

Základní kritéria pro návrh výhybek

RNDr. Bohumil SÝKORA,
Výzkumný ústav rozhlasu a televize, Praha

621.395.623.8

Úvod

Úkolem výhybky v reproduktorové soustavě je rozdělit pásmo akustických kmitočtů do několika dílčích pásem tak, aby tato pásma mohla být optimálně zpracována příslušnými elektroakustickými měniči (reproduktory). Můžeme rozlišovat dvě skupiny výhybek podle toho, zdali se toto dělení provádí na výkonové nebo nevýkonové úrovni signálu. V prvním případě se do výstupní cesty výkonového zesilovače zařazují vhodné pasivní filtry s přenosovými charakteristikami volenými tak, aby realizovaly požadované rozdělení akustického pásma kmitočtů. V druhém případě se takové filtry zařazují ještě před konečným výkonovým zesílením a jejich výstupní napětí se pak zpracovávají oddělenými výkonovými zesilovači. V prvním případě se výhybka označuje jako pasivní, v druhém pak jako elektronická nebo aktivní, neboť filtry ve výhybce jsou obvykle realizovány aktivními obvody (není to však podmínkou).

Základním kritériem pro návrh výhybky je požadavek rovné výsledné amplitudové charakteristiky reproduktorové soustavy. To v obvyklém smyslu znamená, že pokud jsou v soustavě použity měniče s amplitudovou charakteristikou rovnou v pracovním pásmu, měla by být výsledná charakteristika soustavy, daná jako poměr mezi výstupním akustickým tlakem a vstupním napětím soustavy (harmonického průběhu) v závislosti na kmitočtu, pokud možno co nejméně proměnná pro

kmitočty akustického pásma. Tento požadavek je možné s kvalitními měniči splnit s poměrně dobrou přesností, pokud sledujeme akustický tlak v jediném bodě akustického pole vytvořeného soustavou v podmínkách volného šíření zvuku (ve volném prostoru), přičemž poloha tohoto bodu se zpravidla pro danou soustavu definuje v technických podmínkách a nachází se obvykle na ose vysokotónového měniče ve vzdálenosti jednoho metru od čelní plochy soustavy, případně roviny proložené vnějším okrajem membrány měniče (ve složitějších případech se specifikuje detailně). V reálných poslechových podmínkách však amplitudová charakteristika akustického tlaku nemusí mít rozhodující význam pro výslednou kvalitu soustavy. V důsledku odrazů od stěn poslechového prostoru je totiž přenos zvukové energie od soustavy k místu poslechu určen — pokud jde o závislost na soustavě — spíše vyzářeným výkonem čili výkonovou charakteristikou, případně kmitočtovou závislostí indexu směrovosti, který je pro každý kmitočet určen prostorovou směrovou charakteristikou soustavy. Proto je nutné u výhybek sledovat také jejich vliv na výsledný vyzářený výkon, případně na směrovou charakteristiku soustavy. Kromě uvedených charakteristik je dále účelné sledovat fázovou charakteristiku soustavy. Není sice zcela jasné, jak dalece je fázová charakteristika důležitá z hlediska kvality reprodukce zvuku, ale relevance fázového zkreslení pro sluchový vjem je v podstatě prokázána (lit. [1]; [2]).

SITK BRATISLAVA

K — 1984 Ev. 24222

Realizační kritéria

Splnění uvedených kritérií není možné posoudit pouze na základě rozboru vlastností výhybky jako elektrického obvodu, neboť na výsledné vlastnosti soustavy mohou mít (a zpravidla mají) významný — ne-li rozhodující — vliv vlastnosti měničů a zejména jejich prostorové rozložení.

Je však možné stanovit několik podmínek pro elektrické přenosové funkce výhybky, které lze považovat za nutné podmínky. Pro jednoduchost uvažujeme výhybku dvoupásmovou, přičemž předpokládáme, že účinnosti a standardní citlivosti měničů (resp. kaskády výkonový zesilovač — měnič v případě aktivní výhybky) v obou pásmech jsou shodné. Přenosové funkce dolnoprostopustné resp. hornoprostopustné větve výhybky označíme $L(p)$, resp. $H(p)$. Dosud formulované požadavky je možno vyjádřit pomocí následujících vztahů:

