povrchu válce pro různé úhly dopadu signálu proti akustickému tlaku při odstranění tělesa

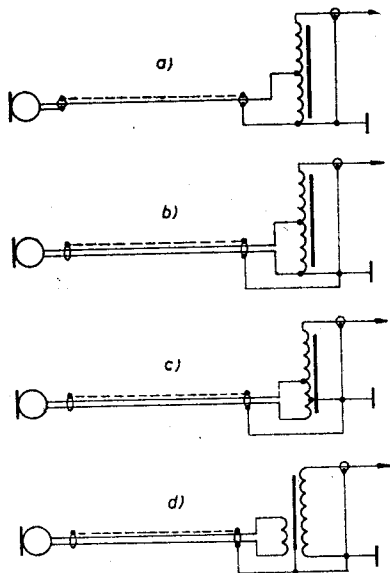


Obr. 17-11. Změny akustického tlaku v bodě A na povrchu krychle pro různé úhly dopadu signálu proti akustickému tlaku při odstranění tělesa



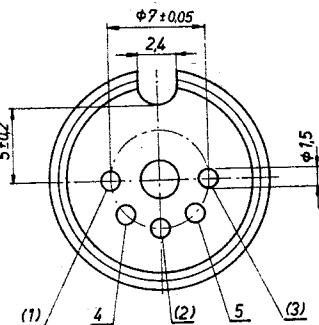
Obr. 17-12. Zvýšení akustického tlaku v kruhové dutině v bodě A proti akustickému tlaku ve volném akustickém poli

mátorem a vstupem zesilovače má být již krátký přívod. U symetrických vedení jsou naindukovaná napětí zhruba stejná v obou žilách přívodního kabelu, a v převodním transformátoru se odečtou. U kratších přívodů nebo u nižších kvalitativních nároků dostačují přívody nesymetrické. Podobné základní úvahy platí i tehdy, kdy není na vstupu zesilovače připojen zvyšovací transformátor. U přívodních kabelů mikrofonů jsou zvláště nebezpečné bludné proudy, a proto vždy dbáme, aby celý obvod byl zemněn v jediném bodě, nejčastěji na vstupu zesilovače. Také stínění má být zemněno pouze v jediném bodě, tzn. nikoli v jednotlivých konektorech.



Obr. 17-13. Mikrofonní vedení

a - jednoduché nesymetrické, b - dvojitě nesymetrické, c - symetrické, d - symetrické nezemněné



Obr. 17-14. Rozložení kolíků u pětipólové a třípólové stíněné vidlice (na vidlici pohled ze strany kolíků, na zásuvku pohled ze strany letování)

Přesné definice vlastností mikrofonů a způsoby jejich zjišťování a měření jsou dány kmenovou normou mikrofonů — ČSN 36 8210, Mikrofony.

Pro připojování moderních mikrofonů používáme nejčastěji tři nebo pětikolíkových konektorů (obr. 17-14). Výrobce je např. Tesla Liberec:

- třípólová stíněná vidlice 6AF 895 00/14,
- třípólová zásuvka 6AF 282 02/04,
- pětípólová stíněná vidlice 6AF 895 20/34,
- pětípólová zásuvka 6AF 282 10/12.

I když není přiřazení určitých kolíků konektorů pevně stanoveno, používá se nejčastěji tohoto přiřazení:

kolík 2, zemnicí nebo stínicí vodič;

kolík 1, mikrofonní živý vodič, především nízkoimpedanční (elektrodynamický);

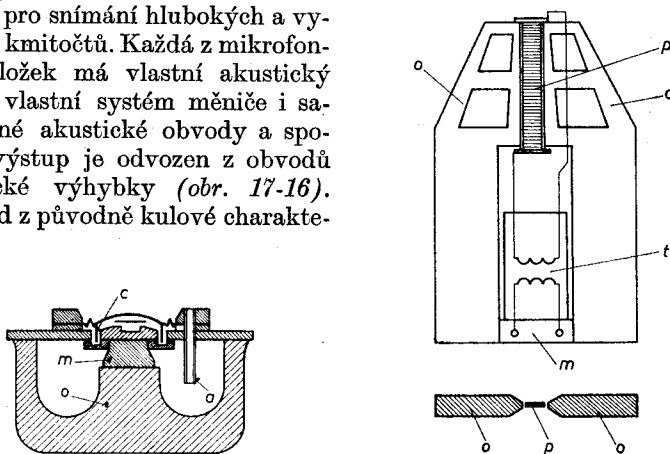
kolík 3, někdy používaný, pro odlišení vysokoimpedančních (piezoelektrických) živých vodičů mikrofonů.

U kvalitních profesionálních mikrofonů je kolík 2 určen pro stínění, kolíky 1 a 3 pro vývody mikrofonů pro symetrické zapojení vedení (viz obr. 17-13). Pro stereofonní mikrofony bývají preferovány kolíky 1,4 pro levý kanál, kolíky 3,5 pro pravý kanál.

17.2-2 Elektrodynamické mikrofony cívkové a páskové

Typická konstrukce cívkového mikrofonu je na obr. 17-15 a odpovídá popisu k obr. 17-1 v kap. 17-1.1. Místo definování typických vlastností uvedeme několik moderních, sériově vyráběných mikrofonů od kvality běžné až po profesionální, tak jak jsou v tab. 17-5.

Směrové charakteristiky mohou být jak kulové (cívkové mikrofony s jediným akustickým vstupem k přední straně membrány nebo páskové mikrofony se speciálním labyrintem na zadní straně pásku), tak i osmičkové (páskové mikrofony bez ak. obvodů), nebo i kardioidní (při vhodné úpravě akustických obvodů jak u cívkových, tak i u páskových mikrofonů). Nověji se setkáváme i s dvojsystémovými mikrofony pro dosažení lepší frekvenční a směrové charakteristiky. Dvojsystémové mikrofony obsahují dvě samostatné mikrofonní vložky pro snímání hlubokých a vysokých kmitočtů. Každá z mikrofonních vložek má vlastní akustický vstup, vlastní systém měniče i samostatné akustické obvody a společný výstup je odvozen z obvodů elektrické výhybky (obr. 17-16). Přechod z původně kulové charakte-



Obr. 17-15. Typické konstrukce elektrodynamických mikrofonů, vlevo cívkového a vpravo páskového

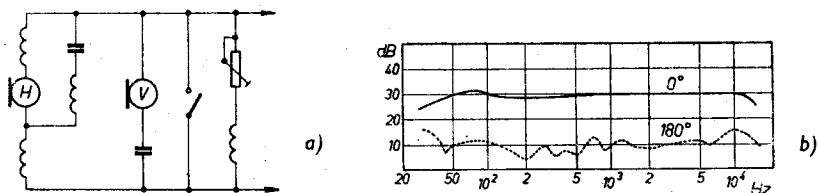
m - magnet, *o* - magnetický obvod, *c* - cívka, *p* - pásek, *a* - akustický obvod, *t* - převodní transformátor

Tab. 17-5 Vlastnosti sériově vyráběných elektrodynamických mikrofonů

Typ	AMD 108		AMD 210		AMD 360		MD 421		D 202		D 1000		AMP 260		AMP 460		
	cívkový	komerční	cívkový	poloprof.	cívkový	studio	cívkový	poloprof.	cívkový	studio	cívkový	studio	cívkový	poloprof.	páskový	páskový	
měníč																	
použití																	
kmit. roz. od—do Hz	100 až 12 000	± 6	50 až 15 000	50 až 20 000	50 až 18 000	50 až 20 000	32 až 16 000 (obr. 17-16)	50 až 18 000	40 až 16 000	40 až 16 000	40 až 16 000	50 až 15 000 (obr. 17-8)	50 až 10 000	50 až 10 000	50 až 15 000 (obr. 17-8)	50 až 15 000 (obr. 17-8)	
nerov. dB	± 6	± 6	± 6	± 2,5	± 5	± 2,5	± 2,5	± 5	± 2,5	± 2,5	± 3,5	± 3	± 3	± 3	± 3/± 6	± 3/± 6	
směr. char.	kulová kard. u AMD 202	kardioid.	kardioid.	kulová	kardioid.	kulová	kardioid.	kardioid.	kardioid.	kardioid.	kardioid.	osmička	osmička	osmička	osmička	osmička	
citlivost mV/Nm ⁻²	1,5	2,5	2,5	1,5	2,0	1,5	1,8	2,0	1,8	2,4	2,4	1,5	1,5	1,5	1,0/1,5	1,0/1,5	
výst. imp. Ω	200	2000	2000	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	
R _z > kΩ	—	—	—	1	1	1	0,5	1	0,5	0,7	0,7	1	1	1	1	1	
ekv. hlad. šumu	—	—	—	18 dB(C)	—	18 dB(C)	17 dB (A)	—	17 dB (A)	15 dB(A)	15 dB(A)	18 dB (C)	18 dB (C)	18 dB (C)	20 dB(C)	20 dB(C)	
výrobee	Tesla Val. Mez.	Tesla Val. Mez.	Tesla Val. Mez.	VÚST-VUELA	Senn-heiser (NSR)	VÚST-VUELA	AKG Wien	Senn-heiser (NSR)	AKG Wien	AKG Wien	AKG Wien	VÚST-VUELA	VÚST-VUELA	VÚST-VUELA	VÚST-VUELA	VÚST-VUELA	
pozn.		přepínač hubok. kmitočtů	přepínač hubok. kmitočtů		přepínač hlubok. kmitočtů		dvou-systém. obr. 17—16										přepín. směr. charak.

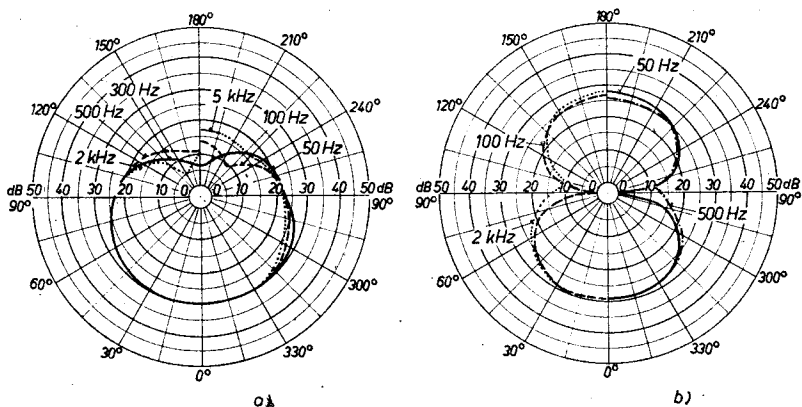
ristiky (či jiné směrové charakteristiky) může být také volitelný tím, že se buď u dvousystémového mikrofonu změní poměr podílu napětí z jednotlivých vložek, nebo mohou být např. mechanicky uzavřeny či otevřeny akustické obvody, které úpravě směrových charakteristik napomáhají (obr. 17-18).

Výstupní impedance cívkového dynamického mikrofonu mikrofonní vložky samé (bez převodního transformátoru) se pohybuje obvykle mezi 10 až 200 Ω a citlivost bývá řádově v desítkách $\mu\text{V}/\text{Nm}^{-2}$. Před dalším zpracováním je proto výstupní napětí vždy zvýšeno převodním transformátorem, který je dnes již většinou umístěn přímo v tělese mikrofonu; zvyšuje výstupní napětí na řádově mV/Nm^{-2} při impedancích řádu $\text{k}\Omega$. Takto umístěné převodní transformátory ale ztěžují řešení dlouhých přívodů s ohledem na vyšší impedance. U kvalitních mikrofonů bývá také řešení



Obr. 17-16. Dvousystémový kardioidní mikrofon D 202

a - vnitřní zapojení mikrofonu s elektrickými výhybkami a zkratovacím tlačítkem, b - kmitočtová charakteristika mikrofonu pro různé úhly dopadu signálu



Obr. 17-17. Směrové charakteristiky páskového mikrofonu Tesla AMP 460 v postavení

a - kulovém, b - osmičkovém

takové, že v tělese mikrofonu je první převodní transformátor a na vstupu zesilovače ještě druhý. Impedance, na které pracuje přívodní kabel, pak bývá 200 až 2000 Ω .

V tělese páskového mikrofonu je převodní transformátor umístěn vždy, neboť upravuje velmi nízkou impedanci samého pásku (asi 0,1 Ω) na obvyklých 200 Ω .

