

Mezi zesilovačem a reproduktorem

RNDr. Bohumil Sýkora

1. Úvod

O problému spojování reproduktorových soustav se zesilovači toho již bylo napsáno poměrně dost. Bohužel, naprostá většina publikací na toto téma je více či méně reklamního charakteru. Výrobci se předstihují v odvážnosti svých tvrzení o důležitosti čistoty mědi, velikosti jejich krystalů, tloušťce drátků a genialnosti způsobu jejich kroucení a sprádání, významu skinefektu (který je samozřejmě právě u jejich výrobku nejdokonaleji potlačen) a tak dále. Odvážnost těchto tvrzení zpravidla hraničí s drzostí, spoléhající se na lehkověrnost a nedostatečnou odbornou informovanost spotřebitelské veřejnosti, pro niž jsou tyto publikace především určeny. Občas se, pravda, objeví informace, která napovídá, že asi nebude všechno zlato, co se třpytí. Příkladem může být článek v časopise STEREOPLAY, citovaný v první části našeho seriálu (minulé číslo Audio Amatéra), kde vedle vychvalování nejrůznějších značkových superkabelů (které je nutno chválit, po něvadž jejich výrobci si platí reklamu na stránkách časopisu) jako doušek živé vody probleskne konstatování, že konec konců "skoro" (ve skutečnosti ovšem zcela) nejlepší vlastnosti má dvojice zkroucených emailovaných měděných drátů. Jen je trochu neohebná a nesmí se na ni šlapat. Jak je to tedy doopravdy?

2. Vliv kabelu na reprodukci

Základní chybou všech rádob odborných úvah na téma kabelů je nesprávné aplikování jinak platných fyzikálních zákonitostí. Uvedeme některé příklady:

1. Kabel je přenosové vedení, po němž se signál šíří konečnou rychlostí (nejvýše rychlostí světla ve vakuu), která obecně závisí na kmitočtu. Proto složky o různých kmitočtech překonávají vzdálenost mezi začátkem a koncem kabelu za různé dlouhou dobu, čímž vzniká zkreslení, ztráta rozlišení a podobné ošklivé věci.

Komentář: Při obvykle v úvahu přicházející délce kabelu řádu desítek metrů je maximální doba zpoždění řádu desítek nano-

sekund, a to i při uvážení faktoru zkrácení, tedy vlastně snížení fázové rychlosti šíření signálu oproti rychlosti světla ve vakuu. Je jasné, že případná chyba přenosu, vzniklá rozdílností této rychlosti pro různé kmitočty, nemůže přesáhnout největší celkové zpoždění, tedy ony desítky nanosekund. Tomu odpovídá fázová chyba přenosu nejvýše řádu desítin stupně na nejvyšších akustických kmitočtech. Jelikož v této oblasti již sluchový systém fázovou informaci nevyhodnocuje (a ani na nižších kmitočtech jeho rozlišovací schopnost není lepší nežli řádu jednotek stupňů), je tvrzení o vlivu konečné rychlosti šíření signálu na subjektivní kvalitu reprodukce přinejmenším velmi sporné.

1a. Rychlost šíření signálu uvnitř vodiče je následkem vysoké vodivosti mědi na nízkých kmitočtech mimořádně nízká - řádově desítky metrů za sekundu.

Komentář: Signál není přenášen vodičem jako takovým, nýbrž elektromagnetickým polem v celém prostoru. Naprostá většina energie signálu není obsažena ve vodiči, nýbrž v jeho okolí. Pokud by se zpoždění signálu uvnitř vodiče nějak uplatňovalo, projevovalo by se to zvláště v amplitudové charakteristice následkem superpozice signálů s různým zpožděním, přicházejících z vnějšku a vnitřku vodiče. Nic takového se ale v reálném světě nepodařilo pozorovat.

2. Chemické nečistoty v mědi, soustředěné na hranicích krystalů, způsobují svým polovodivým charakterem nelineární zkreslení. Proto mají slyšitelně lepší vlastnosti kabely z vysoce čisté bezkyslíkaté mědi s krystaly mimořádně velkých rozměrů (LCC-OFC).