1. Konstantní akustický tlak.

Tato podmínka odpovídá požadavku konstantního modulu součtu napětí v obou větvích, čili

$$|L(j\omega) + H(j\omega)| = 1 \quad (1)$$

2. Konstantní akustický výkon.

Tuto podmínku lze splnit tehdy, jestliže bude konstantní součet kvadrátů modulů napětí neboli

$$|L(j\omega)|^2 + |H(j\omega)|^2 = 1 \quad (2)$$

3. Minimální fázové zkreslení.

Fázové zkreslení bude minimální, jestliže fázový posun bude přímo úměrný kmitočtu. Pak bude totiž konstantní skupinové i fázové zpoždění a disperze bude nulová. To lze vyjádřit vztahem

$$\frac{L(j\omega) + H(j\omega)}{|L(j\omega) + H(j\omega)|} = \exp(j\omega\tau_0) \quad (3)$$

4. V literatuře ([3]; [4]) se dále uvádí dílčí podmínka pro fázové charakteristiky. Má-li totiž být směrová charakteristika soustavy, skládající se ze dvou oddělených (nekoincidentních čili nesoumísných) měničů, symetrická podle osy soustavy v rovině proložené měniči (obvykle se tato rovina označuje jako vertikální), musí být fázový rozdíl mezi napětími v obou větvích roven cellstvému násobku 180° .

Současné splnění všech uvedených podmínek není možné. Naštěstí to ani není nutné, neboť existuje situace, kdy konstantnost akustického výkonu nevyplývá z podmínky 2. Je to tehdy, jestliže vzdálenosti měničů a jejich rozměry jsou menší než čtvrtina vlnové délky vyzařovaného zvuku. Pak dochází k vzájemnému ovlivňování měničů takového druhu, že se mění vyzařovací odpor a tím účinnost měničů a akustický výkon je v důsledku toho dán dru-

hou mocninou modulu součtu napětí, takže podmínka konstantního výkonu nabývá tvaru

$$|L(j\omega) + H(j\omega)|^2 = 1 \quad (4)$$

což je ekvivalentní podmínce 1, resp. vztahu (1).

Praktická splnitelnost předpokladu malé vzdálenosti je ovšem omezena použitelnými rozměry měničů. Např. pro hlubokotónový reproduktor o průměru 205 mm a středotónový o průměru 135 mm je minimální vzdálenost středů 170 mm a odpovídající kmitočet přibližně 504 Hz, což je pak vlastně horní hranice pro dělicí kmitočet výhybky takovéto soustavy.

Podmínka minimálního fázového zkreslení bývá někdy zesílena na podmínku nulové fáze či konstantního napětí, vyjádřenou vztahem

$$L(p) + H(p) = 1 \quad (5)$$

což je vlastně také speciální případ splnění vztahu (1) resp. (4).

Pro výhybky, které nespĺňují podmínku minimálního fázového zkreslení, je zpravidla alespoň teoreticky možné provést fázovací články korekci fázové charakteristiky tak, aby s požadovanou přesností splňovala vztah (3). Příslušné obvody jsou značně složité, ale v podstatě lze tuto podmínku považovat za splnitelnou nezávisle na podmínkách 1. a 2.

Přehled prakticky významných řešení výhybek

a) *Výhybky s přenosovou funkcí Butterworthova typu.* Tyto výhybky mají přenosové funkce $L(p)$ i $H(p)$ Butt. typu, tedy s maximálně plochou amplitudovou charakteristikou. Je-li přenosová funkce lichého řádu, splňují současně podmínku 1 i 2, nespĺňují podmínku 3 (s výjimkou funkce 1. řádu) ani 4. Funkce sudého řádu splňují pouze podmínku 2 a 4. Jak uvádí lit. [5], jsou výhybky Butt. typu lichého řádu jediným řešením, splňujícím současně 1. a 2. podmínku. Jsou tedy vhodné tam, kde není možné dodržet patřičné fázové vztahy mezi měniči např. z důvodů jejich prostorové odlehlosti, a symetrie směrové charakteristiky není (a v případě prostorové odlehlosti ani nemůže být) kritická. Výhybky sudého řádu vykazují na součtové tlakové charakteristice převýšení 3 dB, které se ovšem ve výkonu projevuje pouze tehdy, jsou-li měniče tak blízko u sebe, aby se mohly uplatnit změny vyzařovacího odporu.