Zatěžovací impedance bývá předepsána nebo se volí $3 \times$ až $10 \times$ větší než impedance výstupní. Při nižších zatěžovacích impedancích by hlavně rozptylová indukčnost převodních transformátorů mohla zavinit pokles u vyšších kmitočtů.

Páskové mikrofony mají velmi kvalitní frekvenční charakteristiky, jsou ale náchylné na silnější proud vzduchu (nebezpečí „vyfouknutí“ pásku z mezery), a to např. i při vyslovení retnic (b, p, v atd.) v přímé blízkosti mikrofonu. Doporučená minimální vzdálenost je proto asi 0,5 m.

Elektrodynamické mikrofony, především cívkové, jsou dnes nejrozšířenější. Jsou poměrně levné a přitom velmi kvalitní a vhodné souhrnem svých vlastností pro věrný přenos zvuku. K jejich rozšíření přispívá i snadné připojení do vstupních obvodů zesilovačů, neboť bez zvláštních opatření dovolují přívody až několik desítek metrů dlouhé, a dostačuje vstupní impedance zesilovačů 50 až 100 k Ω , tj. impedance lehce realizovatelná i u tranzistorových zesilovačů.

Šumové napětí vznikající v elektrických obvodech mikrofonů je dáno (při 20 °C) vztahem

$$U_{\text{š}} = \sqrt{1,64 \cdot 10^{-20} \cdot R(f_2 - f_1)}, \quad (17-28)$$

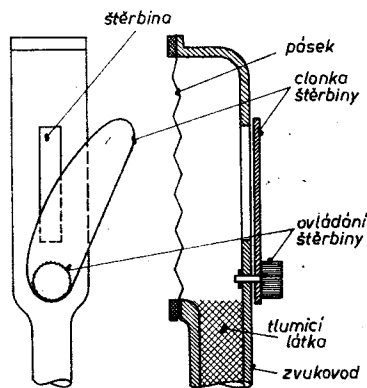
kde R je odpor v Ω ,

f_2, f_1 — mezní kmitočty přenášeného pásma,

$U_{\text{š}}$ — na výstupu mikrofonu odevzdávané napětí ve V.

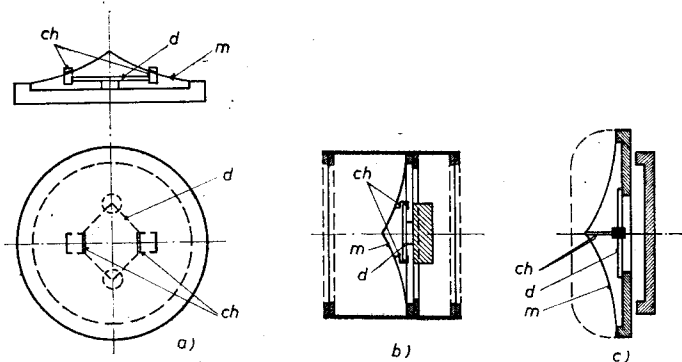
17.2-3 Mikrofony piezoelektrické (krystalové)

Při snímání zvuku, kde nejsou kladeny tak vysoké požadavky na kvalitu přenosu, se setkáváme nejčastěji s mikrofony piezoelektrickými, nesprávně zvanými také krystalovými. Nehledíme-li na to, jak jsou namáhána krysta-



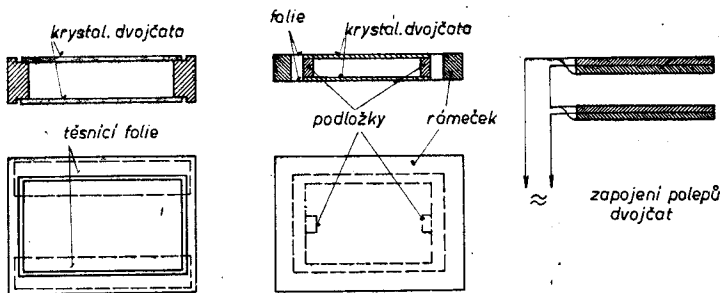
Obr. 17-18. Ovládání směrových charakteristik páskového mikrofonu (mikrofon naznačen bez magnetu a pólových nástavců)

lová dvojčata měnič (zda torzně či ohybově), setkáváme se v zásadě se dvěma konstrukcemi: piezoelektrický mikrofón membránový (obr. 17-19) a bezmembránový (obr. 17-20). Piezoelektrické mikrofóny mohou mít velmi dobrou kmitočtovou charakteristiku, ale dřívější záplava komerčních výrobků jim zkazila pověst. Dnes lze sériově vyrábět piezoelektrické membránové mikrofóny s průběhem 50 až 10 000 Hz s odchylkami i ± 3 dB; ještě lepší jsou mikrofóny bezmembránové, kde akustický tlak působí přímo na povrch výbrusu a které v pásmu 50 Hz až 12 kHz nemusí mít odchylky větší než ± 2 dB při citlivosti 2 mV/Nm^{-2} . Ceny piezoelektrických mikrofónů jsou několikrát nižší než např. ceny elektrodynamických mikrofónů s odpo-



Obr. 17-19. Piezoelektrické mikrofóny membránové

a - tlakový — kulový — mikrofón, b - rychlostní piezoelektrická vložka v akustických obvodech jako gradientní mikrofón I. řádu, c - kombinací akustických vstupů lze získat vložku kardioidní (d - dvojče, m - membrána, ch - chvějky)



Obr. 17-20. Bezmembránový piezoelektrický mikrofón

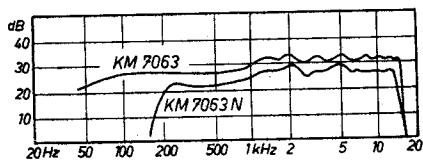
(dvojčata uložena přímo v rámečku — vlevo; dvojčata uložena volně, v rámečku jsou nesený fólií — vpravo)

vídajícími vlastnostmi. Příkladem moderního řešení membránového piezoelektrického mikrofону je typ KM 7063. V pásmu 50 až 12 000 Hz vykazuje tento výrobek RFT (Lipsko) nerovnoměrnost ± 4 dB a odevzdává výstupní napětí 15 mV/Nm^{-2} . Směrové charakteristiky pro kmitočty nižší než 5 kHz jsou kulové. Při vnitřní kapacitě mikrofónu 2000 pF vyžaduje připojení zatěžovací impedance vyšší než 1 M Ω . Pro tento mikrofón je také navržen vestavný snižovací převodní transformátor (u mikrofónu typu KM 7063 N), který v pásmu 200 až 12 000 Hz ± 4 dB má citlivost 3 mV/Nm^{-2} při doporučené minimální zatěžovací impedanci 5 k Ω (obr. 17-21).

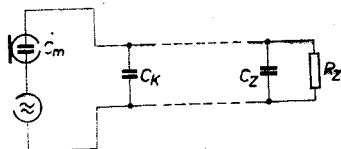
Piezoelektrické mikrofóny pracují jako kapacitní zdroj napětí a jejich zatěžovací odpory proto musí mít vysoké hodnoty. Zatěžovací odpor R (např. vstupní odpor zesilovače) musí vyhovovat podmínce

$$R > \frac{1}{2\pi f C}, \quad (17-29)$$

kde C je vnitřní kapacita mikrofónu a f — nejnižší kmitočet, který má být přenášen.



Obr. 17-21. Kmitočtová charakteristika piezoelektrického mikrofónu



Obr. 17-22. Kapacitní zdroj zatížený kapacitou kabelu a vstupem zesilovače

Štítný kabel svou kapacitou snižuje odevzdávané napětí u' (snižuje citlivost η' mikrofónu), jak vyplývá z náhradního schématu na obr. 17-22. Je-li C_m vnitřní kapacita mikrofónu, C_k kapacita kabelu a C_z vstupní kapacita zesilovače, sníží se odevzdávané napětí v poměru

$$\frac{\eta'}{\eta} = \frac{u'}{u} = \frac{C_m}{C_m + C_k + C_z}; \quad (17-30)$$

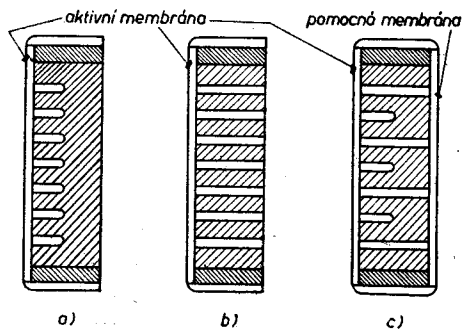
současně se ale kladně projeví snížením nejnižšího přenášeného kmitočtu na

$$f = \frac{1}{2\pi R(C_m + C_k + C_z)}. \quad (17-31)$$

Základní šum odevzdávaný piezoelektrickými mikrofóny lze určit ze vztahu (17-33).

17.2-4 Mikrofony elektrostatické — kondenzátorové

U elektrostatických (zvaných též kondenzátorových) mikrofonů kmitá kovová nebo pokovená plastická membrána při správném návrhu pro akustické kmitočty v podrezonanční oblasti, tvoří sama jedinou součást akustických obvodů elektromechanického měniče, a proto se tyto mikrofony vyznačují velmi vyrovnanou kmitočtovou charakteristikou v celém přeneseném pásmu. I když výroba je technicky náročná, zaručuje poměrně daleko



Obr. 17-23. Akustické obvody u vložek kondenzátorového mikrofону se směrovými charakteristikami

a - kulovou, b - osmičkovou a c - kardioidní (navíc s pomocnou krycí membránou)

přiváděno přes veliký odpor, a tedy kapacita mikrofónu pracuje vlastně s konstantním nábojem. Změny kapacity pak vyvolají změny napětí, které dále můžeme zpracovat běžnými zesilovači. Toto je dnes nejobvyklejší, nejvyšší a nejstabilnější způsob připojení kondenzátorového mikrofónu k zesilovači; tento předzesilovač musí mít ale vstupní impedanci řádu alespoň stovek $M\Omega$ s ohledem na poměrně malé klidové kapacity mikrofónních vložek (50 až 150 pF). Při takovéto impedanci nemůže být dlouhý přívod, a proto předzesilovače musí být v bezprostřední blízkosti mikrofónních vložek, nejčastěji ve společném tělese. Pouze zvláštní úprava zapojení dovoluje vzdálit mikrofón o několik metrů od předzesilovače (např. předzesilovač do paty mikrofónního stojanu), ale pak je nutno použít dvojitého stínění určitých vlastností. Ve všech případech nf zapojení kvalitních kondenzátorových mikrofonů pracuje vstupní zesilovač jako impedanční transformátor snižující vysokou vstupní impedanci na nízkohmo-

signálu k membráně mohou mít jak kulovou, tak i osmičkovou či kardioidní charakteristiku (obr. 17-23); musíme zde zaručit přístup akustického signálu i k zadní straně membrány. V úpravě se dvěma aktivními membránami lze měnit směrovou charakteristiku i během provozu a dálkově ji ovládat (obr. 17-26).

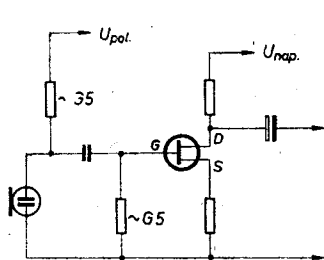
Jak vyplývá z principu měniče, mění se zde vlastně kapacita mezi membránou a protielektrodou a změny této kapacity nesou obraz snímaného akustického signálu. Změny kapacity mohou být převedeny na elektrický nízkofrekvenční signál v obvodu, kde polarizační napětí mikrofónu je

vý výstup, který již můžeme vést i mnoho desítek metrů dlouhými kabely.

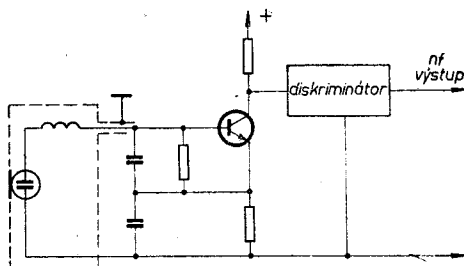
Při klidové kapacitě mikrofonní vložky C_0 odevzdává mikrofon v nf zapojení (obr. 17-24) při polarizačním napětí U_0 a akustickým signálem vyvolaných změnách kapacity ΔC na zatěžovacím odporu R_z napětí

$$u = \frac{R_z \cdot \Delta C \cdot \sin \omega t}{C_0 \sqrt{\left(\frac{1}{\omega C_0}\right)^2 + R_z^2}} U_0. \quad (17-32)$$

Do kapacity C_0 je nutno započítat i parazitní kapacity zapojení. Podobně



Obr. 17-24. Nízkofrekvenční zapojení kondenzátorového mikrofonu.



