

Reproduktorové soustavy pro elektronkové zesilovače (a nejen pro ně)

Karel Rochelt

(Pokračování)

Na příkladu reproboxů Visaton Audience GF MK 3 si ukážeme, jaký vliv tedy vlastní kompenzace mají. Jedná se o 132 cm vysoké sloupové reproboxy, osazené dvěma kusy 20 cm basových reproduktorů GF 200 s membránou ze skelných vláken. Mezi těmito reproduktory je umístěna středovýsekční sekce osazená kalotovými typy G 50 FFL a G 25 FFL. Každý má svoji basreflexovou komoru (41 + 63 litrů) s tím, že každá je naladěna na mírně jiný rezonanční kmitočet basreflexového otvoru, a tím, že horní reproduktor je využíván až do děličního kmitočtu 700 Hz, zatímco spodní slouží pouze jako podpora nejhlubší basové oblasti. Dá se tedy říci, že se jedná o 3 a 1/2 pásmové reproboxy.

Jejich kladné vlastnosti vynikají právě ve spojení s elektronkovými zesilovači, protože disponují velkou membránovou plochou basové části, což se projevuje velkým dynamickým rozsahem spojeným s vysokou citlivostí. Navíc jejich impedance leží v okolí 4 Ω a to je hodnota, se kterou elektronkové zesilovače vždy spolupracují lépe než s 8 Ω. Na obr. 9 je již upravená frekvenční výhybka oproti původnímu návrhu Visaton. Vstup je řešen jako Quatro-Wiringové připojení, každý reproduktor a jeho část frekvenční výhybky má tedy svůj vstup a ten je od

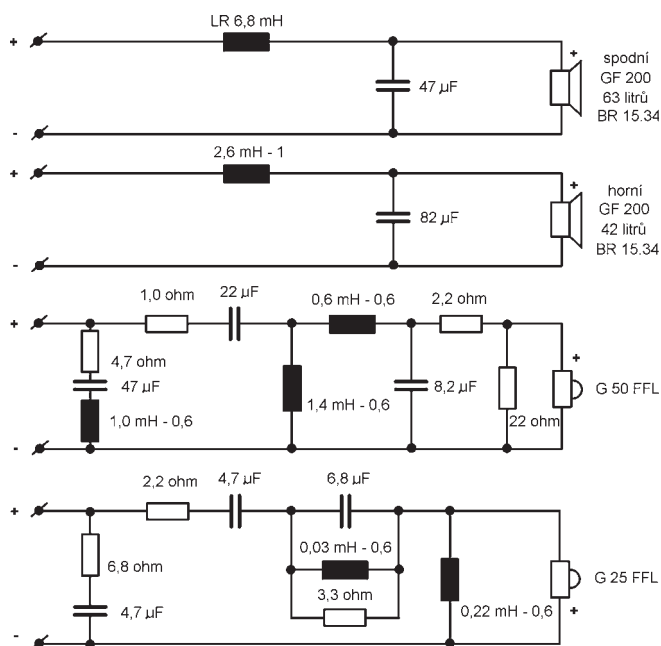
ostatních větví výhybky zcela oddělen. U středotónové a výškové větve jsou přímo na vstupu připojeny kompenzační členy upravující průběh impedance a elektrické fáze (4,7 μF + 6,8 Ω a 47 μF + 1,0 mH + 4,7 Ω). Na obr. 10 jsou průběhy bez připojených kompenzačních členů, na obr. 11 pak s připojenými kompenzačními členy. Je tedy vidět, že i když původně byl impedance průběh relativně vyrovnaný (jsou reproboxy s mnohem většími rozdíly průběhu impedance), přesto je průběh elektrické fáze již značně rozkolísaný a fázový posuv dosahuje až 45 stupňů jalové složky. Po připojení kompenzačních členů se průběh elektrické fáze a impedance velmi dobře vyrovná a dá se říci, že se reproboxy vůči zesilovači chovají obdobně jako zátěž tvořená pouze výkonovým rezistorem.