Komentář: Měřitelný rozdíl mezi specifickou vodivostí běžné elektrovodné mědi a tzv. bezkyslíkaté mědi nepřesahuje jedno procento. Ani velmi důkladně provedenými experimenty se u běžných kovových vodičů nepodařilo zjistit odchylky od Ohmova zákona (tedy případné zdroje nelinearity), a to ani při proudových hustotách mnohonásobně převyšujících hustoty odpovídající dovoleným zatížením vodičů. Ale pozor! Pokud ve spojení mezi reproduk-

torem a zesilovačem je nějaký "slabý článek", např. pojistka, může při větším zatížení hrát roli změna jejího odporu následkem zahřátí. Při nízkých kmitočtech může teplota a tudíž i odpor do jisté míry sledovat okamžitou absolutní hodnotu proudu a tak může vzniknout zkreslení. Totéž platí o nedokonalých kontaktech, jejichž přechodový odpor může být vlivem nečistot či koroze (oxidy, sírníky) skutečně nelineární a samozřejmě teplotně závislý. Velmi zrádné jsou z tohoto hlediska zejména oblíbené pérové "rychlokontakty", používané hlavně na komerčních zařízeních nižší kategorie. Jejich přechodový odpor může činit až desetiny ohmů, závisí na stavu povrchu, charakteru použitého vodiče apod., a je dosti nestabilní.

3. Přenos signálu je nejdokonalejší při vlnovém přízpůsobení, kdy impedance zátěže je rovna impedanci zdroje. Zesilovače mají výstupní odpor velmi malý, proto si kupte náš patentní kabel, ten má zařazen tajuplný geniální člen, který vám přízpůsobení zajistí.

Komentář: Onen geniální člen není nic jiného než odpor zařazený v sérii se zesilovačem. Opmeneme-li, že takovéto opatření je výsměchem všem snahám konstruktérů o vysoký činitel tlumení (jehož význam je ostatně také sporný), mohlo by se těm, kdo o elektronice něco vědí, zdát uvedené tvrzení opodstatněné. To ale platí jenom za předpokladu, že vědí pouze něco. Nesmějí vědět, že toto tvrzení je správné pouze když také vlnový odpor vedení odpovídá podmínce přízpůsobení, a dále nesmějí vědět, že impedance zátěže, tedy reproduktorové soustavy, je kmitočtově závislá a její skutečná hodnota má pramálo společného s jmenovitou hodnotou. Pro splnění podmínky přízpůsobení by bylo nutné, aby jak výstupní impedance zesilovače, tak vlnový odpor vedení přesně kopirovaly impedanci reproduktorové soustavy.

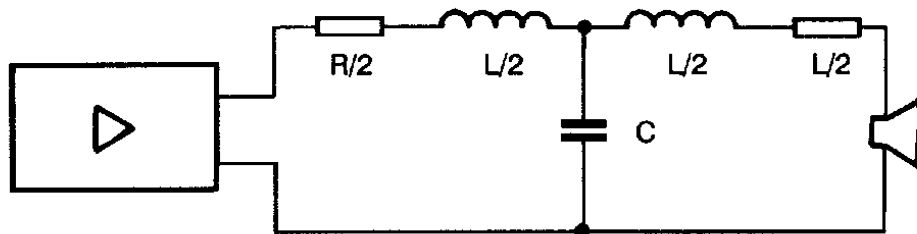
Pokud by se nějakým zázrakem podařilo dosáhnout splnění podmínky přízpůsobení pro celé akustické pásmo, byl by přenos skutečně bezchybný. Pro úplnost je přitom nutné podotknout, že pokud by toho bylo dosaženo připojením jakéhosi externího

pasivního členu za výstup zesilovače, vznikla by v tomto členu ztráta poloviny výstupního výkonu. To by skutečnému puristovi patrně tolik nevadilo, horší však je, že pokud podmínka shodnosti výstupní impedancie zesilovače (včetně případného přizpůsobovacího členu) s impedancí reproduktorové soustavy nebude splněna skutečně přesně, vzniknou chyby přenosu podstatně větší, než kdyby se spojení provedlo tak, jak je obvyklé. Pak se totiž uplatní pouze útlum, který vzniká úbytkem napětí na impedanci kabelu zatížené impedancí reproduktorové soustavy, jak bude probráno dále.