Obr. 17-25. Vysokofrekvenční zapojení kondenzátorového mikrofonu.

jako u piezoelektrických mikrofonů musí odpor R_z vyhovovat podmínce ze vztahu (17-29).

Kondenzátorový mikrofon odevzdává šum, který není definován pouze reálným odporem R_z , ale i k němu paralelně ležící kapacitou C_0 . Při teplotě 20°C a mezních kmitočtech přenosu f_2 a f_1 je dáno šumové napětí vztahem

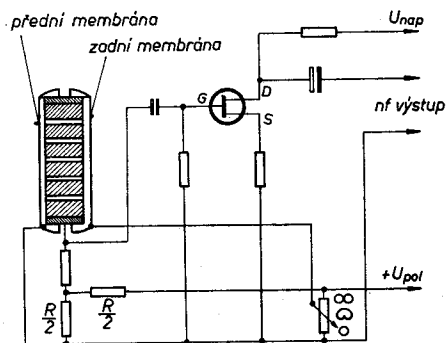
$$u_s = \sqrt{\frac{1,64 \cdot 10^{-20}}{2\pi C_0} (\arctg R_z C_0 2\pi f_2 - \arctg R_z C_0 2\pi f_1)}. \quad (17-33)$$

Přitom je nutno pamatovat na to, že odpor R_z je dán paralelní kombinací odporu, přes který je přiváděno polarizační napětí, a skutečného vstupního odporu zesilovače. Pro určité kombinace C_0 , R_z , f_2 a f_1 může hodnota šumového napětí nabývat maxima.

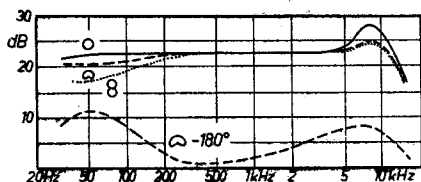
Druhý způsob zapojení kondenzátorových mikrofonů využívá změn kapacity k frekvenční modulaci vysokofrekvenčního oscilátoru (obr. 17-25). Tento způsob vykazuje určitou nestabilitu vlastností (absolutní úrovně), a proto se používá pouze u tzv. mikroportů, tj. mikrofonů s vlastním vysílačem, které nevyžadují kabelový přívod. Mikroporty jsou samostatně na-

pájené tranzistorové, většinou fm vysílače, kde teprve na přijímací straně — bezdrátovým spojením — se získává dále zpracováváný nf signál.

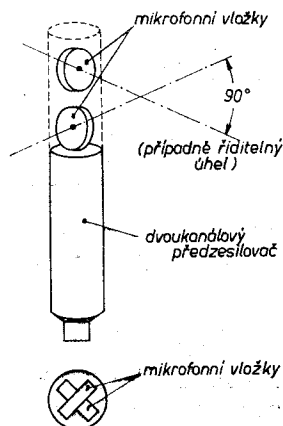
U dvoumembranového provedení kondenzátorových mikrofonů můžeme dosáhnout změnou polarizačního napětí jednotlivých membrán i změny vlastností směrových (obr. 17-26). Mají-li obě membrány proti pevné elektrodě stejné polarizační napětí, pak je výsledná směrová charakteristika kulová. Jsou-li napětí na membránách opačné polarity, pracuje celý mikrofon jako rychlostní s charakteristikou osmičkovou. Konečně je-li zapojena jen jedna



Obr. 17-26. Příklad zapojení pro dálkové ovládní směrové charakteristiky kondenzátorových mikrofonů



Obr. 17-27. Kmitočtové charakteristiky kondenzátorového mikrofonu KM 56c pro různé zvolené směrové charakteristiky



Obr. 17-28. Obvyklé vnitřní uspořádání kondenzátorových mikrofonů pro intenzitní stereofonii

membrána na polarizační napětí, druhá má potenciál shodný s protielektrodou, uplatní se plně akustické obvody v protielektrodě (otvory průchozí i zaslepené) a výsledná směrová charakteristika je kardioidní.

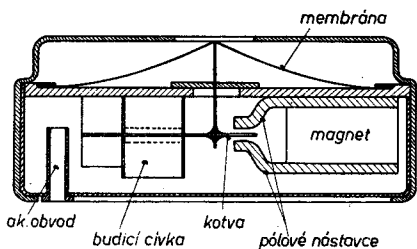
Poněvadž v praxi pracuje kondenzátorový mikrofon vždy s určitým předzesilovačem, udávají se vlastnosti kondenzátorových mikrofonů ve vztahu k výstupu příslušného předzesilovače. Dnešní stav dosahovaných vlastností a různých provedení kondenzátorových mikrofonů zachycuje přehled v tab. 17-6.

Tab. 17-6 Vlastnosti sériově vyráběných kondenzátorových mikrofonů

Typ	AMC 462	Elektret	UM 57	KM 56c	U 67	C 12 A	C 24 (stereo)
kmit. rozsah od—do Hz	50 až 15 000	50 až 15 000	50 až 15 000	(obr. 17—27)	30 až 16 000	30 až 20 000	30 až 15 000
nerov. ± dB	2,5/5,0	2,5	6,0/3,0/5,0		3,5/2,5/4,5	2,5/2,0/2,5	4,0/3,0/5,0
směr. char.	kul/kar	kul/kar	kul/kar/ osm	kul/kar/ osm	kul/kar/ osm	kul/kar/ osm	kul/kar/ osm
citlivost mV/Nm ⁻²	10	30	8	9	11/20/14	4	10 (oba systémy)
výst. imp. Ω	200	200	200	200	200	200	200
R _z > kΩ	—	2	—	1	1	0,5	0,5
ekv. hlad. šumu	24 dB(C)	31 dB(C)	24 dB(C)	29 dB(A)	28 dB(A)	20 dB(A)	22 dB(A)
výrobce	Tesla- Val. Mez.	VÚST- VUELA	Neumann NDR	Neumann NSR	Neumann NSR	AKG Wien	AKG Wien
pozn.	výmenné vločky	výmenné vločky	dálkové měnitel. směrová charakt.	směrová charakter. volitelná na předzes.	dálkové měnitel. směrová charakt.	dálkové měnitel. směrová charakt.	dálkové měnitel. směrová charakt. pro každý systém

Přivádění vysokého polarizačního napětí (cca 150 až 300 V_{ss}) lze odstranit použitím elektretů, tj. keramických materiálů protelektrod, které podrží (2 až 5 let) vnucenou polarizaci, takže kondenzátorové mikrofony pak nevyžadují pro svůj provoz zdroj vysokého napětí (např. typ Elektret v tab. 17-6). Celé zařízení lze pak tranzistorizovat s nízkým napájecím napětím a vysoké vstupní impedance předzesilovače dosáhneme použitím tranzistorů řízených polem (FET).

Na obr. 17-28 (a v tab. 17-6, typ C 24) je mikrofon určený pro intenzitní stereofonii. Je osazen dvěma shodnými mikrofonními vložkami (s proměnnou směrovou charakteristikou) a předzesilovač obsahuje dva samostatné kanály. Horní vložka se dá proti spodní natáčet o 180°; tím lze také řídit šíři stereofonní báze.



Obr. 17-29. Konstruktivní uspořádání miniaturního elektromagnetického mikrofonu

reproduktor. Příklad konstrukce dvoupólového uspořádání (viz kap. 17.1-4) je na obr. 17-29.

Tak např. typ AMM 100 Tesly Valašské Meziříčí dává v pásmu 350 až 3500 Hz při nerovnoměrnosti ± 8 dB na impedanci 2 k Ω výstupní napětí 4 mV/Nm⁻².

17.2-6 Snímání zvuku

Se směrovou charakteristikou je úzce spojeno i použití mikrofonů. Mikrofony se směrovou charakteristikou kulovou, tj. mikrofony snímající rovnocenně signály přicházející ze všech směrů, jsou určeny dnes již spíše pro účely technické (měřicí mikrofony) a nejsou vhodné pro pořizování akustických záznamů v uzavřených, akusticky neupravených prostorech, neboť snímají i nežádoucí signály odražené se v prostoru. Určitým zlepšením jsou již mikrofony se směrovou charakteristikou osmičkovou, které při snímání preferují signály pouze ze dvou směrů (zepředu a zezadu). Nejlépe pro většinu případů vyhovují mikrofony se směrovou charakteristikou kardioidní, které snímají signály přicházející k mikrofonu převážně z přední strany; u těchto mikrofonů je nejlépe vyzdvížen signál chtěný —

snímaný, proti signálům nechtěným (neuvažujeme-li speciální mikrofony směrové).

Při snímání v uzavřených prostorách musíme mít vždy na zřeteli dozvuk místnosti, který ovlivní výsledný subjektivní vjem snímaného zvuku. Dozvuk vzniká mnohonásobnými odrazy od stěn místnosti, a prodlužuje tak trvání zvukového signálu v prostoru. Od stěn odražený zvuk nesmí dorazit k mikrofonu později než asi 50 ms po signálu hlavním — přímým; při větším časovém rozdílu mezi signálem přímým a odraženým může nastávat směšování (při době asi 60 až 100 ms) nebo i ozvěna (při době delší než 100 ms).

Bez přítomnosti odraženého zvuku je ale zvuk ostrý, řezavý a zvukový snímek nemůže vyvolat dojem snímání v uzavřeném prostoru. Je tedy nutné vhodně volit poměr přímého a odraženého zvuku. Umístíme-li mikrofon příliš blízko, snímáme prakticky pouze zvuk přímý, zvuk odražený je mnohonásobně slabší a neuplatní se. Příliš vzdálený mikrofon snímá zvuk v poli vln odražených a snímek je jakoby zastřený. Nejvhodnější je vzdálenost, kdy je hustota zvukové energie přímého zvuku stejná jako hustota energie odraženého zvuku; tuto optimální vzdálenost nazýváme dozvukovou vzdáleností r [m]. Pro její přesné určení je rozhodující celková pohltivost prostoru A [m²], ale můžeme ji určit také z objemu místnosti V [m³] a odhadnuté doby dozvuku T [s]

$$r_{\text{doz}} = 0,14 \sqrt{A} = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}} . \quad (17-34)$$

Doba dozvuku malých sálů (asi 100 m³) bývá od 0,5 s do 1,2 s; u středních sálů (asi 1000 m³) od 0,7 s do 1,5 s; u velkých až 2,5 s. Nejvhodnější doba dozvuku je u sálu 1000 m³ asi 1,3 s; pro koncertní hudbu vždy o něco delší, zde 1,8 s.

Při snímání zvuku ve volném prostoru chybí odražený zvuk vůbec. Živosti a barvy zvuku tedy nemůžeme přirozeným dozvukem dosáhnout, a proto je vhodné použít dalšího mikrofonu, jehož signál k signálu hlavního mikrofonu přidáváme. Tento doplňující signál má mít zpoždění asi 30 ms a nemá překročit 50 ms; jeho úroveň volíme asi o 10 dB nižší než úroveň signálu hlavního. Pomocný mikrofon umístíme tedy tak, aby signál k němu dorazil s požadovaným zpožděním, tj. umístíme ho do vzdálenosti s [m]

$$s = x + 35 \cdot 10^{-3} \cdot c_0 = x + 11 , \quad (17-35)$$

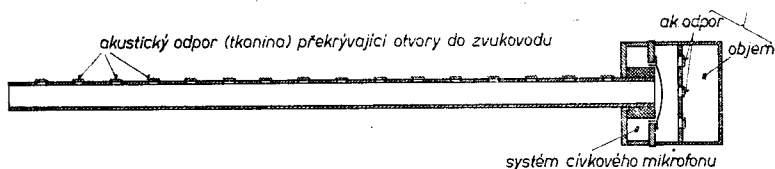
kde x je vzdálenost hlavního mikrofonu od zdroje zvuku [m],

c_0 — rychlost zvuku = 343 ms⁻¹.

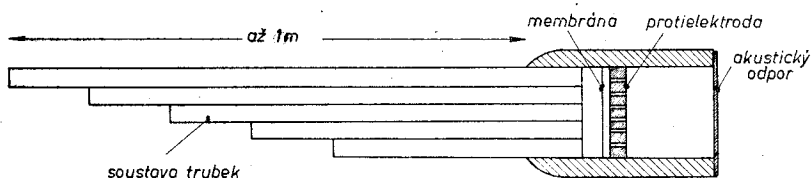
Při snímání ve volném prostoru není již směrová charakteristika použitého mikrofonu tak důležitá, není-li zde přímo další — rušivý — zdroj zvuku.