b) *Výhybky typu Linkwitz-Riley* [lit. [3]]. Tyto výhybky mají přenosové funkce dány jako druhé mocniny funkcí Butt. typu. Splňují podmínky 1 a 4. Na výkonové charakteristice podle (2) je pro dělicí kmitočet pokles 3 dB, který se z důvodu vzrůstu vyzařovacích odporů neuplatní, jsou-li měniče dostatečně blízko sebe. Jsou tedy vhodné zejména pro případ nízkého dělicího kmitočtu, kde má současně

význam sledovat symetrii směrové charakteristiky.

c) *Výhybky s konstantním napětím*

Výhybky tohoto typu jsou konstruovány tak, aby splňovaly vztah (4). Jejich výhodou je, že k přenosové funkci jedné větve je možno doplňkovou funkcí obvodově realizovat jednoduchým rozdílovým obvodem. V lit. [6] se uvádí metoda realizace takové přenosové charakteristiky pomocí přídavného měniče. Výhybky splňují podmínku 1 a 3, nesplňují 2. ani 4. Konstantního součtu tlaků, který by měl vyplývat z konstantního součtu napětí, je dosaženo pouze v té oblasti prostoru, kde se neuplatní přídavné fázové posuvy způsobené různými vzdálenostmi od měničů. Jak se uvádí v lit. [3], [4], mají velmi nevýhodné vlastnosti pokud jde o směrové charakteristiky.

Dvojice příslušných přenosových funkcí se vytvoří jednoduše tak, aby platilo

$$L(p) = \frac{A(p)}{Q(p)} \quad H(p) = \frac{B(p)}{Q(p)} \quad (6a, b)$$

$$A(p) + B(p) = Q(p) \quad (6c)$$

čili vlastně „rozdělením“ jedničky na dvě části podle jistého polynomu $Q(p)$. Je-li např. $Q(p)$ Butterworthův polynom 3. řádu, dostáváme v jedné variantě

$$L(p) = \frac{1}{1 + 2p + 2p^2 + p^3}$$

$$H(p) = \frac{2p + 2p^2 + p^3}{1 + 2p + 2p^2 + p^3} \quad (7 a, b)$$

v jiné variantě

$$L(p) = \frac{1 + 2p}{1 + 2p + 2p^2 + p^3}$$

$$H(p) = \frac{2p^2 + p^3}{1 + 2p + 2p^2 + p^3} \quad (8a, b)$$

Nevýhodou těchto dvojic funkcí je jednak převýšení výkonové charakteristiky podle (2), které se uplatní při odlehklých měničích a které činí v případě (8a, b) téměř 7 dB, jednak převýšení na amplitudových charakteristikách jednotlivých větví, které činí v témže případě přibližně 4,5 dB a představuje značné nároky na zvýšení příkonu proti kmitočtům mimo oblast dělení, přičemž tento přídavný příkon se ztrácí v důsledku nevhodných fázových poměrů mezi měniči a z toho vyplývajícího odečítání tlaků a poklesu vyzařovacích odporů. Proto se pro tento typ výhybek zpravidla volí jiný typ jmenovatele (s „větším tlumením“), což však má za následek zhoršení strmosti charakteristik v oblasti dělicího kmitočtu. Vcelku není tento typ výhybek příliš výhodný.

d) *Výhybky s konstantním zpožděním* (podle Lipshitz a Vanderkooye, lit. [4])

Pro realizaci těchto výhybek se užívá podobného principu jako pro výhybky skupiny c), totiž odečítání jedné přenosové funkce, zde však nikoli od jedničky, nýbrž od přenosové funkce vyjadřující konstantní skupinové zpoždění podle vztahů

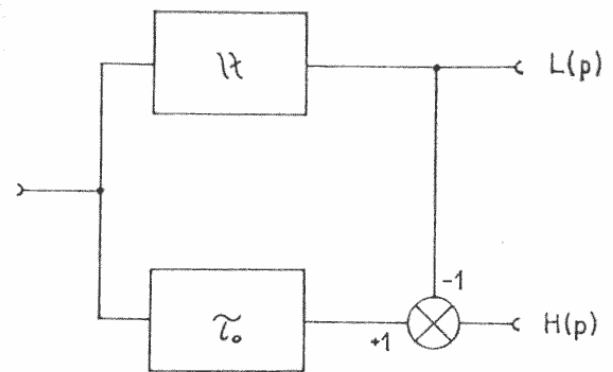
$$D(j\omega) = \exp(j\omega \tau_0) \quad (9)$$

$$H(j\omega) = D(j\omega) - L(j\omega) \quad (10)$$

Jestliže se volí τ_0 tak, aby platilo

$$\tau_0 = -\lim_{\omega \rightarrow 0^+} \frac{d}{d\omega} \arctg \frac{\text{Im}(L(j\omega))}{\text{Re}(L(j\omega))} \quad (11)$$

