

strmostí 24 dB na oktavu, bude korekce proveditelná pouze s tím, že nad jistou hraniční frekvencí se strmost amplitudové charakteristiky příslušného elektrického obvodu bude blížit nule. Pokud by výhybka měla menší cílovou elektroakustickou strmost, nebude již korekce proveditelná anebo bude proveditelná pouze v omezeném kmitočtovém pásmu.

Praxe je taková, že o úplnou korekci v takových případech není usilováno - provádí se pouze částečná korekce nižšího stupně, než jaký by byl potřebný pro korekci úplnou. Postup je pak obdobný jako v případě korekce na přenosovou charakteristiku reproduktoru v oblasti nízkých kmitočtů, pouze s tím rozdílem, že korigujeme přenosovou funkci dělicího filtru typu dolní propust a to, co je zapotřebí „odkorigovat“, je chybová přenosová funkce typu dolní propust nejspíše druhého stupně.

Cílová přenosová funkce dělicího filtru má tvar (ω_0 je stále dělicí frekvence):

$$L(s) = 1/[1 + p_1 s/\omega_0 + p_2 (s/\omega_0)^2 + \dots + (s/\omega_0)^n]. \quad (56)$$

Chybovou funkci (poměr mezi přenosem reálného měniče a přenosem ideálního měniče) můžeme vyjádřit obdobně jako v (51):

$$P(s) = 1/[1 + (s/Q_h \omega_h) + (s/\omega_h)^2]. \quad (57)$$

Korigovaná přenosová funkce bude mít tvar:

$$L_K(s) = [1 + (s/Q_h \omega_h) + (s/\omega_h)^2]/[1 + p_1 s/\omega_0 + p_2 (s/\omega_0)^2 + \dots + (s/\omega_0)^n] \quad (58a)$$

a bude ji opět možné psát jako součet tří dílčích přenosových funkcí:

$$L_{K1}(s) = 1/[1 + p_1 s/\omega_0 + p_2 (s/\omega_0)^2 + \dots + (s/\omega_0)^n] \quad (58b)$$

$$L_{K2}(s) = (s/\omega_0) [\omega_0/(Q_h \omega_h)]/[1 + p_1 s/\omega_0 + p_2 (s/\omega_0)^2 + \dots + (s/\omega_0)^n] \quad (58c)$$

$$L_{K3}(s) = (s/\omega_0)^2 (\omega_0/\omega_h)^2/[1 + p_1 s/\omega_0 + p_2 (s/\omega_0)^2 + \dots + (s/\omega_0)^n]. \quad (58d)$$

Vyjádření dílčích přenosových funkcí podle (58c, d) může při bližší prohlídce vypadat zbytečně složité. Je opodstatněné tím, že zde - stejně jako v předchozích vztazích počínaje (52) - se komplexní frekvence s objevuje vždy jako součást zlomku s/ω_0 , což znamená, že všechny přenosové funkce jsou vlastně vztaženy k dělicí frekvenci (jsou funkcemi „poměrné komplexní frekvence“ s/ω_0). To se později ukáže být velice výhodným.

9.2. Kompenzace zpoždění reproduktorů

Dříve nežli se začneme zabývat problémem kompenzace zpoždění reproduktorů, musíme si nejprve ujasnit,

oč se jedná, když hovoříme o zpoždění reproduktorů. Nemusí to totiž být tak docela jednoduché.

Jednoduchá situace nastává, když jde o zpoždění, vznikající rozdíly v geometrickém uspořádání reproduktorů (viz obr. 47). Sledujme situaci z hlediska polohy zdrojů zvuku promítnuté do osy poslechu (tj. kolmice k čelní stěně ozvučnice vedená referenčním bodem, který leží na této stěně a jehož poloha je udána výrobcem - obvykle leží na ose vysokotónového reproduktoru nebo uprostřed spojnice středů vysokotónového reproduktoru a reproduktoru nejbližší nižšího pásma). Potom vzdálenost spodního reproduktoru (resp. vzdálenost jemu příslušejícího bodu, z něhož jakoby vycházel signál) od místa poslechu je o Δl větší než vzdálenost horního reproduktoru (předpokládáme, že poslechová vzdálenost je podstatně větší než rozteč reproduktorů, jinak bychom museli při stanovení rozdílu vzdálenosti počítat s tím, že paprsky spojující středy reproduktorů s poslechovým bodem nejsou rovnoběžné a vzdálenosti by bylo nutné počítat s použitím Pythagorovy věty).