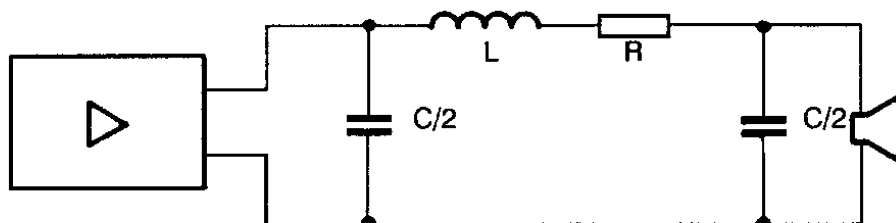
Přes všechny právě uvedené námitky nicméně musíme připustit, že způsob propojení zesilovače a reproduktorové soustavy na kvalitu reprodukce vliv skutečně má, i když tento vliv má poněkud jiné příčiny, než se obvykle tvrdí. Abychom tento vliv mohli objektivně sledovat, musíme si nejprve definovat jistý model funkce spojovacího vedení, odvodit vliv jeho parametrů na přenos a vhodnou měřicí metodou pak tento vliv zjistit kvantitativně.

3. Náhradní parametry kabelu

Přijmeme-li jako výchozí předpoklad to, že typická délka kabelu je o několik řádů menší než nejmenší v úvahu přicházející vlnová délka signálu, můžeme chování kabelu modelovat obvodem se soustředěnými parametry. Příklad takového obvodu je na obr. 1a a 1b. Aníž bychom prováděli rozsáhlý teoretický rozbor, dovolíme si tvrdit, že pro reálné kabely a akustické kmitočty můžeme modelový obvod ještě zjednodušit do tvaru na obr. 2. V tomto modelu je vliv kabelu na přenos dán tím, že na podélné složce jeho impedancie (sériové spojení odporu a indukčnosti) vzniká úbytek napětí zatížením impedancí reproduktorové soustavy, k níž je paralelně připojena kapacita kabelu. Kabel je tedy charakterizován třemi parametry, totiž indukčností, odporem a kapacitou. Pro akustické kmitočty dostatečně přesně platí, že všechny tyto parametry jsou pro daný typ kabelu přímo úměrné jeho délce, takže je možné definovat specifické parametry vztahované na jednotkovou délku kabelu, např. na jeden metr. Výsledná hodnota příslušného parametru pro konkrétní délku se



Obr. 1a



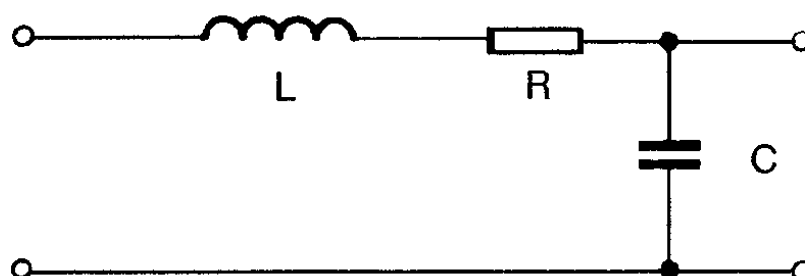
Obr. 1b

pak získá jako součin délky a hodnoty příslušného specifického parametru.

Prakticky důležité je, že náhradní parametry můžeme na základě modelu poměrně jednoduše měřit. Odpor a indukčnost zjistíme měřením impedance smyčky vzniklé tím, že kabel známé délky na jednom konci zkratujeme. Odpor je prostý stejnosměrný odpor smyčky, indukčnost je nutné měřit metodou, která není ovlivněna stejnosměrným odporem, zapojeným z hlediska měření do série s měřenou indukčností. Kapacitu kabelu pak zjistíme jako kapacitu dvojpólu tvořeného kabelem "naprázdno". Tato měření sice nedávají přesné hodnoty příslušných veličin, opět ale platí, že pro reálné kabely a akustické kmitočty je přesnost dostatečná. Případná nepřesnost by se projevila v první řadě kmitočtovou závislostí parametrů, pokud bychom měření prováděli na více kmitočtech. Orientačně ji můžeme samozřejmě respektovat tak, že příslušné parametry budeme udávat výslovně jako parametry zjednodušeného modelu pro několik významných kmitočtů. Takto jsou udávány parametry v tomto článku.