Pro hlučné prostředí, kde má být snímán žádaný zvuk, který je značně rušen dalším nežádoucím zvukem, jsou vhodné mikrofony gradientní,

působící na gradient akustického tlaku, a tím potlačující vzdálenější zdroje hluku, u kterých je již gradient velmi malý. Jejich nevýhodou je, že musí pracovat v bezprostřední blízkosti zdroje žádaného zvuku (např. úst). Čím vyšší řád gradientního mikrofону, tím je potřebná menší vzdálenost. Např. pro gradientní mikrofón druhého řádu, tj. mikrofón reagující na druhou derivaci akustického tlaku, je potřebná vzdálenost nejméně několik cm.



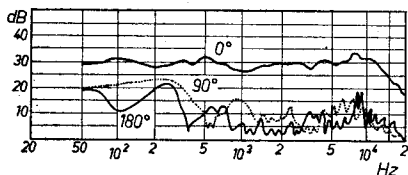
Obr. 17-30. Ultrasměrový mikrofón s jediným zvukovodem



Obr. 17-31. Ostře směrový mikrofón se soustavou zvukovodů

Jako příklad účinnosti potlačení nežádoucího zvuku: v prostředí strojovny, kde hluk dosahuje až 116 dB a dorozumění mezi osobami na vzdálenost větší než asi 0,8 m je takřka nemožné, bylo v signálu snímaném gradientním mikrofónem druhého řádu těžko poznatelné, zda stroje jsou v chodu či nikoli. Dosahovaná slovní srozumitelnost přesahovala 90 % (v příliš hlučném prostředí vzniká již přímo nesprávné vyslovování).

Pro snímání zvuku z větších vzdáleností nebo pro snímání zvuku pouze určitého zdroje zvuku lze použít ostře směrované mikrofóny. Jsou to mikrofóny opatřené buď jediným,



Obr. 17-32. Kmitočtová charakteristika ostře směrového (bigradilinkového) mikrofónu Tesla pro různé úhly dopadu signálu

mnoho vstupů vhodně upravených akustickým odporem (obr. 17-30), nebo jsou opatřeny soustavou zvukovodů zcela určitých geometrických rozměrů (obr. 17-31). V obou základních typech řešení ultrasměrových mikrofónů jde vlastně o soustavu laděných akustických obvodů, a proto i frekvenční

charakteristiky jsou poměrně zvlněné (obr. 17-32), ať již je použit měnič elektrodynamický cívkový (obr. 17-30), nebo kondenzátorový (obr. 17-31). Pro vyšší kmitočty vykazují směrové charakteristiky velmi ostré směřování, 10° až 30° , a i u nejhlubších kmitočtů je dosahováno potlačení signálů přicházejících ze zadní strany mikrofону o 30 až 50 dB (obr. 17-33). Takovéto mikrofóny jsou vhodné pro snímání řeči ze vzdálenosti až 50 m.

17.3 REPRODUKCE ZVUKU

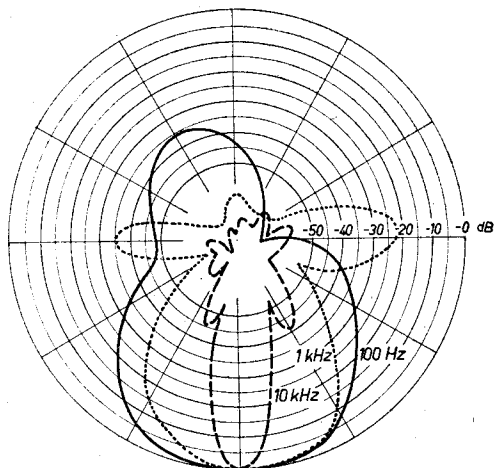
Naprostá převaha dnešních reproduktorů využívá principu elektrodynamického a pouze pro přenos nejvyšších kmitočtů se uplatňují doplňkové reproduktory elektrostatické.

Podle způsobu vyzařování mohou membrány reproduktorů vyzařovat zvuk buď bezprostředně, přímo (reproduktory přímo vyzařující), nebo membrána odevzdává vybuzený akustický tlak na vstup zvukovodu, který přizpůsobí zatížení membrány vlnové impedanci prostředí. Teprve na výstupu zvukovodu odevzdává zvuk do prostředí (reproduktory nepřímou vyzařující — tlakové).

Má-li být vyzařování zvuku reproduktorem účinné, nemůže reproduktor pracovat samostatně; musí být v ozvučnici nebo musí být zatížen zvukovodem.

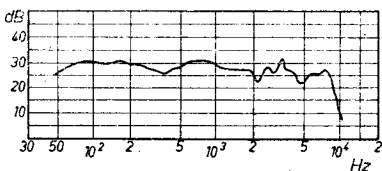
17.3-1 Základní vlastnosti reproduktorů

U reproduktorů nás zajímá především vyrovnaný kmitočtový průběh (např. obr. 17-34) a u elektrodynamických rezonanční kmitočet f_r udávaný v prospektech jako jedna z charakteristických veličin reproduktorů. Rezanční kmitočet, jehož přesnou hodnotu potřebujeme znát prakticky při každém použití a výpočtu týkajícího se reproduktoru, můžeme poměrně snadno změřit. Při konstantním napájecím napětí U signálem pozorujeme proud odebíraný reproduktorem; u rezonančního kmitočtu f_r proud náhle poklesne.



Obr. 17-33. Směrové charakteristiky bigradilinkového mikrofónu Tesla

Při všech návrzích je stejně důležitá jmenovitá impedance reproduktoru, což je nejmenší elektrická impedance reproduktoru v pásmu přenášených kmitočtů. Bývá obvykle asi o 20 % větší, než je ohmický odpor kmitací cívky. Charakteristická citlivost reproduktoru c_r nám udává akustický tlak ve vzdálenosti 1 m v ose reproduktoru, při příkonu 1 VA do jmenovité impedance. Udává se v dB akustického tlaku vzhledem ke vztažné úrovni $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}^{-2}$; správně by měla rozměr Nm/\sqrt{W} . Někdy se charakteristická citlivost reproduktoru udává pro signál 400 Hz a příkon 0,1 VA.



Obr. 17-34. Kmitočtová charakteristika nízkofrekvenčního reproduktoru ARZ 669 — \varnothing 200 mm

pájení překročena, aby nedošlo k nadměrnému zkreslení či mechanickému poškození reproduktoru. Účinnost elektrodynamických reproduktorů jako poměr elektrického příkonu k vyzářenému akustickému výkonu je u přímo-vyzařujících reproduktorů velmi malá. Lze uvést, že u reproduktorů průměru menšího než 10 cm bývá 1 až 2 %, u reproduktorů průměru asi 20 cm kolem 2 % a u velkých (hloubkových) 2 až 5 %. Naproti tomu tlakové reproduktory s ohledem na účinnější zatížení membrány vyzářovací impedance dosahují účinnosti 5 až 25 %, podle řešení tlakové komůrky a zvukovodu. Obvyklé hodnoty nelineárních zkreslení jsou u rezonančních kmitočtů až 20 %; směrem k vyšším kmitočtům zkreslení klesá, tak např. u středních a vysokých kmitočtů je asi 2 %, u nejvyšších kmitočtů až 0,5 %.

Mezinárodně byly doporučeny rozměry reproduktorů uvedené v tab. 17-7 pro kruhové reproduktory a v tab. 17-8 pro eliptické reproduktory spolu s tvary košů podle obr. 17-35 a 17-36. Přehled vlastností vybraných reproduktorů Tesla je v tab. 17-9; u kruhových reproduktorů použitá značka k ve sloupci rozměr membrány znamená, že reproduktor má tvar B podle obr. 17-35, a podobně značka č poukazuje na typ A (čtvercový) z obr. 17-35.

17.3-2 Elektrodynamické reproduktory

Základní typická konstrukce přímo-vyzařujícího reproduktoru je patrná z obr. 17-37, reproduktoru tlakového z obr. 17-38. Proti naznačené kon-

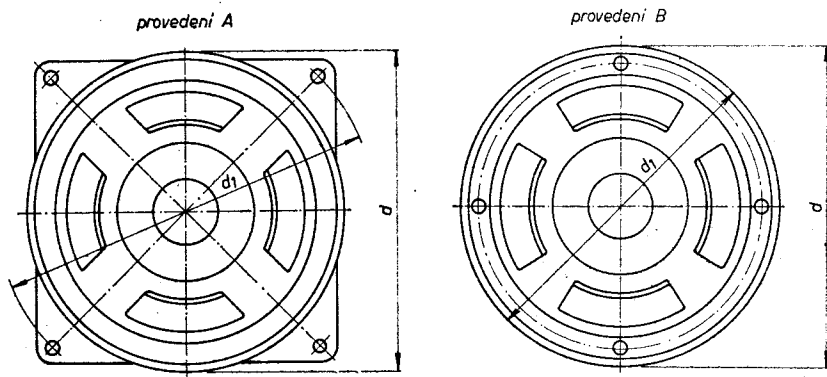
Z charakteristické citlivosti reproduktoru můžeme určit akustický tlak p [Nm^{-2}] ve vzdálenosti x [m], vyvolaný reproduktorem

$$p = \frac{c_r}{x} \sqrt{P_{el}} \quad [\text{Nm}^{-2}; \text{dB}, \text{m}, \text{VA}], \quad (17-36)$$

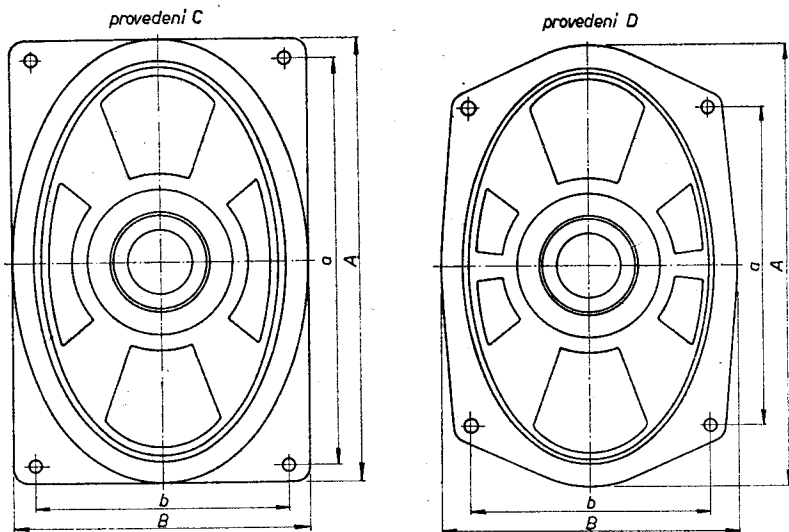
kde P_{el} je elektrický příkon ve VA.

Maximální příkon reproduktoru udává hodnotu, která nesmí být při na-

strukci se elektrodynamické reproduktory určené pro vyzařování vysokých kmitočtů liší tím, že nemusí mít proti zadní straně membrány velký vzduchový polštář (zaručující poddajné prostředí), a proto bývá jejich koš úplně uzavřen. Reproduktorů s úplně uzavřeným košem je tak možno používat u soustav v uzavřených ozvučnicích, kde by reproduktory bez uzavřených



Obr. 17-35. K tab. 17-7 o doporučených rozměrech kruhových reproduktorů



Obr. 17-36. K tabulce doporučených rozměrů eliptických reproduktorů

Tab. 17-7 Mezinárodně doporučené rozměry pro kruhové reproduktory

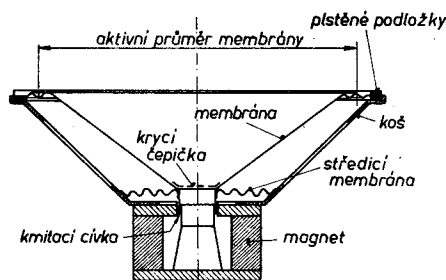
Typ	Průměr koše d mm	Průměr roztečné kružnice d_1 mm	Průměr otvorů šroubů mm	Provedení	Průměr otvoru v ozvuč. mm
K1	65	$74 \pm 0,5$	4,8	A	53
K2	75	$85,5 \pm 0,5$	5,0	A	62
K3	100	$119 \pm 0,5$	5,0	A	84
K4	130	$119 \pm 0,5$	5,0	B	107
K5	165	$156 \pm 0,5$	5,0	B	142
K6	200	$193 \pm 0,5$	5,0	B	176
K7	250	$244 \pm 1,0$	5,5	B	226
K8	300	$293 \pm 1,0$	6,5	B	276
K9	380	$370 \pm 1,0$	6,5	B	350

Tab. 17-8 Mezinárodně doporučené rozměry pro eliptické reproduktory

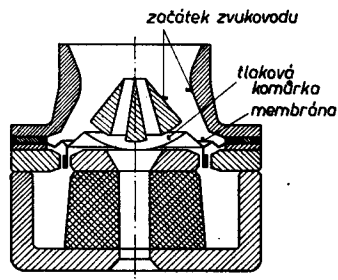
Typ	Rozměr koše $A \times B$ mm	Rozteče otvorů $a \times b (\pm 0,5)$ mm	Průměr otvorů pro šroub mm	Provedení	Ovál v ozvučnici mm
E1	75×45	65×35	4,3	C	53×23
E2	95×60	83×48	5,0	C	82×47
E3	125×80	105×60	5,0	D	109×64
E4	160×100	130×75	5,0	D	146×86
E5	205×130	165×95	5,0	D	188×113
E6	255×160	210×115	5,0	D	230×135

košů vytvářely určité nežádoucí spojení mezi volným prostorem a objemem uzavřeným v ozvučnici.