Signál spodního reproduktoru bude opožděn o $\Delta t = \Delta l/c_0$ oproti signálu horního reproduktoru a fáze signálu spodního reproduktoru se posune o úhel $\Delta \varphi = -\Delta t \cdot \omega$.

Pokud budeme chtít dát fázové poměry na poslechové ose do pořádku, aniž bychom měnili polohy reproduktorů, budeme muset do cesty horního reproduktoru zavést stejné přidavné fázové zpoždění elektrickou cestou. Poznamenejme jen, že tento postup není ekvivalentní úpravě geometrického uspořádání reproduktorů, z důvodů přehlednosti však případné promyšlení, v čem je rozdíl, ponecháváme na čtenáři.

Fázové zpoždění způsobené geometrií uspořádání měničů není jediná chyba ve fázových charakteristikách, kterou je potřebné kompenzovat. Už jsme si řekli, že reproduktory mají vlastní přenosovou charakteristiku vykazující frekvenční závislost. Z této frekvenční závislosti vyplývá jednak frekvenční závislost amplitudy přenosu, jednak frekvenční závislost fáze přenosu.

Pokud by se podařilo při konstrukci výhybky zavést korekce, které by frekvenční závislost přenosu reproduktorů plně kompenzovaly, nebylo by nutné žádné další korekce provádět (samozřejmě kromě korekce na geometrii). To se nám ale zpravidla nepodaří, a to přinejmenším proto, že v oblasti horní mezní frekvence reproduktoru je pokles amplitudy přenosu příliš strmý, než aby bylo možné jej kompenzovat v plném rozsahu. S tím související frekvenční závislost fáze pak vede k tomu, že signál vyzářený měničem vykazuje změnu, mající přinejmenším do jisté míry charakter časového zpoždění.

K podrobnějšímu popisu takového chování (které je samozřejmě možné opět popsat patřičnou přenosovou funkcí) se v teorii obvodů zavádí veliči-

na zvaná skupinové zpoždění. To je definováno jako záporně vzatá hodnota první derivace fázového posuvu podle (kruhové) frekvence. Fázový posuv je z přenosové funkce ve tvaru (17b) odvozen ve vztahu (21). Skupinové zpoždění pak je definováno vztahem:

$$\tau(\omega) = -d(\varphi(\omega))/d\omega. \quad (59)$$

Nebudeme se zabývat výkladem podrobností souvisejících s definicí a chováním skupinového zpoždění, uvedeme si jen jeden elementární případ. Je-li fázový posuv způsoben prostým časovým zpožděním $\Delta t = \Delta l/c_0$ na vzdálenosti Δl při rychlosti šíření zvuku c_0 , pak odpovídající fázová charakteristika bude mít tvar:

$$\varphi(\omega) = -\omega \Delta l/c_0. \quad (60)$$

Dosazením $\varphi(\omega)$ z (60) do (59) a provedením příslušných matematických operací dostaneme, že v tomto konkrétním případě:

$$\tau(\omega) = \Delta l/c_0 = \Delta t, \quad (61)$$

takže skupinové zpoždění je frekvenčně nezávislé a rovné skutečnému časovému zpoždění signálu.

Skupinové zpoždění je vlastností přenosového systému a stojí za zmínku, že pro přenosový systém se soustředěnými parametry a rozměry malými oproti elektromagnetické vlnové délce zpracovávaných signálů nad jistou frekvencí vždy klesá k nule (takže signál „nekonečné frekvence“ je vždy přenášen bez zpoždění).

Skupinové zpoždění se zavádí proto, že z jeho frekvenční závislosti je do jisté míry možné vyčíst, jak se bude přenosový systém chovat z hlediska přenosu neharmonických popř. neperiodických signálů, tedy takových, u kterých by se na základě jejich Fourierova obrazu dalo soudit, že jsou dány jako součet většího (popř. až nekonečného) počtu harmonických složek.

Frekvenční nezávislost skupinového zpoždění znamená, že časové vztahy mezi složkami různých frekvencí zůstávají zachovány nezávisle na frekvenci (všechny složky jsou zpožděny stejně) a žádné zkreslení časového průběhu signálu kromě posuvu v čase nevznikne. Frekvenční závislost skupinového zpoždění však naruší časové vztahy mezi složkami signálu, takže výsledný signál bude mít jiný časový průběh nežli signál výchozí.