Pokud bychom chtěli kabel popsat zcela korektně, museli bychom jej modelovat jako dvojitou matici včetně kmitočtové závislosti jejích parametrů. Takový popis je však pro praktické použití zbytečně složitý. Proto se omezíme pouze na udávání náhradních parametrů podle předchozího odstavce. Pokud budeme nadále používat pojmu impedance kabelu, budeme tím mít na mysli impedanci tvořenou sériovým spojením indukčnosti a odporu kabelu.

Význam náhradních parametrů samozřejmě nespočívá jen v jejich snadné měřitelnosti, ale především v tom, že umožňují snadné zhodnocení vlivu kabelu na přenos signálu. Na základě nepřiliš složitého výpočtu je možné odvodit kmitočtovou charakteristiku přenosu a z ní pak např. útlum kabelu na tom kterém kmitočtu. Musíme ovšem znát také impedanci zátěže, tedy v případě reproduktorové soustavy nejen jmenovitou hodnotu, nýbrž celou kmitočtovou charakteristiku včetně fázového úhlu. Tím se situace dosti komplikuje, takže pro konkrétní uspořádání kabel - reproduktorová soustava je schůdnější



Obr. 2

popsat jeho chování kmitočtovou resp. amplitudovou charakteristikou přenosu zjištěnou měřením pro zatížení kabelu touto reproduktorovou soustavou. Obecně samozřejmě platí, že čím menší je impedance kabelu oproti impedanci zátěže, tím menší útlum nastává, respektive tím menší kmitočtová závislost bude do přenosu vnesena kmitočtovou závislostí impedance zátěže (reproduktorové soustavy). Tato vnesená kmitočtová závislost představuje nejpodstatnější část vlivu kabelu na reprodukci. Sejmутí příslušné charakteristiky je možné provést kterýmkoli běžným způsobem. Charakteristiky uváděné v tomto článku byly sejmутy v laboratoři elektroakustiky Výzkumného ústavu rozhlasu a televize s použitím analyzátoru MLSSA, pracujícím na principu rychlé Fourierovy transformace (FFT).

Jestliže změříme přenosovou charakteristiku pro zátěž jednoduchých vlastností, např. čistě rezistivní, můžeme samozřejmě na základě náhradního schématu vypočítat náhradní parametry, speciálně indukčnost. Pokud takový výpočet provedeme pro několik kmitočtů, pak zpravidla zjistíme, že parametry jsou kmitočtově závislé. To může mít dvě hlavní příčiny. Buďto se jedná o vliv nepřesnosti resp. neúplnosti použitého modelu a náhradního schématu, anebo jsou parametry skutečně kmitočtově závislé. To je fyzikálně docela dobře možné. Kapacita je závislá na kmitočtu vlivem ztrát v dielektriku (izolaci) kabelu, odpor a indukčnost mohou na kmitočtu záviset následkem skinefektu. Vliv skinefektu a metody jeho omezení jsou častým tématem odborných i rádobodobných článků. Faktem je, že tento efekt existuje a může mít vliv na vlastnosti kabelu v oblasti nejvyšších akustických kmitočtů. Při měření se projevuje především nárůstem činné složky impedance smyčky tvořené kabelem na jednom konci zkratovaným, jinými slovy kmitočtovou závislostí odporu kabelu. Druhým projevem skinefektu je to, že reaktivní složka impedance smyčky není úměrná kmitočtu, ale narůstá pomaleji, neboli indukčnost s rostoucím kmitočtem klesá. Celkově je nárůst impedance kabelu následkem skinefektu méně strmý než nárůst následkem indukčnosti. Z tohoto hlediska je

poněkud zábavné ujišťování některých výrobců kabelů o tom, jak dokonale je u jejich výrobků potlačen skinefekt, přičemž o indukčnosti nepadne ani zmínka.