Membrána přímovyzářujících reproduktorů je nejčastěji kuželová; musí



Obr. 17-37. Typická konstrukce elektrodynamickeho přímovyzářujícího reproduktoru

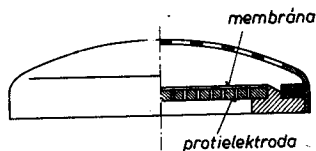


Obr. 17-38. Typická konstrukce dózy elektrodynamickeho tlakového (nepřímovyzářujícího) reproduktoru

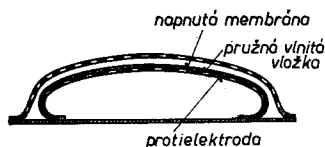
být spolu s ostatními částmi kmitající soustavy co nejlhčí, ale přitom dostatečně tuhá, aby tak zaručovala pístový pohyb membrány. Tomu napomáhá konstrukce eliptických reproduktorů, jejichž membrána tím, že není rozvinutelná do roviny, zabraňuje vzniku subharmonických tónů.

17.3-3 Elektrostatické reproduktory

Elektrostatické reproduktory se používají jako výškové zářiče (obr. 17-39, 40). Charakteristická citlivost je poměrně malá a teprve u reproduktorů, které mají plochu membrány 20 až 30 dm², lze dosáhnout citlivostí blízkou se citlivostí reproduktorů dynamických. Vnitřní impedance má



Obr. 17-39. Elektrostatický reproduktor s membránou o malé ploše (konstrukce obdobná kondenzátorovému mikrofonu)

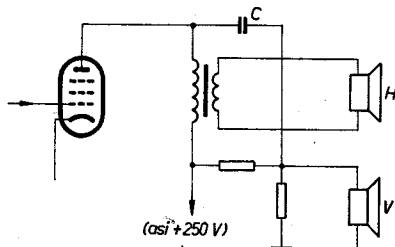


Obr. 17-40. Praktická konstrukce laconického elektrostatického reproduktoru

charakter kapacitní a bývá 1000 až 20 000 pF. Pro svou funkci vyžaduje elektrostatický reproduktor polarizační stejnosměrné napětí (200 až 1000 V), které komplikuje připojování těchto reproduktorů k výstupu zesilovačů (obr. 17-41). Pro svou malou citlivost a nepraktické napájení ztrácejí na významu; teprve moderní řešení velkoplošných reproduktorů (až 1,5 m²) může zdůraznit jejich hlavní přednosti, tj. vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku (± 2 až 3 dB) v celém pásmu a dosažitelné velmi nízké zkreslení (pod 0,5 %).

17.3-4 Ozvučnice a zvukovody

U reproduktoru odevzdávajícího signál do normálního vzdušného prostředí musí být jeho membrána zatížena vhodnou vyzářovací impedancí, která vlastně představuje reakci prostředí, do něhož reproduktor vyzářuje. Přitom reálná část této impedance představuje mechanický odpor, v němž se výkon vyzářený reproduktorem spotře-



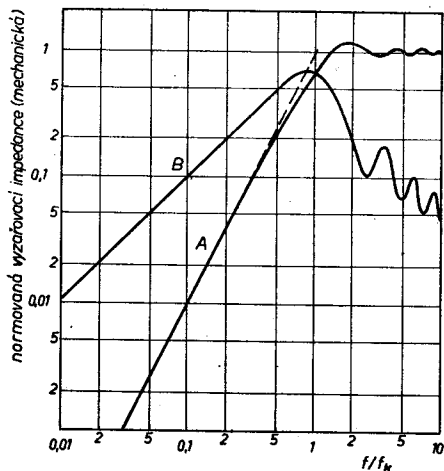
Obr. 17-41. Zapojení elektrostatického reproduktoru na výstup přijímače

Tab. 17-9 Charakteristické vlastnosti reproduktorů Tesla

Typ	Rozměr membrány mm	Maxim. příkon VA	Impedance Ω	Rezon. kmitočet Hz	Kmitoč. rozsah Hz	Char. ctitliv. dB	Syčení v mez. G	Vestav. výška mm	Váha P	Otvor v ozvuč. mm	Špičk. příkon VA
<i>Hlubokotónové reproduktory</i>											
ARZ369	\varnothing 100 k	3	4	<60	50-3500	85	10 000	60	0,66	\varnothing 88	10
ARZ668	\varnothing 203 k	5	8	<28	20-6000	87	9 000	86	0,83	\varnothing 185	10
ARZ669	\varnothing 203 k	5	4	<28	20-6000	87	9 000	86	0,83	\varnothing 185	10
ARO835	\varnothing 338 k	10	4	30-45	30-4000	96	10 000	153	5,15	\varnothing 300	15
ARO932	\varnothing 390 k	15	15	24-36	22-4000	98	13 500	227	10,20	\varnothing 350	30
ARO942	\varnothing 380 k	15	30	24-36	22-4000	98	13 500	229	10,20	\varnothing 350	30
<i>výškové reproduktory</i>											
ARV081	50 x 75	2	5,5	-	1k-16k	90	7 500	43	0,18	43 x 68	3
ARV261	\varnothing 101 ě	1,5	4	-	6k-16k	97	12 000	55	0,38	\varnothing 88	4
ART481	tlakový	5	0,6	zvuko- vod	3k-18k	93	13 000	146	1,00	32 x 129	7
<i>Přijímačové reproduktory</i>											
reproduktory s magnetem AlNiCo											
ARO389	\varnothing 100 ě	1,5	4	150-220	150-15k	85	7000	52	0,18	\varnothing 84	3
ARO385	\varnothing 100 ě	1,5	50	150-220	150-15k	85	7000	52	0,18	\varnothing 84	3
ARO589	\varnothing 165 k	3	4	80-120	80-12k	90	7000	69	0,23	\varnothing 142	4
ARO689	\varnothing 203 k	5	4	60-90	60-10k	92	8500	84	0,45	\varnothing 176	6
ARE389	80 x 125	1,5	4	160-270	160-15k	85	7000	51	0,19	64 x 109	3
ARE486	100 x 160	2	10	110-160	110-15k	86	7000	56	0,21	86 x 146	3
ARE489	100 x 160	2	4	110-160	110-15k	87	7000	56	0,21	86 x 146	3
ARE589	130 x 205	3	4	80-120	80-14k	88	7000	66	0,23	113 x 188	4
ARE689	160 x 255	5	4	60-90	60-10k	90	8500	79	0,46	135 x 230	6

Pokračování tabulky 17-9

Typ	Rozměr membrány mm	Maxim. příkon VA	Impe- dance Ω	Rezon. kmitočet Hz	Kmitoč. rozsah Hz	Char. citliv. dB	Sycení v mez. G	Vestav. výška mm	Váha p	Otvor v ozvuč. mm	Spitčk. příkon VA
reproduktory s feritovým magnetem											
ARO367	∅ 100 č	1,5	4	150-220	150-15k	88	10 000	53	0,34	∅ 84	3
ARO567	∅ 165 k	3	4	80-120	80-12k	93	10 000	70	0,39	∅ 142	4
ARO666	∅ 203 k	5	8	60-90	60-10k	95	11 000	84	0,84	∅ 176	6
ARO667	∅ 203 k	5	4	60-90	60-10k	95	11 000	84	0,84	∅ 176	6
ARE366	80 × 125	1,5	8	160-270	160-15k	88	10 000	52	0,34	64 × 109	3
ARE367	80 × 125	1,5	4	160-270	160-15k	88	10 000	52	0,34	64 × 109	3
ARE467	100 × 160	2	4	110-160	110-15k	90	10 000	57	0,36	86 × 146	3
ARE567	130 × 205	3	4	80-120	80-14k	91	10 000	67	0,39	113 × 188	4
ARE667	160 × 255	5	4	60-90	60-10k	93	11 000	80	0,79	135 × 230	6
miniaturní reproduktory											
ARZ087	∅ 38 k	0,15	8	400-560	400-8000	81	7 000	20	0,04	∅ 34	0,2
ARZ097	∅ 38 k	0,15	25	400-560	400-8000	80	7 000	20	0,04	∅ 34	0,2
ARZ085	∅ 50 k	0,25	8	360-530	360-5000	85	7 000	21	0,04	∅ 44	0,35
ARZ094	∅ 50 k	0,25	2 × 30	360-530	360-5000	83	7 000	22	0,04	∅ 44	0,35
ARZ096	∅ 50 k	0,25	25	360-530	360-5000	84	7 000	22	0,04	∅ 44	0,35
ARZ081	∅ 65 k	0,25	8	350-480	350-5000	85	7 000	22	0,05	∅ 53	0,35
ARZ381	∅ 117 k	1	4	120-180	120-8000	91	9 000	45	0,38	∅ 100	2
ARZ341	∅ 117 k	1	25	120-180	120-8000	89	9 000	45	0,38	∅ 100	2
speciální tvary reproduktorů											
ARZ385	∅ 119 č	1,5	4	120-180	120-7000	87	6 500	40	0,10	∅ 92	2
ARZ389	∅ 119 č	1,5	8	120-180	120-7000	86	6 500	40	0,10	∅ 92	2
ARZ387	∅ 119 č	1,5	16	120-180	120-7000	85	6 500	40	0,10	∅ 92	2
ARZ384	80 × 125	1,5	4	160-270	160-8000	86	6 500	42	0,09	67 × 112	2
ARZ388	80 × 125	1,5	8	160-270	160-8000	85	6 500	42	0,09	67 × 112	2
ARZ386	80 × 125	1,5	16	160-270	160-8000	84	6 500	42	0,09	67 × 112	2
ARZ662	80 × 280	2,0	4	95-145	95-15000	90	10 000	69	0,45	70 × 265	3
ARZ689	80 × 280	2,0	4	95-145	95-15000	87	7 000	69	0,28	70 × 265	3



Obr. 17-42. Reálná (A) a imaginární (B) složka normované vyzařovací impedance ideální pístové kmitající kruhové membrány

vyzářit, a nemůže tedy sám zaručit vyzařování hlubokých kmitočtů, i když je rezonanční kmitočet reproduktoru vždy menší než f_k .

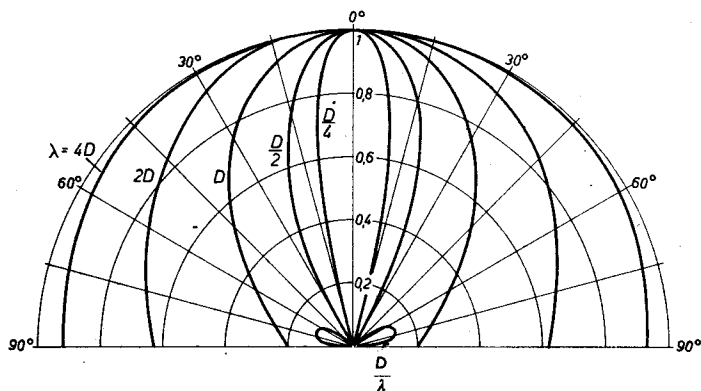
Chceme-li, aby i hluboké kmitočty byly vyzářeny, musíme použít reproduktory s velkým průměrem membrány, tj. též s nízkým rezonančním kmitočtem. Opět je nutno zdůraznit, že nestačí reproduktor sám, ale musí být

buje. Průběh reálné a imaginární složky normované vyzařovací impedance (mechanické) pro pístové kmitající kruhovou membránu je naznačen na obr. 17-42. Zde vidíme, že od jistého kritického kmitočtu f_k průběh reálné složky prudce klesá. Pod tímto kmitočtem nemůže tedy reproduktor účinně pracovat; kmitočet f_k závisí na poloměru membrány r vztahem

$$f_k = \frac{c_0}{\sqrt{2\pi r}} = \frac{137}{\sqrt{r}} \quad [\text{Hz}; \text{m}], \quad (17-37)$$

je-li c_0 rychlost zvuku 343 ms^{-1} .