Neznalý čtenář by mohl namítnout, proč není také vyrovnán fázový posuv a impedance v oblasti basů. Zde je třeba uvést, že tato zvlnění vznikají v důsledku vlastní rezonance reproduktoru v ozvučnici a jsou žádoucí, protože basové reproduktory jsou částečně poháněny vlastní rezancí systému. Pokud bychom kompenzovali i tuto oblast, projevilo by se to značným poklesem hlasitosti basů. Proto není žádoucí zvlnění v oblasti rezonance basových reproduktorů kompenzovat!

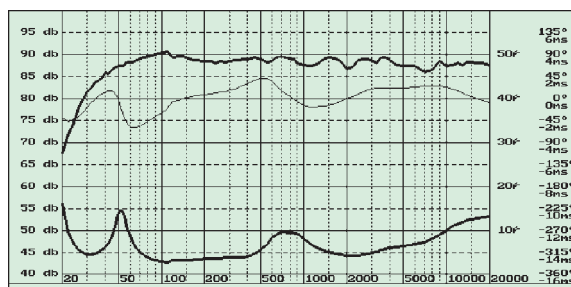
Je s podivem, proč naprostá většina výrobců neinstaluje kompenzační členy pro vyrovnání impedance do svých výrobků, když zvuková zlepšení jsou jednoznačně velmi příznivá. Přitom první články, upozorňující na tuto skutečnost, vyšly v tisku minimálně již před patnácti roky. Pokud je mi známo, tyto kompenzace instaluje pouze firma Dynaudio (téměř do všech svých reproboxů) a firma Phonar (ale ta pouze do některých). Právě u reproboxů Dynaudio si myslím, že právě instalace kompenzačních členů instalace pomohla této firmě k tomu, že jsou její reproboxy zvukově oceňovány jako velmi nadprůměrné.

Nezáleží tedy pouze na vlastní kvalitě použitých šasi (která je jistě v případě Dynaudio velmi vysoká, ale velmi kvalitní šasi vyrábí celá řada firem), ale i na optimalizaci frekvenční výhybky tak, aby umožňovala zesilovačům pokud možno ideální provoz tím, že se budou reproboxy chovat jako ideální zátěž. Přitom podmínky pro ideální zátěž splňuje pouze ta, která se podobá tomu, jako bychom připojili ke svorkám zesilovače pouze výkonové rezistory, na kterých nemohou vznikat žádné fázové posuvy mezi napětím a proudem. Nestačí tedy pouze brát ohled na minimální zatěžovací impedanci, ale i na její vlastní průběh.

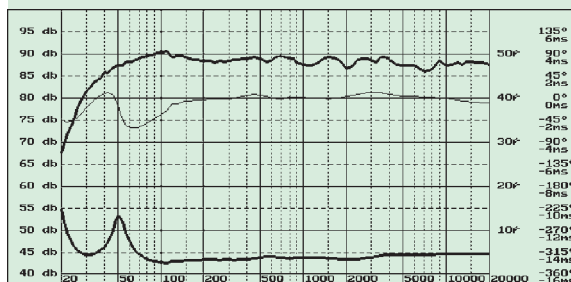
Teď tedy nastává problém, jak tuto kompenzaci vypočítat, kam ji připojit a jaké součástky použít. Jednoznačně nejlepší variantou zůstává možnost použít nějaký kvalitní simulační program pro návrh reproboxů. Ten musí umožňovat zapojení alespoň čtyř pásem frekvenční výhybky a musí pracovat s reálnými složkami impedance reproduktorů. Také musí umožňovat zobrazení průběhu elektrické fáze. Jednodušší typy, které pracují s impedancí reproduktorů pouze tak, jako by byl



Obr. 9. Zapojení reproboxů Audience MK3



Obr. 10. Průběhy Audience MK3 bez kompenzačních členů



Obr. 11. Průběhy Audience MK3 s kompenzačními členy

tvořen pouze činným odporem, jsou nepoužitelné již z toho důvodu, že neukazují správně impedanci reproboxů ani pro základní zapojení frekvenční výhybky.