4. Vliv konstrukce kabelu

Z náhradního schématu obvodu na obr. 2 je celkem zřejmé, že kabel bude mít na přenos signálu vliv tím menší, čím menší bude jeho indukčnost, kapacita a odpor. Všechny tyto parametry jsou určeny konstrukcí kabelu v nejšířším slova smyslu. Uvedeme si některé základní souvislosti.

a) Odpor smyčky - je určen především stejnosměrným odporem kabelu, který je při dané délce nepřímo úměrný průřezu. Proto je opodstatněné používat kabely s pokud možno velkým průřezem žil. Je také možné používat vícežilové kabely s paralelně spojenými žilami. Pro běžné účely při délkách spoje nepřesahujících 10 m zpravidla postačí celkový průřez do 4 mm².

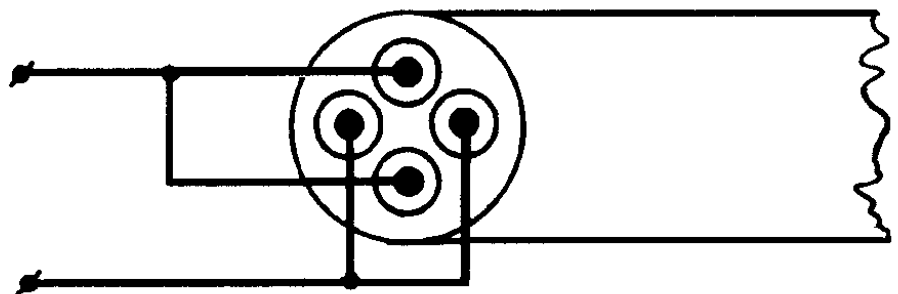
b) Kapacita kabelu - závisí hlavně na průměru žil, tloušťce a permitivitě izolace a uspořádání žil. S rostoucím průměrem žil a permitivitou izolace roste, s rostoucí tloušťkou izolace klesá. Pro přenosové vlastnosti soustavy zesilovač - kabel - reproduktorová soustava nemusí být kapacita kabelu příliš významná, u některých zesilovačů však může zatížení nadměrnou kapacitou kabelu vést k nestabilitě.

c) Indukčnost - je dána průměrem žil, jejich roztečí a jejich prostorovým uspořádáním, mimo jiné např. stupněm zkroucení. Při rostoucím průměru a zkroucení klesá, při rostoucí rozteči roste.

Je patrné, že mezi parametry kabelu existují jisté interakce. Např. zvětšením průměru žil snížíme odpor a indukčnost, zvětšíme

však kapacitu. Zvětšením zkroucení snížíme indukčnost, vzroste ale odpor atd. Při větším průměru žil se také zvyšuje poměrný vliv skinefektu. Proto platí, že kabel by neměl mít příliš malý, ale ani příliš velký průřez a měl by být izolován dielektrikem o co možná nejmenší tloušťce a permitivitě. Vhodný je např. polyetylen. S elektrickou pevností u kabelů pro nízkofrekvenční účely zpravidla nejsou problémy, takže tloušťka izolace může být výrazně menší než u kabelů silových. Z hlediska vlivu zkroucení jsou velmi nevhodné kabely s dvěma přímými paralelními vodiči, které se zejména v zahraničí hojně nabízejí. Rozteč žil u těchto kabelů také nebývá právě nejmenší. Velký průřez vodiče je nejvýhodnější zajistit použitím vícežilového kabelu, nejlépe se sudým počtem žil, které se propojí paralelně tak, aby tvořily dva vodiče s tím, že jednotlivé žily by měly být co nejlépe "promíšeny". U čtyřžilového kabelu tak vzniká tzv. křížová dvojice. Nezanedbatelnou výhodou podobných uspořádání je velmi malá citlivost na rušivá magnetická pole. Naproti tomu málo podstatný je průměr jednotlivých drátů v složených vodičích. Ten má vliv jen na ohebnost výsledného svazku.

Pro připojení reproduktorů se často doporučují různé typy koaxiálních kabelů. Kabely této konstrukce mají zpravidla nízkou indukčnost i kapacitu, bohužel průřez vnitřního vodiče je zpravidla dosti malý a odpor kabelu tudíž zbytečně vysoký. Výjimku tvoří tzv. silové koaxiální kabely, které však jsou drahé (i když ne tolik jako různé High - End - Freaky) a u nás zatím prakticky nedostupné. Velmi dobré vlastnosti však má "křížové dvojice" z běžného kabelu, uspořádané podle obr. 3. Měření ukazuje, že na indukčnost kabelu nemá téměř žádný vliv způsob uložení, stočení či "zmuchlání" kabelu.