Z tohoto vztahu můžeme např. vypočítat, že reproduktor $\varnothing 20 \text{ cm}$ má $f_k \doteq 435 \text{ Hz}$; kmitočty nižší než f_k nemůže reproduktor účinně



Obr. 17-43. Směrové charakteristiky ideální pístové kmitající membrány pro různý poměr průměru membrány D k vlnové délce zvuku λ

ve vhodné ozvučnici. Membrána o velké ploše vede ale na druhé straně ke svazkování zvukových vln a k ostře směřovanému vyzařování nejvyšších kmitočtů, jak můžeme vysledovat z *obr. 17-43*.

Desková ozvučnice má za úkol zabránit vyrovnání vzrůstu akustického tlaku před membránou se současným poklesem akustického tlaku za membránou (pohybuje-li se membrána reproduktoru např. vpřed), tedy zabránit tzv. akustickému zkratu. Ozvučnice má zaručit, aby nejkratší dráha od přední strany membrány k zadní straně byla větší než polovina vlnové délky nejnižšího přenášeného kmitočtu f_m (většinou uvažujeme rezonanční kmitočet reproduktoru f_r). Z tohoto požadavku vyplývá pro délku strany u čtvercové ozvučnice požadavek

$$a \geq \frac{170}{f_m} \quad [\text{m}; \text{Hz}]. \quad (17-38)$$

Optimálních výsledků lze dosáhnout, volíme-li nejnižší přenášený kmitočet $f_m = 1,4 f_r$ (rezon. kmitočet reproduktoru). Pak lze upravit vztah (17-36) na

$$a = \frac{120}{f_r} \quad [\text{m}; \text{Hz}]. \quad (17-39)$$

Vyrovnanější kmitočtové charakteristiky u hlubokých kmitočtů dosáhneme, není-li reproduktor umístěn přesně středově, ale je přesazen směrem k jednomu rohu ozvučnice zhruba o

$$\frac{a-d}{5}, \quad (17-40)$$

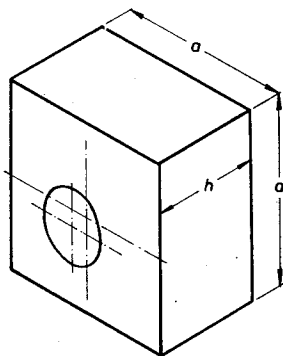
kde d je průměr reproduktoru.

Pro hrubý odhad lze udat, že ozvučnice musí mít nejmenší rozměr rovný alespoň 1/3 délky vlny vyzařovaného signálu.

Skříňová ozvučnice, jejíž zadní část je otevřena (např. děrovaná zadní strana přijímače), vyvolává vzhledem k zadní straně membrány rezonanční soustavu vyznačující se ostrým převýšením kmitočtové charakteristiky, a to tím větším, čím je skříňka hlubší (*obr. 17-44*). Kmitočet f této rezonanční soustavy lze určit přibližně ze vztahu

$$f' = \frac{55}{h \sqrt{1 + \frac{a}{2h}}} \quad [\text{Hz}; \text{m}], \quad (17-41)$$

kde a je strana čtverce rovnoplochého k přední stěně ozvučnice,
 h — hloubka ozvučnice.



Obr. 17-44. Otevřená skříňová ozvučnice

Přítom poměr a/h má ležet v rozmezí 2 až 4 a rezonanční kmitočet reproduktoru má být alespoň $3 \times$ nižší než rezonanční kmitočet ozvučnice.

Nejllepší výsledky může poskytnout ozvučnice uzavřená. Její minimální uzavřený objem O [m³] je dán vztahem

$$O = \frac{c_0^2 \cdot \rho \cdot S^2}{(\omega_s^2 - \omega_r^2) \cdot m_r} = \frac{3600 \cdot S^2}{(f_s^2 - f_r^2) \cdot m_r} \quad [\text{m}^3; \text{m}^2, \text{Hz}, \text{kg}], \quad (17-42)$$

kde c_0 je rychlost zvuku,

ρ — hustota vzduchu = 1,21 kg/m³,

S — plocha membrány,

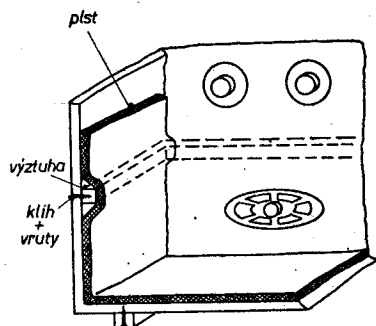
ω_s — $2\pi f_s$, kde f_s je rezonanční kmitočet soustavy,

ω_r — $2\pi f_r$, kde f_r je rezonanční kmitočet reproduktoru,

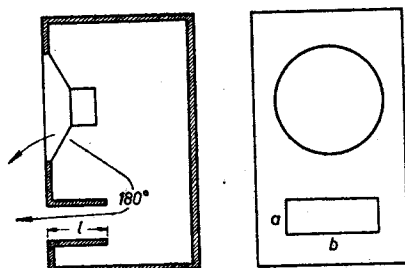
m_r — hmota kmitajících částí reproduktoru.

Rezananční kmitočet soustavy f_s má být vyšší než 1,4 f_r , jinak je nutno očekávat až prakticky nepřijatelně velké objemy skříní.

Jednotlivé rozměry uzavřené ozvučnice nemají být voleny náhodně a doporučuje se volit je v poměru 1 : 1,4 : 2,6; přitom největší rozměr má být nejméně 1/4 vlnové délky nejnižšího přenášeného kmitočtu. Stěny



Obr. 17-45. Vyztužení a vnitřní tlumení ozvučnice



Obr. 17-46. Bass-reflexová ozvučnice

skříně nesmějí rezonovat, aby tím neovlivňovaly kmitočtový průběh vyzařování; proto musí být dostatečně tuhé, případně střední části stěn vyztužené lištami a vnitřní plochy pokryty materiálem pohlcujícím zvuk (plst, skelná vata nebo alespoň 2 vrstvy vlnité lepenky) (obr. 17-45).

Zlepšení vlastností uzavřených ozvučnic lze dosáhnout různými akustickými obvodovými vnitřními ozvučnicemi (uzavřenými, laděnými zvukovody, labyrinty apod.) nebo na vlastních reproduktorech, ale k jejich návrhu je nutné znát podrobně vlastnosti reproduktorů (poddajnost, hmoty kmitacích systémů,

tlumicí odpory apod.), které nemůžeme bez konkrétního proměření získat. Proto ani podrobnější popis by nestačil pro praktický návrh.

Ozvučnice typu bass-reflex (*obr. 17-46*) značně napomáhá rozšíření přenášených kmitočtů směrem k nejnižším kmitočtům. Dosahuje se toho tím, že nad rezonančním kmitočtem akustických obvodů ozvučnice (zadní strana membrány; objem ozvučnice reprezentující akustickou poddajnost; výstupní hrdlo reprezentující akustickou hmotu) se natáčí fáze signálu v hrdle rezonátoru o 180° , takže signál vyzařovaný hrdlem je prakticky ve fázi se signálem vyzařovaným přední stranou membrány, a tak se oba signály podporují. Proto stačí pro vybuzení určitého akustického tlaku menší amplitudy membrány reproduktoru, který tak odevzdává méně zkreslené signály. S určitým zkreslením hlubokých kmitočtů je ale nutné počítat také měření reproduktoru a doladění vypočtených rozměrů bass-reflexové ozvučnice podle následného měření. Mimoto se vlastnosti reproduktorů mohou časem změnit, a tak narušit potřebné přesné nastavení.

Při přibližném návrhu bass-reflexové ozvučnice vyjdeme ze zvoleného objemu ozvučnice O [m^3]. Jako vodítko nám může sloužit objem určený ze vztahu (17-42) pro $f_s \doteq 2f_r$. Tato volba není podmínkou a také s menšími ozvučnicemi lze dosáhnout dobrých výsledků; při menší ozvučnici musí být hrdlo delší nebo plocha hrdla menší. Pro další úvahy a vztahy předpokládáme, že rezonanční kmitočet bass-reflexové ozvučnice f_b je stejný jako rezonanční kmitočet reproduktoru f_r ; nejnižší přenášený kmitočet pak bude zhruba 1,4násobkem kmitočtu $f_r = f_b$.

Plocha výstupního otvoru bass-reflexového hrdla S_h se volí asi 0,5 (max. 0,8) aktivní plochy membrány reproduktoru S_r a poměr stran výstupního otvoru má být asi 1 : 1 až maximálně 1 : 3. Pak při zvolené ploše S_h [m^2] je potřebná délka hrdla l [m]

$$l = 3 \cdot 10^8 \cdot \frac{S_h}{O \cdot f_r^2} - 0,96 \cdot \sqrt{S_h} \quad (17-43)$$

Proudění v hrdle nesmí mít velké ztráty; jeho výstupní otvor nesmí být proto také překryt žádnou látkou, stěny hrdla musí být hladké a na závadu by byla také přílišná délka hrdla l . Musí být současně splněna i podmínka

$$l \leq \sqrt{\frac{S_h}{\pi}} \quad (17-44)$$

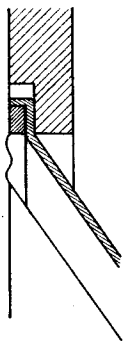
Zadní otvor hrdla musí mít od zadní stěny skříně dostatečnou vzdálenost, opět nejméně vzdálenost danou rovnicí (17-44). Objem, který zabírá hrdlo samo, musíme od objemu skříně odečíst.

Prizpůsobení nepřímo vyzařujících reproduktorů zvukovody vytváří plynulý přechod mezi malou plochou membrány a jejím malým vyzařova-

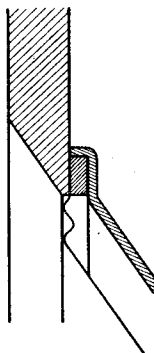
cím odporem a mezi okolním volným prostorem s určitým vlnovým odporem. Nejvýhodnější vlastnosti má exponenciální zvukovod. Průřez vzrůstá od začátku se vzdáleností x podle vztahu

$$S = S_0 \cdot e^{kx}. \quad (17-45)$$

Takto zatížený reproduktor vyznačuje nejnižší kmitočet



a)



b)

$$f_d = 27,4 \frac{\lg \frac{S_k}{S_0}}{l} \quad [\text{Hz}; \text{m}^2; \text{m}], \quad (17-46)$$

kde S_0 je vstupní průřez zvukovodu,
 S_k — jeho výstupní průřez,
 l — celková délka zvukovodu.

Dolní kmitočet je tím nižší, čím pomaleji se zvukovod rozevívá (nižší k v rovnici 17-45) a f_d klesá s rostoucí délkou zvukovodu. Výstupní průřez zvukovodu musí přitom být nejméně

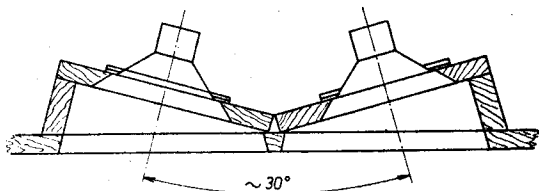
$$S_k = \frac{9400}{f_d^2} \quad [\text{m}^2; \text{Hz}], \quad (17-47)$$

Obr. 17-47. Uchytení reproduktorů na stěnu ozvučnice

aby kmitočtová charakteristika nebyla zvlhena vlivem odrazu způsobeného náhlou změnou vlnového odporu na výstupu zvukovodu. Z daných průřezů S_0 a S_k a požadovaného nejnižšího přenášeného kmitočtu můžeme určit potřebnou délku zvukovodu

$$l = 27,4 \frac{\lg \frac{S_k}{S_0}}{f_d} \quad [\text{m}; \text{m}^2, \text{Hz}]. \quad (17-48)$$

Praktické rozměry zvukovodů vyřazují jejich použití pro přenos hlubokých kmitočtů s výjimkou profesionálních zařízení (kina).