Uvedené průběhy pocházejí ze simulačního programu SPEAKER PRO 7.0, který se dá označit jako poloprofesionální verze určená k vývoji reproboxů. Podle výsledků testů v časopise „Klang + Ton“ i mých kontrolních měření je simulace tohoto programu tak přesná, že může prakticky nahradit přesné měření v bezdovukové komoře. Při simulaci v praxi vznikají pouze chyby způsobené tím, že tento program nepočítá se šířkou ozvučnice, případně s umístěním reproduktorů k boční hraně přední stěny ozvučnice. Pokud tedy použijeme v praxi relativně úzkou ozvučnici nebo jsou středotónové a výškové reproduktory umístěny k boční straně, ukazuje program menší hodnoty akustického tlaku ve vyšších kmitočtech, než je tomu potom doopravdy. Tyto rozdíly leží však v oblasti 1 dB a po určité zkušenosti lze s nimi rovnou při návrhu počítat.

Průběhy impedance a elektrické fáze tento program ukazuje víceméně zcela přesně, a vzniklé chyby lze spíše přičíst výrobním tolerancím šasi. Existuje i jednodušší verze tohoto programu nazvaná SPEAKER PRO 6.0, která neumožňuje tak složité zapojení frekvenčních výhybek a nepočítá s rozmístěním reproduktorových šasí ve vertikální ose k referenčnímu bodu měření (výšce poslechu). Ale i ten je pro tento účel již velmi dobrou volbou a s jistými omezeními se lze dopracovat ke stejným výsledkům jako s verzí 7.0. Jeho cena je oproti vyšší verzi pouze čtvrtinová a je již přístupná i běžným uživatelům.

Standardní vybavu těchto programů je databanka reproduktorů Visaton. Program umožňuje import dat z různých měřicích programů nebo lze vkládat data také ručně. To je výhodné pro uživatele různých typů reproduktorů od jiných výrobců a lze takto poměrně dobře zaručit i relativně přesný výsledek s reproduktory, které nejsou v dodané databance. Navíc si je třeba uvědomit, že jsou si zejména průběhy impedance různých obdobných reproduktorů různých výrobců velmi podobné a pro účel návrhu kompenzační záleží tedy nejvíce na konkrétním zapojení výhybky.

Demoverzi programu SPEAKER PRO 6.0 a aktualizované databanky reproduktorů Visaton lze stáhnout na internetových stránkách Visaton (www.visaton.de). Demoverze v německé verzi, která je pro soukromé použití freeware, má některá omezení ve funkčnosti - např. lze simulovat pouze třípásmový reprobox, po zadání basové části ji již nelze dále editovat, nelze simulovat ozvučnice typu pásmové propusti, schází dokumentace atd. Pro

většinu využití však zcela vyhovuje a při troše přemýšlení lze na ni navrhnout kompletní dvoupásmový reprobox i s kompenzacemi impedance. Ve vlastní demoverzi je databanka s pouze devíti typy reproduktorů, není ale problém do demoverze doinstalovat celou databanku reproduktorů Visaton.

Protože si myslím, že si řada zájemců bude chtít demoverzi stáhnout, popíšu zde nejlepší postup instalace na počítač, protože originální popis většinou nefunguje: stáhněte si komprimovanou demoverzi (asi 0,5 MB). Tu je nejlépe rozbalit na disketu. Přejdete na příkazový řádek, zvolíte A: Enter. Install c: Enter. Program se rozbalí na pevný disk. Program spustíte cd SPEAKER Enter, SPEAKER Enter nebo z Průzkumníka. Objeví se úvodní obrazovka (nebo taky ne - nevadí), opět Enter, objeví se licenční ujednání Escape. Dostanete se do menu programu, ve kterém je třeba nejprve zvolit databanku (lade datenbank) a potom Nový projekt. Pak již program normálně funguje. Staženou aktuální databanku (asi 0,3 MB) nejprve rozbalte na soubor userdata.exe. Tímto souborem nahradíte stávající soubor ve Složce Userdata. Dvojklikem na tento soubor se pak databanka samočinně rozbalí do programu - při instalaci se zeptá, zda má přepsat stávající data stejných reproduktorů z demoverze - doporučeno. V menu Lade datenbank se objeví políčko s novou databankou, kterou zvolíte, a máte celou databanku reproduktorů Visaton k dispozici. Další postup je víceméně jasný - méně chápavým lze dodat návod k použití.