Obr. 3

Pro získání konkrétní představy uvedeme v příštím čísle našeho časopisu základní parametry vybraných typů kabelů a kombinací. Až na jednu výjimku to budou materiály druhdy nebo dosud vyráběné na území nynější České republiky. Jak se ukazuje, je možné dosáhnout objektivně dobrých výsledků i jednoduchými prostředky, pokud se nespokojíme s "bílou dvoulínkou" (na barvě ostatně nezáleží).

Na obrázcích 4a a 4b jsou uvedeny příklady kmitočtových charakteristik přenosu kabelu CYSY 4 x 1 mm² pro zatížení odporem (obr. 4a) a reproduktorovou soustavou o impedanci 8 ohmů (vývojový vzorek) (obr. 4b). Z těchto průběhů je patrné, že kmitočtová závislost vnesená kabelem do přenosu není v žádném případě zanedbatelná, vliv vlastností zátěže je však rozhodující. Pravda, je diskutabilní, jak dalece podstatný vliv na kvalitu reprodukce má kabelem vnesené zvlnění ± 0.2 dB, když zvlnění 2 dB u samotné reproduktorové soustavy je velmi slušný výsledek. Při uvážení cen kabelu CYSY na jedné straně a obvyklých cen dovozových "speciálů" (minimálně stovky Kčs/m) vidíme, že při použití tuzemského kabelu se dá ušetřit na hezkých pár CD ...

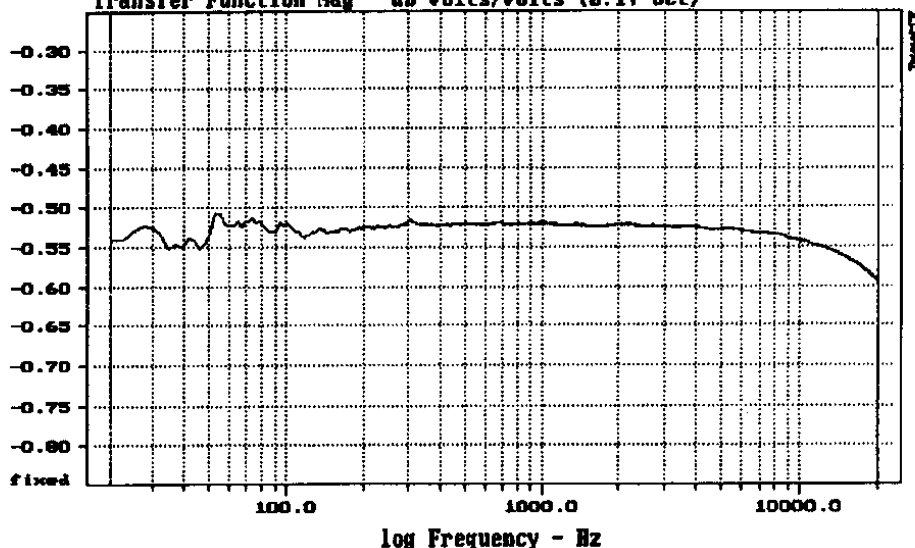
5. Závěr

Zbývá snad už jen říci, proč se vyrábí tolik různých druhů a konstrukcí kabelů a proč výsledky subjektivních testů jsou někdy tak přesvědčivě příznivé u kabelů zcela nesmyslných. Odpověď na tyto otázky se nám asi v tomto článku nepodaří podat. Můžeme uvést pár námětů k uvažování a pár slov do prance. Tedy:

Proč zlaté hodinky, když obyčejné taky ukazují? Inu, luxus daný vysokou cenou, nikoli kvalitou, patří k životnímu stylu - aspoň pro někoho!