Obr. 17-48. Uložení a vyklonění výškových reproduktorů

Uchycení reproduktorů na stěny ozvučnice může také ovlivnit frekvenční charakteristiku. Správné uložení je patrné z *obr. 17-47*, kde je splněn požadavek, aby před výstupem reproduktoru nebylo hrdlo, ale spíše kuželový zvukovod. U výškových reproduktorů je toto řešení obtížnější, neboť vzhledem k jejich ostrému směrovému vyzařování nejvyšších kmitočtů mají být při větším počtu vzájemně vykloněny (*obr. 17-48*).

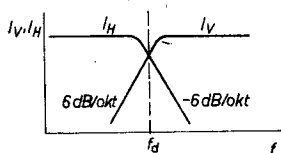
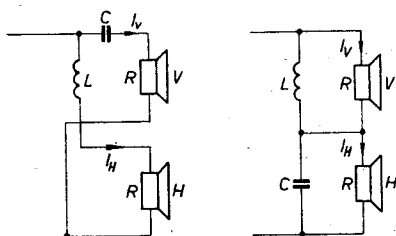
17.3-5 Reproduktorové výhybky

Ani v dobré ozvučnici není schopen dnešním požadavkům na šířku přenášeného pásma vyhovět jeden reproduktor. Překrytí celého pásma kmitočtů dosáhneme dvěma až třemi reproduktory, kde každý z nich je určen pouze pro přenos určitého pásma. Aby nedocházelo k interferenčním jevům u kmitočtů vyzařovaných současně dvěma různými reproduktory, přivádíme k reproduktorům pouze ty kmitočty, které mají vyzářit. Zbytečné interference by měly za následek ostré poklesy a vzestupy frekvenční charakteristiky. K separaci určitých kmitočtů nám slouží elektrické výhybky.

Nejběžnější zapojení elektrické výhybky je na *obr. 17-49*, které dává od dělicího kmitočtu f_d poklesy 6 dB/okt. Reproduktory musí mít stejnou impedanci R , jinak by bylo nutno zařazovat ještě přizpůsobovací transformátory. Pro oba případy v *obr. 17-49* lze určit členy výhybky ze vztahů

$$L = \frac{R}{2\pi f_d} \quad (17-49)$$

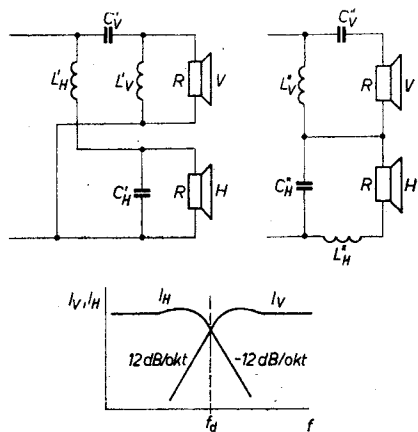
$$C = \frac{1}{2\pi f_d \cdot R} \quad (17-50)$$



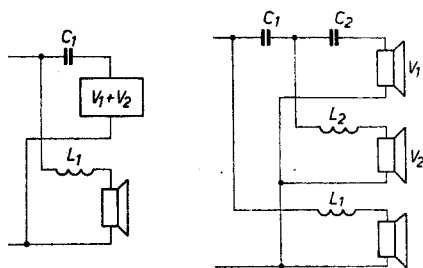
Obr. 17-49. Elektrická výhybka se směrnicí 6 dB/okt (paralelní vlevo, sériová vpravo)

U paralelní výhybky lze při f_d vyšším než asi 3 kHz vynechat indukčnost L , neboť kmitací cívka hloubkového reproduktoru má již sama značnou reaktanci. Oba typy výhybky mají stálou impedanci a zatěžují zesilovač jako jediný reproduktor o odporu R . Dělicí kmitočty volíme na základě znalosti skutečných kmitočtových průběhů reproduktorů; při volbě reproduktorů, které mají spolupracovat, musíme také sledovat výkon, který při určitém přiváděném napětí odevzdávají, aby např. výškový reproduktor nenavazoval sice kmitočtově správně, ale s nižší úrovní akustického tlaku. Musí mít tedy

oba stejnou citlivost (udává se hladinou akustického tlaku ve vzdálenosti 1 m při příkonu 1 VA) nebo, což je v praxi častější, dáváme např. dva výškové reproduktory proti jednomu hlubkovému. Výrobci již většinou na tuto možnost pamatují tím, že konstruují výškové reproduktory s impedancí dvojnásobnou (paralelně spojené reproduktory mají pak impedanci rovnou impedanci hlubkového reproduktoru) nebo poloviční (pro sériové spojení) než reproduktory hlubkové. Všechny reproduktory musí při např. kladném impulsu vyvolat výchylky membrán souhlasným směrem, tj. musí být stejně pólovány. Proto mají moderní reproduktory označen jeden z vývodů červenou tečkou; pak stačí při zapojování dbát, aby jeden z přívodů vedl na všechny označené vývody reproduktorů.



Obr. 17-50. Elektrická výhybka se směrnicí 12 dB/okt



Obr. 17-51. Elektrická výhybka pro třípásmovou reprodukci

pro $V_1 + V_2$ na V_1 a V_2 . Postup výpočtu je zřejmý z obr. 17-51, kde jednotlivé členy určujeme podobně jako vztahy (17-49, 50) z rovnosti reaktancí a odporů reproduktorů.

Takzvané koaxiální reproduktory jsou dvousystémové zařízení se samostatným reproduktorem pro hluboké a vysoké tóny. Pro svou poměrně vysokou cenu ztrácejí koaxiální reproduktory na významu.

Pro účinnější oddělení kmitočtů (není ale běžně zapotřebí) lze navrhnout výhybku se směrnicí 12 dB/okt podle obr. 17-50. U této výhybky nastává určité převýšení, závislé na činiteli Δ , jakosti celého rezonančního obvodu. Potřebné indukčnosti a kapacity v tomto případě určíme opět z rovnic (17-49, 50) a násobíme je těmito koeficienty: pro paralelní napájení reproduktorů násobíme L 1,41 \times a C 0,71 \times , pro sériové zapojení naopak.

Při třípásmové reprodukci můžeme postupovat podobně, uvažujeme-li v první fázi dělení na dva obvody H a $V_1 + V_2$, v další fázi znovu rozdělíme kmitočtové pásmo

17.3-6 Ozvučování

Pro ozvučení určitého prostoru vycházíme z požadované hladiny hlasitosti, která má být zaručena. Pro orientaci nám pomůže tento přehled potřebných hladin:

cvičiště, kina v přírodě, shromaždiště	74 dB
travnatá hřiště, sportovní stadióny, staniční haly	80 dB
nástupiště, městský rozhlas, velké stadióny, sportovní haly	84 dB
restaurace a zábavní podniky, malé dílny	86 dB
shromažďovací haly, restaurace a zábavní podniky,	92 dB
s vyšší úrovní hluku, tovární haly	97 dB
hlučné dílny a strojíny	97 dB

Při ozvučování volných prostranství je zapotřebí asi 2 až 5 mW na 1 m² plochy. Předpokládáme-li rovnoměrné rozložení sítě reproduktorů po celé ploše, je lépe určit potřebný elektrický příkon na 1 m² z obr. 17-52.

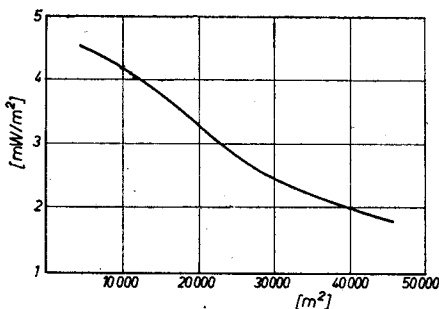
V uzavřených prostorách musíme pro určení potřebného výkonu uvažovat i pohltivost místnosti. V menších prostorách při jediném zářiči vyhovují pro rychlý výpočet empirické vzorce, ze kterých určíme potřebný elektrický příkon při předpokládané účinnosti reproduktorů 3 %:

$$P_{el} = k \sqrt[3]{O^2} \quad [W; m^3], \quad (17-51)$$

kde O je objem místnosti a k koeficient vyplývající z následujícího porovnání

druh signálu	očekávaná hlasitost dB	násobitel k
řeč	86	0,0125
lehká hudba	92	0,04
koncerty	97	0,125

Přesnější určení potřebného akustického výkonu při reproduktorech rovnoměrně rozložených určíme z obr. 17-53. Místo celkové pohltivosti A



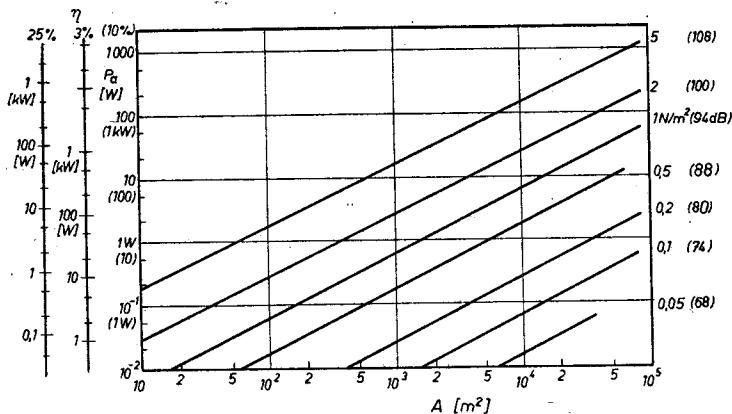
Obr. 17-52. Určení potřebného elektrického příkonu pro ozvučení volného prostranství

můžeme ze vztahu pro výpočet doby dozvuku

$$T_s = 0,164 \frac{O}{A} \quad [\text{s}; \text{m}^3; \text{m}^2] \quad (17-52)$$

použít známého objemu místnosti O a doby dozvuku T_s , kterou případně odhadneme (nejčastěji 1 s). Z takto stanoveného akustického příkonu určíme elektrický příkon podle účinnosti reproduktorů na pomocných stupnicích.

Při rovnoměrně rozložených reproduktorech v místnosti musíme také respektovat poloměr dozvuku. Ve vzdálenosti větší než poloměr dozvuku



Obr. 17-53. Určení potřebného akustického příkonu pro ozvučení místnosti (Potřebný elektrický příkon pro různé účinnosti reproduktorů na pomocných stupnicích)

by od některého z reproduktorů dostával posluchač i zvuky odražené s nepříjemným dozváním. To je na závadu dosažitelné srozumitelnosti. Proto nemají být reproduktory od sebe vzdáleny více než 2 r . Kulové zářiče, realizované např. reproduktorovou soustavou všesměrovou, mají $Q_r = 1$ a poloměr dozvuku v tomto případě je dán vztahem (17-34). Není-li $Q_r = 1$, pak určíme poloměr dozvuku ze vztahu

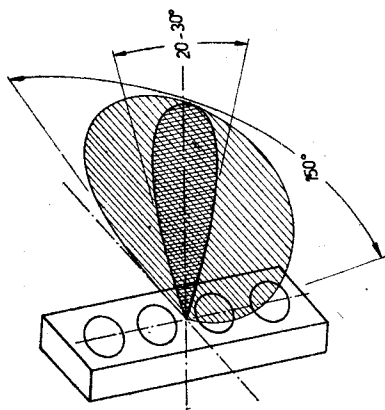
$$r_{\text{doz}} = k' \cdot \sqrt{A}, \quad (17-53)$$

kde pro běžné elektrodynamické reproduktory přímovyzářující $k' = 0,25$ a pro ostře směřované reproduktory tlakové, či pro reproduktorové sloupce vypočteme r_{doz} při $k' = 0,3$ až $0,5$.

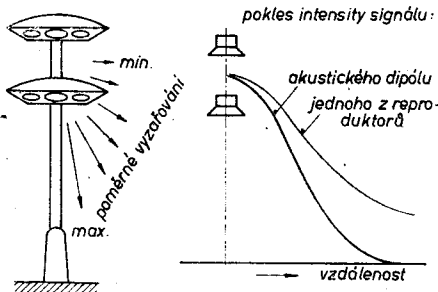
17.3-7 Směrové vyzařování

Spojování reproduktorů do soustav nepoužíváme jen pro dosažení lepšího kmitočtového přenosu, ale vhodným geometrickým rozložením reproduktorů určitým způsobem fázovaných můžeme dosáhnout i směrově řízeného vyzařování zvuku.