Pro ty, kteří tento program nevlastní nebo ho nemohou pro svůj případ využít, je možné s určitou dávkou nepřesnosti použít i klasický případ, kdy se nejprve změří skutečná impedance reproboxu, a potom se kompenzace vypočítá. Musíme zjistit minimální impedanci (pro Audience MK 3 = 3,0 Ω), změřit kmitočet, od kterého se impedance zvýší na 1,5násobek (= 3 dB) oproti jmenovité (v tomto případě 4 Ω), na kterém opět klesne pod 1,5násobek, a nakonec, od kterého se opět zvedá na 1,5násobek oproti impedanci před zvětšením na nejvyšších kmitočtech. Pak potřebné kompenzace jednoduše vypočteme podle upravených vzorců pro výhybku se strmostí 6 dB.

Jako odpor rezistorů zvolíme hodnotu 1,5násobku jmenovité impedance, takže by měly mít v tomto případě minimálně 6 Ω. Pokud je v korekčním členu zařazena tlumivka, musíme pochopitelně připočítat stejnosměrný odpor vinutí k odporu rezistoru. Pro výpočet kapacity kondenzátorů tedy platí:

$$C = 1/(6,28f \cdot 1,5Z_j) \quad [F]$$

$$L = (1,5Z_j)/(6,28f) \quad [H]$$

Pro příklad Audience:

$$C = 1/(6,28 \cdot 520 \text{ Hz} \cdot 1,5 \cdot 4 \Omega) = 0,000\,051 \text{ F} = 51 \mu\text{F}$$

$$C = 1/(6,28 \cdot 5000 \text{ Hz} \cdot 1,5 \cdot 4 \Omega) = 0,000\,005 \text{ F} = 5,3 \mu\text{F}$$

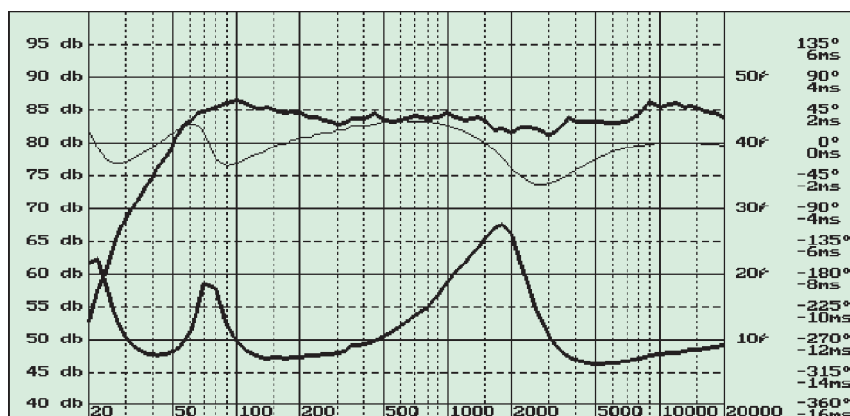
$$L = (1,5 \cdot 4)/(6,28 \cdot 1200 \text{ Hz}) = 0,000\,796 \text{ H} = 0,8 \text{ mH}$$

Oproti vypočteným hodnotám volíme pak vždy u kondenzátorů menší kapacity z dodávané řady E12, u rezistorů a tlumivek pak hodnoty vyšší. Přesné nastavení podle výpočtu nemá opodstatnění, protože se výsledek liší zcela zanedbatelně. Rezistory musí být na zatížení minimálně 10 W, protože zejména v případě, že se kompenzuje průběh na nižších kmitočtech, prochází kompenzační relativně velký výkon a rezistory se zahřívají. Tlumivky postačí s drátem o průměru 0,6 mm s tím, že musíme počítat s relativně velkým odporem drátu vinutí a ten je třeba připočítat k odporu rezistoru.

Kompenzační členy se připojují vždy na vstup frekvenční výhybky. Je-li výhybka rozdělena pro případ připojení stylem Bi-Wiring (případně vícepásmově), připojuje se kompenzační člen před tu část výhybky, která obsahuje kmitočtové pásmo, které se kompenzuje. Na příkladu reproboxů Audience je tedy vidět, že se část kompenzace vyrovnávající impedanční průběh v okolí 1 kHz připojí před středotónovou větve reproduktorů pracujících v rozsahu 700 až 4000 Hz. Druhá část kompenzující impedanční průběh nad 4000 Hz se připojí před výškovou větve frekvenční výhybky.