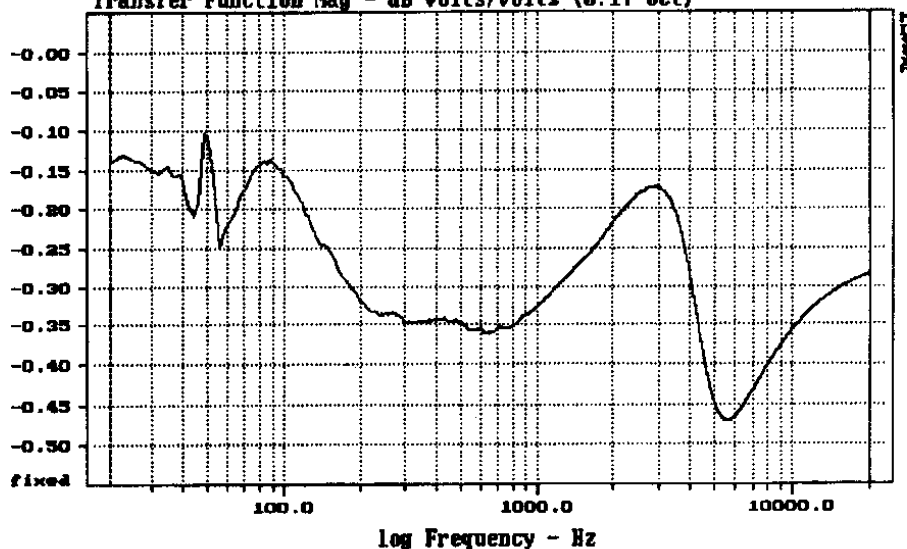
Proč se do technických popisů píší nesmysly? Protože efektně naservírovaná lež je lákavější než střízlivá pravda!

File: C:\MLS\KABEL\KABEL-2.FRQ 1-7-93 11:49 AM (equalized)
Transfer Function Mag - dB volts/volts (0.17 oct)



Obr. 4a

File: C:\MLS\KABEL\KABEL-1.FRQ 1-7-93 11:38 AM (equalized)
Transfer Function Mag - dB volts/volts (0.17 oct)



Obr. 4b

Proč stále přetrvávají rozpory mezi subjektivním a objektivním hodnocením? Protože subjektivní testy, publikované v hifi magazínech, jsou v naprosté většině případů uspořádané tak, že objektivitu vylučují. Je to přinejmenším do jisté míry záměr, neb se tím otevírá prostor k rádobyfilosofickým a estetickým diskusím, kde lze do nekonečna polemizovat o čemsi principiálně nedefinovatelném a získávat tak pověst znalce,

zatímco strohá technická realita těžko připouští polemiku o tom, zdali jedna je menší než dvě.

A proč je autor tohoto článku tak zaujatý proti všem těm krásným pestrobarevným nízkofrekvenčním hadům? Protože nejlepší kabel bude ten, který sám zkonstruoval, a který vám nabídne firma Fox Audio, až na něj sežene výrobce ...

Dodatek [Duben 2007]

Pozn. aut.: Podrobnější analýza vlnové rovnice, která popisuje šíření signálu po kabelu, ukazuje, že u reálných kabelů, tj. konkrétně těch, které mají izolační odpor mezi vodiči velmi veliký, je vlnová impedance a rychlost šíření závislá na frekvenci. Směrem k nízkým frekvencím vlnová impedance roste a rychlost šíření klesá. Efekt je to velmi významný, např. vysokofrekvenční koaxiál 75 ohmů nabývá již na horní hranici akustického pásma impedance cca 210 ohmů. To je další důvod, proč jsou jakékoli úvahy na téma vlnového přizpůsobení ve zvukové technice zcela absurdní. Nižší rychlost šíření sice způsobuje, že zpoždění signálu je pro nízké frekvence vyšší než to, které vyjde z obvyklého výpočtu pro vysoké frekvence, který respektuje pouze činitel zkrácení, stále je však příliš nízké, než aby mohlo způsobit nějaký slyšitelný efekt. Efekty tohoto druhu nicméně byly pozorovatelné při přenosu lidského hlasu podmořskými kabely na vzdálenosti řádu tisíců kilometrů, v dobách, kdy se ještě nepoužívala vysokofrekvenční nosná telefonie.

A pokud jde o reproduktorový kabel snů, ten už se zrodil - je jím kabel "Musical Dream", který podle autorova doporučení vyrábí firma Shark na Taiwanu a do Česka jej dováží firma Pekra v Hranicích na Moravě.