čili τ_0 je rovno skupinovému zpoždění funkce $L(j\omega)$ pro nulový kmitočet, je možno vlastnosti $H(j\omega)$ považovat za optimální. Podrobný rozbor je podán v práci [4]. Výhybku je možno realizovat podle blokového schématu na obr. 1. Výhybka splňuje podmínku 1 a 3 a při vhodné volbě výchozí funkce $L(p)$ také podmínku 4.



Obr. 1 — Uspořádání výhybky s konstantním zpožděním (Lipshitz-Vanderkooy)

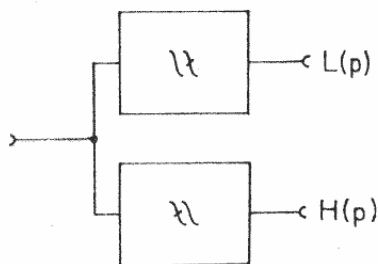
Podmínka 2. splněna není, konstantnost výkonu je vázána na zabezpečení předpokladu malé vzdálenosti měničů. Nevýhodou této skupiny výhybek je nutnost použití zpožďovací linky, která značně zvyšuje realizační náklady.

Obvodová realizace aktivních výhybek

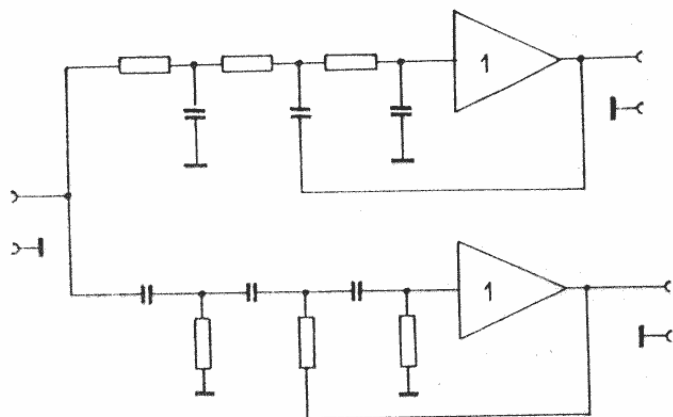
V literatuře je uvedeno mnoho příkladů obvodů, vhodných pro konstrukci aktivních výhybek (např. [7]). Uvedeme zde jen některá prakticky významná řešení.

Principiálně nejjednodušší provedení je naznačeno na obr. 2a. Výhybka se skládá ze dvou nezávislých filtrů požadovaných vlastností. Pro konkrétní realizaci filtrů je možno použít například obvodů typu Sallen-Kaye, jak ukazuje pro výhybku 3. řádu obr. 2b. Tento způsob realizace je vhodný pro výhybky Butterworthova nebo Linkwitz-Rileyova typu. Zajímavé řešení výhybky vychází z tzv. bikvadratického filtru (obr. 3). Výhybka druhého řádu je vytvořena složenou sítí zpětné vazby a třemi operačními zesilovači. Výhodné je, že dě-

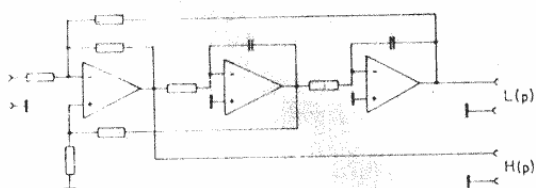
licí kmitočet je určen minimálním možným počtem kmitočtově závislých obvodových veličin, což je konstrukčně významné při návrhu výhybek s proměnným dělicím kmitočtem. Typ přenosové funkce se určí vhodnou volbou odporů zpětnovazební sítě. Modifikace tohoto řešení pro přenosové funkce 3. řádu je na obr. 4. Nevýhodou těchto řešení je potřeba většího počtu operačních zesilovačů, což však již v současné době není příliš podstatné. Kompromisní řešení výhybek 3. řádu je popsáno v lit. [8].