Po instalaci kompenzačních členů výhybku opět přeměříme. Pokud je vše v pořádku, výsledná impedance nad rezonancí basového reproduktoru se bude pohybovat v rozmezí 2 Ω s tím, že nesmí klesnout výrazně (max. o 10 %) pod úroveň naměřenou původně jako impedanční minimum. Pokud se impedance zmenší pod tuto hodnotu, je třeba zvětšit odpor rezistoru, případně zmenšit kapacitu kondenzátoru nebo zvětšit indukčnost tlumivky podle potřeby. Tímto způsobem lze dosáhnout téměř vždy takové přesnosti, že výsledný posuv elektrické fáze poklesne mimo basové pásmo na hodnoty pod 10°, což se prakticky velmi blíží ideálnímu stavu.

V každém případě bude mít průběh elektrické fáze velmi vyrovnaný průběh a nebude velmi silně kolísat mezi jalovou a kapacitní složkou. To je zejména případ menších dvoupásmových reproboxů, kde je řešen útlum výškového reproduktoru odporovou děličem. Tady běžně impedanční průběh v oblasti dělicího kmitočtu vystoupí i přes čtyřnásobek jmenovité impedance a fázový posuv kolísá i přes 60° do jalové i kapacitní složky. Celkový fázový posuv pak může dosahovat i přes 100° ve velmi úzkém kmitočtovém pásmu - viz obr. 12. Na něm jsou průběhy běžného dvoupásmového reproboxu. U něj připojením kompenzací můžete poměrně hodně vylepšit zvukovou kva-



Obr. 12. Typické průběhy dvoupásmového reproboxu s odporovým děličem před výškovým reproduktorem

litu vašich reproboxů, i pokud jsou jinak dobře navrženy. Vylepší se zejména přednes středotónového pásma, kde velké fázové posuvy způsobují hlavně to, že zvuk v tomto pásmu „postrádá energii“ a jeví se jako nekonkrétní s horší prostorovou lokalizací. U vícepásmových reproboxů bývá impedanční průběh většinou podstatně vyrovnanější, ale fázové posuvy mohou kolísat mezi jalovou a kapacitní složkou v akustickém pásmu i několikrát. Vše záleží na konkrétním zapojení frekvenční výhybky a někdy je nutné připojit i více kompenzačních větví k výhybce, aby se dosáhlo potřebného efektu.

Z předchozích řádek by se mohlo zdát, že se vylepšuje pouze zvuk reproboxů. Pochopitelně tomu tak není, vlastní příčina zvukových vylepšení spočívá zejména v tom, že je třeba chápat reprodukční zařízení vždy jako celek tvořený výkonovým zesilovačem a vlastní reproduktorovou soustavou. Tyto dva prvky se vždy mezi sebou nějakým způsobem ovlivňují. Mezi nimi leží navíc spojení reproduktorovými kabely, které může celkový zvuk také značně ovlivnit. Proč? Pro to je vysvětlení celkem jednoduché. Každý reproduktor se po vybuzení signálem okamžitě nezastaví v klidové poloze, ale ještě trochu dokmitává vlivem pružného zavěšení nejen na frekvenci budičího signálu, ale i na jiných frekvencích vlivem membránových rezonancí. Doba dokmitávání je závislá především na váze membrány a celkové kvalitě reproduktoru, provedení membrány a závěsů (kvalitu reproduktorů víceméně určuje rychlost ustálení do klidové polohy po vybuzení). Toto dokmitávání způsobuje, že se zpětně indukují napětí na cívce reproduktoru a tento výkon někam putuje. V ideálním případě, kdy by propojení se zesilovačem mělo hodnoty okolo řádu miliohmů, by toto dokmitávání částečně zabrzdil zesilovač reakcí zpětné vazby. Protože má však v praxi propojení odpor okolo 0,5 Ω a více, putuje tento naindukovaný výkon snazší cestou s menším odporem, tj. do nejbližšího reproduktoru,

protože zde má vedení pochopitelně daleko menší odpor mezi reproduktorem a výhybkou, než je mezi výhybkou a zesilovačem.