U systémů se soustředěnými parametry a malými rozměry je skupinové zpoždění frekvenčně závislé vždy, když je jejich amplituda přenosu jakýmkoli způsobem závislá na frekvenci. Z frekvenční závislosti přenosu totiž vyplývá frekvenční závislost a tím nekonstantnost fáze. První derivace nekonstantní funkce je nenulová, skupinové zpoždění odvozené z derivace fáze podle frekvence je tedy rovněž nenulové, směrem k vysokým frekvencím se však

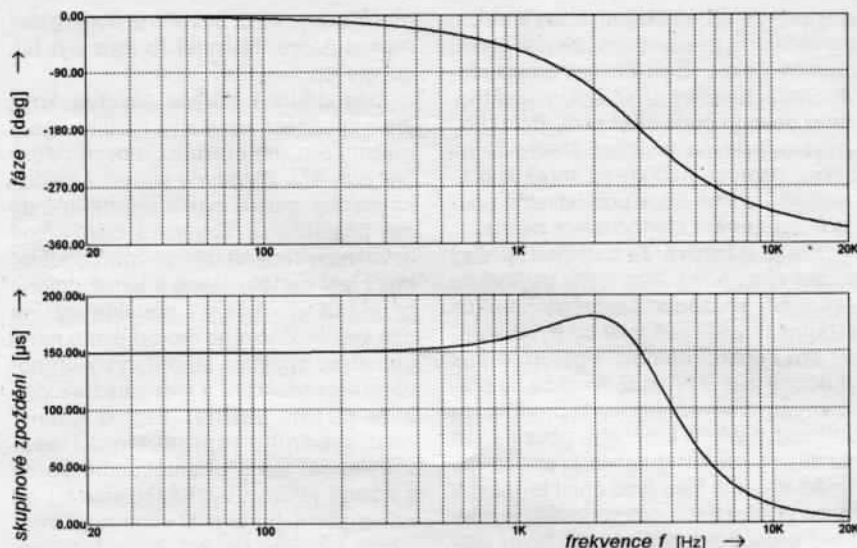
k nule blíží a tudíž nemůže být konstantní - je tedy frekvenčně závislé. Je nicméně možné vytvořit přenosové funkce (a zkonstruovat jim příslušné elektrické obvody), které dávají alespoň v jistém omezeném frekvenčním pásmu průběh skupinového zpoždění blízký konstantě.

Takto vznikají tzv. zpožďovací články. Kupříkladu v akustickém pásmu pracujeme s frekvencemi nejvýše 20 kHz, takže pokud dokážeme zkonstruovat obvod, který bude mít skupinové zpoždění dostatečně blízké konstantě v tomto pásmu, budeme moci takový obvod použít jako zpožďovací článek pro akustické pásmo. A při konstrukci výhybek můžeme jít ještě dále - zde pracujeme s několika omezenými frekvenčními pásmy, takže pokud potřebujeme v daném pásmu zavést zpoždění, můžeme k tomu použít zpožďovací článek s přibližně konstantním skupinovým zpožděním v daném pásmu a nemusíme se příliš starat, co se děje mimo toto pásmo. Dále, je možné vytvořit obvod s takovou frekvenční závislostí skupinového zpoždění, která kompenzuje u jiného obvodu odchylnost jeho průběhu skupinového zpoždění od konstanty, jak jsme si již dříve ukazovali v souvislosti s korekcí fázové charakteristiky směrem k lineárnímu průběhu, což je ekvivalentní problém (obr. 18, 19 a přílehlý text). Kromě toho můžeme k přenosovým funkcím některých dolnopropustných či hornopropustných filtrů zkonstruovat obvody typu all-pass, jejichž charakteristika skupinového zpoždění (resp. fázová charakteristika) se shoduje s charakteristikou skupinového zpoždění či fázovou charakteristikou příslušného filtru a přitom má amplitudu přenosu frekvenčně nezávislou (takové „některé“ filtry jsou vždy sudého stupně).

Na obr. 50 nahoře je fázová charakteristika a dole charakteristika skupinového zpoždění dolní propusti 4. stupně typu Linkwitz-Riley s mezní frekvencí 3 kHz.

Stejnou fázi a skupinové zpoždění by dával obvod all-pass s přenosovou funkcí tvaru podle vztahu (50), do kterého za ω_2 dosadíme mezní kruhovou frekvenci filtru, v tomto konkrétním případě tedy číslo $2 \cdot \pi \cdot 3000$. Rozdíl mezi tím, co se signálem udělá dolnopropustný filtr a tím, co udělá obvod all-pass se stejnou fázovou charakteristikou, je dán rozdílností amplitudových charakteristik - dolní propust omezuje vysoké frekvence, all-pass je přenáší beze změny amplitudy. Prakticky se to velmi výrazně projeví na časovém průběhu přenášeného neharmonického signálu. To dobře ilustruje obr. 51, kde v horní části je časový průběh obdélníkového signálu o frekvenci 500 Hz (slabou přerušovanou čarou) a tentýž signál po průchodu dolní propustí podle uvedeného příkladu, zatímco v dolní části obrázku je tentýž signál po průchodu obvodem all-pass se shodnou fázovou charakteristikou.