Obr. 2a — Uspořádání výhybky s dvěma nezávislými filtry



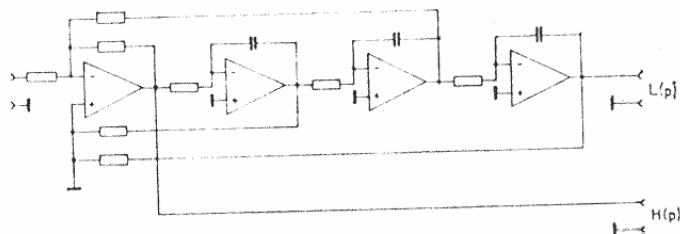
Obr. 2b — Uspořádání výhybky podle obr. 2a s filtry typu Sallen-Kay



Obr. 3 — Řešení výhybky 2. řádu s bikvadratickým filtrem

Závěr

Uvedli jsme základní informace o konstrukci výhybek, realizační kritéria a konstrukční řešení. Je nutné mít na paměti, že konečné vlastnosti reproduktorové soustavy velmi závisí také na obvykle méně známých vlastnostech měničů, např. na jejich fázové charakteristice [9] a na jejich prostorovém uspořádání. Volba typu výhybky závisí i na možnostech konstrukce ozvučnice, např. z hlediska fázového vyrovnání. Z praktického hlediska nejmenší chyby se dopustíme volbou výhybek s konstantním výkonem podle (2), tedy Butterworthova typu lichého řádu, i když jiná řešení mohou být v některých konkrétních případech výhodnější. Definitivní rozhodnutí o volbě, případně



Obr. 4 — Řešení výhybky 3. řádu zobecněným bikvadratickým filtrem

nastavení výhybky lze provést teprve na základě akustického měření realizované reproduktorové soustavy.

Literatura

- [1] Preis D.: Phase Distortion and Phase Equalization in Audio Signal Processing. JAES 30 (1982) 774—794 (Nov.)
- [2] Lipshitz S. P., Pockock M., Vanderkooy J.: On the Audibility of Midrange Phase Distortion in Audio Systems. JAES 30 (1982) 580—595 (Sept.)
- [3] Linkwitz S. H.: Active Crossover Networks for Noncoincident Drivers. JAES 24 (1976) 2—8 (Jan./Feb.)
- [4] Lipshitz S. P., Vanderkooy J.: A Family of Linear-Phase Crossover Networks of High Slope Derived by Time Delay. JAES 31 (1983) 2—19 (Jan./Feb.)
- [5] Thiele A. N.: Optimum Passive Loudspeaker Dividing Networks. Proc. of the IREE 36 (1975) 220—224 (July)
- [6] Bækgaard E.: A Novel Approach to Linear Phase Loudspeakers Using Passive Crossover Networks. JAES 25 (1977) 284—294 (May)
- [7] Ashley R. J., Kaminsky A. L.: Active and Passive Filters as Loudspeaker Crossover Networks. JAES 19 (1971) 494—501 (June)
- [8] Sýkora B.: Malý poslechový monitor. Výzk. zpráva VÚRT P-1414
- [9] Leach W. M.: Loudspeaker Driver Phase Response: The Neglected Factor in Crossover Network Design. JAES 28 (1980) 410—421 (June)

Основные критерии для разработки разделительных фильтров. — В статье приводятся основные критерии для разработки разделительных фильтров, предназначенных для шкафов прослушивания. Так как нельзя все критерии соблюсти одновременно, то фильтры разделяют до нескольких групп в зависимости от того, какие требования выполняются. Обсуждаются свойства фильтров и пригодность их использования при различных вариантах составления громкоговорителей. В заключение приведены некоторые примеры схем разделительных фильтров.

Die Grundkriterien für den Entwurf der Lautsprecher-trennglieder. — Im Artikel werden die Grundkriterien für den Entwurf der Lautsprechertrennglieder angeführt. Mit Hinsicht zur Tatsache, dass alle Kriterien gleichzeitig nicht erfüllbar sind, werden die Trennglieder in einige Gruppen zergliedert und zwar nach Anforderungen, welche sie erfüllen. Es werden die Eigenschaften der Trennglieder diskutiert und die Zweckmäßigkeit der Applikation für verschiedene Anordnungen der elektroakustischen Wandler. Zum Schluss werden einige Schaltungsbeispiele der elektronischen Trennglieder (Weichen) angeführt.

Basic criteria for crossover network design. — The article presents basic criteria for crossover network design of loudspeaker systems. Not being possible to meet all criteria at the same time the networks are divided into several groups according to the requirements they fulfill. Their features and availability for different loudspeaker layouts are discussed. At the end some examples of electronic crossover networks are given.