Směrové vlastnosti reproduktorů charakterizujeme poměrem Q_r , který udává, kolikrát je akustický tlak ve směru akustické osy (= v geometrické ose) větší než akustický tlak ideálního kulového zářiče se stejným akustic-



Obr. 17-54. Ve směru řazení reproduktorů je vyzařovaný zvukový paprsek reproduktorového sloupu zúžen



Obr. 17-55. Akustický dipól (soustavy napájeny v protifázi)

kým výkonem (někdy je nazýván směrový zesilovací činitel). Podobně lze vyjádřit činitelem směrovosti γ (nebo činitelem osové koncentrace), kolikrát menší výkon reproduktor potřebuje vyzařit, aby v určité vzdálenosti dosáhl stejného akustického tlaku jako ideální kulový zářič napájený stejným výkonem. Platí zde vztah

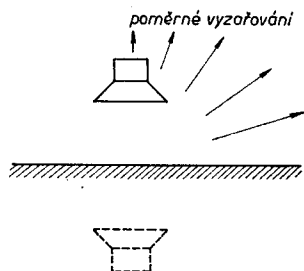
$$\frac{p}{p_k} = Q_r = \sqrt{\gamma} \quad (17-54)$$

Běžné reproduktory s kuželovou membránou mají činitel směrovosti roven asi 3, speciální směrové soustavy (reproduktorové sloupky) dosahují až 10.

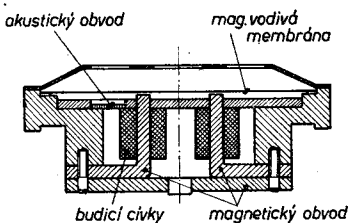
Svazkování vyšších kmitočtů naznačené pro jedinou pístově kmitající soustavu (obr. 17-43) můžeme využít u uspořádání řady reproduktorů zvané reproduktorový sloup. V obr. 17-54 je naznačeno, že svazkování nastává do roviny kolmé na osu reproduktorového sloupu. Všechny reproduktory řady musí být napájeny ve fázi a musí mít mezi sebou stejné rozteče.

Podobně působí i štěrbinové zvukovody, kde opět platí: ve směru, ve kterém se zvukovod rozvírá, je zvukový paprsek zúžen.

Pro ozvučování volných prostranství (i velkých sálů) je vhodný tzv. akustický dipól (obr. 17-55), kde dva zářiče kmitající v protifázi odevzdávají signál převážně ve směru spojnice obou zářičů. Tím se dosáhne rychlého poklesu akustického tlaku a reprodukce není rušena směřováním signálů od vzdálenějších zářičů. Opakem je uspořádání podle obr. 17-56, jestliže oba zářiče kmitají ve fázi; ve směru spojnice obou zářičů je pak nejnižší odevzdávaný výkon, v rovině uprostřed mezi nimi maximální.



Obr. 17-56. Soustava dvou zářičů kmitajících ve fázi (stejný účinek při akusticky tuhé stěně v poloviční vzdálenosti)



Obr. 17-57. Telefonní sluchátka

Pro protězy pro nedoslýchavé a k tranzistorovým přijímačům se vyrábějí miniaturní sluchátka vkládaná přímo do ušního zvukovodu speciální zátkou. I tato sluchátka jsou většinou s měničem elektromagnetickým (zde je akustická citlivost nižší — pro 1 Nm^{-2} asi $3 \cdot 10^{-4} \text{ W}$). Méně výhodná jsou sluchátka piezoelektrická.

Pro kvalitní poslech sluchátka jsou určena elektrodynamická náhlavní sluchátka, zaručující přenos celého akustického pásma při nerovnoměrnosti frekvenční charakteristiky $\pm 3,5 \text{ dB}$, odevzdávající poslechovou hlasitost asi 94 dB při příkonu $4 \cdot 10^{-5} \text{ W}$. Tato sluchátka jsou většinou v provedení stereo, tj. každé ze sluchátek dostává samostatný signál.

17.4 SLUCHÁTKA

Pro osobní poslech jsou jako akustické zářiče určena sluchátka. Nejčastěji se setkáváme se sluchátky v telefonii, kde jsou takřka výhradně řešena na elektromagnetickém principu (obr. 17-57). Jsou určena pro přenos pásma 300 až 4000 Hz a jejich frekvenční charakteristiky vykazují nerovnoměrnost asi $\pm 8 \text{ dB}$. U normálních telefonních sluchátek je impedance u 1 kHz asi 600Ω (stejnoseměrný odpor asi 50Ω). U těchto sluchátek se předpokládá, že pracují přímo do zvukovodu ucha, tj. do vzduchového objemu několika cm^3 ; pak pro vybudění akustického tlaku potřebného pro hlasitý poslech (94 dB , což odpovídá 1 Nm^{-2}) dostačuje příkon asi $2 \cdot 10^{-5} \text{ W}$.

17.5 SPECIÁLNÍ ELEKTROMECHANICKÉ MĚNIČE

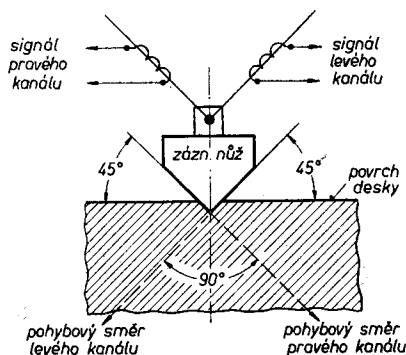
Všechny měniče využívají týchž fyzikálních principů, které byly popsány v části 17.1, a mají pouze speciálně uzpůsobené výstupy a vstupy. Využitím těchto principů lze navrhnout převodníky různých fyzikálních veličin na elektrický signál nebo elektrickým signálem budit měnič určitých vlastností.

V tomto užším zaměření jsou nejdůležitější budiče a snímače chvění. Tak např. rycí přenoska pro rytí gramofonového záznamu (obr. 17-58) je vlastně budičem chvění a gramofonové přenosky (kap. 18) jsou snímače chvění. Rycí gramofonové hlavy byly pro jednokanálový záznam takřka výhradně elektromagnetické, pro stereo se využívá s ohledem na potřebnou kvalitu systémů elektrodynamických.

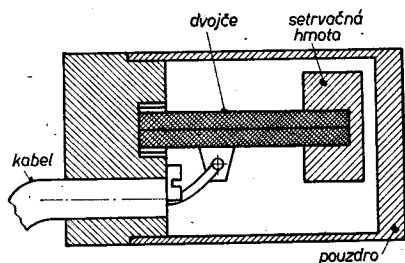
Snímače chvění pro měření zrychlení, rychlosti či výchylky mechanického kmitání musí být co nejlehčí, aby měřený objekt nezatěžovaly, a proto se u nich s výhodou využívá měniče piezoelektrického. Vysoce citlivé jsou měniče s ohybovými dvojčaty (obr. 17-59); přímo na dvojče je upevněno závažíčko, které svou setrvačnou hmotou namáhá dvojče pevně upnuté do pouzdra, snímajícího dotykem chvění měřené části. Pro vysoké hodnoty zrychlení by mechanické namáhání dvojčat překročilo mez pevnosti piezoelektrického materiálu, a proto se používá piezoelektrických výbrusů namáhaných na tlak (obr. 17-60). Setrvačná hmota vyvolává tlakové změny, které převádí piezoelektrický materiál na elektrická napětí. U obou typů snímačů je výstupní napětí měniče úměrné zrychlení, a chceme-li zjistit rychlost v nebo výchylku y kmitání, využijeme toho, že jsou spolu vázány vztahy

$$a = A \cdot \sin \omega t,$$

(17-55)



Obr. 17-58. Stereofonní rycí hlava pro gramofonový záznam (budičí měniče pouze naznačeny)

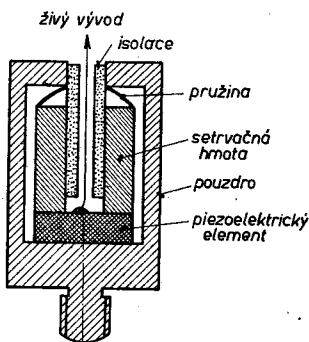


Obr. 17-59. Piezoelektrický akcelerační snímač s ohybovým dvojčatem

$$v = \int_0^t a \cdot dt = -\frac{A}{\omega} \cos \omega t, \quad (17-56)$$

$$y = \int_0^t dt \int_0^t a \cdot dt = \int_0^t v \cdot dt = -\frac{A}{\omega^2} \sin \omega t. \quad (17-57)$$

Nepotřebujeme-li respektovat fázi signálu, můžeme vztahy upravit na



$$v = \frac{a}{\omega}, \quad (17-58)$$

$$y = \frac{v}{\omega} = \frac{a}{\omega^2}. \quad (17-59)$$

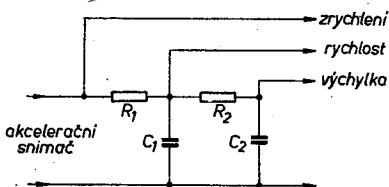
Potřebnou integraci můžeme zajistit obvodem na obr. 17-61 při vhodně volených konstantách; volíme-li např. časové konstanty $\tau = R \cdot C$ obvodů tak, aby kritický kmitočet článků byl 15,9 Hz, pak

$$v = \frac{a}{\omega} = \frac{a}{2\pi \cdot 15,9} = \frac{1}{100}, \quad (17-60)$$

podobně

$$y = \frac{v}{100} = \frac{a}{10\,000}. \quad (17-61)$$

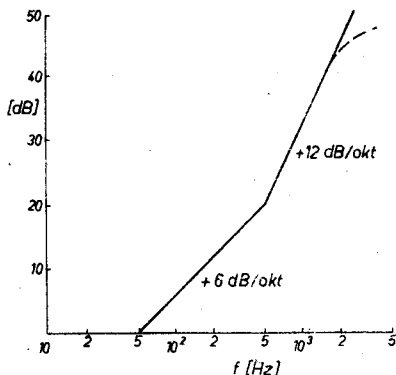
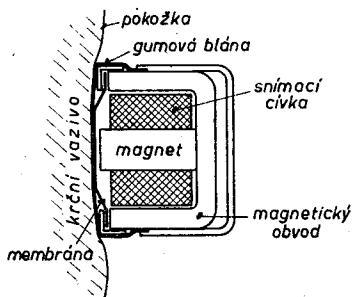
Obr. 17-60. Akcelerační snímač s tlakově namáhaným piezoelektrickým výbrusem



Obr. 17-61. Dvojnásobný integrační obvod pro akcelerační snímače

Ve spojové službě jsou důležité tzv. hrdelní mikrofony (obr. 17-62). Jsou to vlastně opět snímače chvění, neboť snímají chvění pronikající při řeči z hrdla tkání krku. Používají se proto, aby nebyl signál chťený — řeč operátora — rušen cizími zvuky. Při přenosu signálu přes tkáň krku nastává značný útlum vysokých kmitočetů; u hlubokých kmitočetů až asi do 500 Hz je pokles asi 6 dB/okt, nad 500 Hz se směrnice asi 12 dB/okt. Toto frekvenční ovlivnění přenášené řeči by vedlo k naprosté nesrozumitelnosti, a proto je nutná kmitočtová korekce v zesilovací cestě, není-li nějakým způsobem

upraven kmitočtový průběh hrdelního mikrofону samého (obr. 17-63). Ani s těmito opatřeními není výsledná srozumitelnost vysoká. Značně rozšířené byly uhlíkové (odporové) hrdelní mikrofóny; řešení elektromagnetických a piezoelektrických hrdelních mikrofónů dává lepší výsledky.



Obr. 17-62. Příklad konstrukce hrdelního mikrofónu

Obr. 17-63. Kmitočtová korekce zesilovací cesty pro hrdelní mikrofóny

SEZNAM LITERATURY

- [1] *Merhaut a kol.*: Příručka elektroakustiky. SNTL, Praha 1964
- [2] *Boleslav A.*: Mikrofóny a přenosky. SNTL, Praha 1962
- [3] *Felix J.*: Rádce pracovníka se zvukem. SNTL, Praha 1965
- [4] *Smetana, Kovařík*: Korektory. SNTL, Praha 1965
- [5] *Merhaut J.*: Teorie elektroakustických přístrojů I., NČSAV, Praha 1955
- [6] *Boleslav A.*: Reproduktoři a ozvučnice. SNTL, Praha 1957
- [7] *Lukeš J.*: Věrný zvuk. SNTL, Praha 1962