Je dobře vidět, že signál na výstupu dolní propusti je deformován přibližně

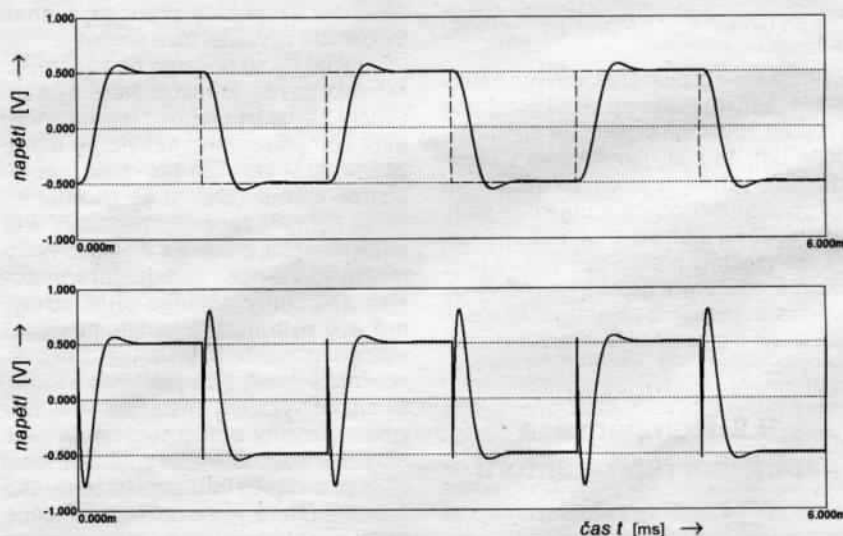


Obr. 50. Fáze a skupinové zpoždění filtru L-R 4. stupně

do tvaru lichoběžníka, který je proti výchozímu signálu „opozděn“. Ve skutečnosti nejde o zpoždění v pravém slova smyslu, pokud však nevede deformace signálu, můžeme dolní propust podle příkladu považovat za zpožďovací člen se zpožděním odpovídajícím skupinovému zpoždění podle obr. 51 (přibližně 150 μ s), který můžeme použít pro signály s frekvencí menší než zhruba jedna polovina mezní frekvence (u vyšších frekvencí již dochází k významnému útlumu). Pokud bychom chtěli zpracovávat vyšší frekvence, museli bychom filtr navrhnout na vyšší mezní frekvenci. Pro daný typ přenosové funkce je skupinové zpoždění nepřímě úměrné mezní frekvenci filtru, takže výsledné zpoždění můžeme volbou této frekvence nastavit na potřebnou hodnotu. Pokud pro potřebné zpoždění vyjde mezní frekvence příliš nízká, je nutné použít filtry vyššího stupně. Návrh takových filtrů je obecně řešen v teorii obvodů, pro návrh jsou k dispozici tabulky a výpočetní algoritmy, jedná se však o dosti složitou problematiku, kterou se zde nemůžeme dopodrobna zabývat. Problém útlumu na vyšších kmitočtech od-

padá u obvodů all-pass, ovšem signály vyšších kmitočtů jsou přenášeny se zpožděním klesajícím s rostoucí frekvencí k nule. Neutlumený přenos těchto nesprávně (nedostatečně) zpožděných signálů se projeví při přenosu neharmonických signálů, konkrétně v našem případě s obdélníkovým signálem se na časovém průběhu objeví podivný „zákmit“. V klasické obvodářské „technologii“ se klade důraz na co možná „nejčistší“ přenos impulsů, proto se zpožďovací články většinou konstruují na základě dolních propustí. Při zpracování akustických signálů by to znamenalo, že mezní frekvence příslušných filtrů by musela ležet nad 20 kHz. Pokud nás nezajímá, co se děje se signály nad určitou frekvenční hranicí, můžeme samozřejmě stejně dobře používat obvody all-pass s charakteristikou skupinového zpoždění plochou v potřebném frekvenčním pásmu.

Jak to všechno využijeme pro korekci zpoždění reproduktorů při konstrukci výhybek? Především si připomeňme, že zpoždění reproduktorů má dvě složky.



Obr. 51. Přenos obdélníků dolní propustí 4. stupně L-R a obvodem all-pass