Zkreslení způsobené dokmitáváním reproduktorových membrán můžeme podstatně omezit dvěma metodami. Obě mají své výhody i nevýhody, nicméně pokud vhodně použijeme jakoukoli z těchto metod, dospějeme téměř ke shodným výsledkům.

První metoda spočívá v tom, že velmi výrazně zvětšíme průřez přívodních vodičů (minimálně na 2x 16 mm²). Propojení mezi zesilovačem a reproboxem pak obstarávají pouze dva vodiče - jeden plus pól a jeden minus pól. Zmenšení odporu vodičů pak způsobí, že zesilovač lépe kontroluje pohyb reproduktorů a zvuk se v tomto případě vylepší tím, že z velké části poklesne objem zkreslení typu sykavek, zlepší se detailnost a zvuk celkově získá na energii v oblasti základních kmitočtů. To je způsobeno především tím, že velké průřezy kabelů s sebou přinášejí vždy také pokles nejvyšších kmitočtů vlivem skin efektu. Protože však u takto velkých průřezů není pokles nejvyšších kmitočtů výrazný, jeví se tento útlum jako žádoucí a je zpravidla hodnocen příznivě. Skin efekt je možné částečně omezit použitím stříbřených vodičů nebo spletením více slabších vzájemně izolovaných vodičů k sobě. Nevýhodou tohoto řešení je poněkud větší indukčnost použitého kabelu a především značné cenové náklady za použité kabely, pokud mají dobře fungovat.

Druhá metoda spočívá v tom, že oddělíme cesty jednotlivých reproduktorů až k zesilovači.

Zesilovač s reproboxem se v tomto případě propojí čtyřmi oddělenými vodiči u dvoupásmového reproboxu (plus a minus pól pro basovou oblast, a plus a minus pól pro výškovou oblast - tzv. Bi-Wiring), šesti vodiči v případě třípásmového reproboxu (tzv. Tri-Wiring) nebo osmi vodiči v případě čtyřpásmové kombinace (tzv. Quatro-Wiring).

Na zesilovači se všechny plus póly připojí na plusovou svorku a všechny

minus póly na minusovou svorku. V reproboxech musí být jednotlivé části výhybek (včetně cest ke každému reproduktoru) zcela odděleny - viz příklad Audience. Reproboxy tedy musí mít vždy pro každé pásmo svůj pár připojovacích svorek.

Při tomto způsobu připojení musí jít nežádoucí zpětně indukovaný signál nejdříve až k zesilovači a ten ho již dokáže velmi podstatně eliminovat zpětnou vazbou. Protože zpětná vazba pochopitelně zcela neodstraní chybový signál, uplatňuje se navíc také příznivé to, že chybový signál musí při cestě do druhého reproduktoru absolvovat cestu nejen k zesilovači, ale také nazpět od zesilovače k druhému reproduktoru. Tím pochopitelně vzniká mezi jednotlivými reproduktory v reproboxu poměrně značné oddělení vlivem činného odporu vedení kabelů. Proto kabely k reproboxům nesmí mít velké průřezy, protože velké průřezy účinek oddělení zhoršují - optimální průřezy jsou proto v rozsahu 2x 0,8 až 1,5 mm². Obavy, že se zhorší přenos basů (zahuhlanost), jsou neopodstatněné, protože pravý opak je pravdou. Výhodné je potom to, že takto malé průřezy pak umožňují konstrukci kabelů, kdy jsou jednotlivé žíly k sobě velmi silně zkrouceny. Toto zkroucení potlačuje vlastní indukčnost kabelu, což je z hlediska přenosu zvuku velmi žádoucí. Reproboxy připojené tak, že každý reproduktor má svoje zcela oddělené napájecí vedení a reproboxy jsou propojeny se zesilovačem silně zkroucenými kabely, pak mohou poskytnout zvuk s tak malým zkreslením, které lze vůbec v praxi dosáhnout. Oproti připojení reproboxů pomocí kabelů s extrémně velkým průřezem je výsledný zvuk vlivem minimální indukčnosti zkrouceného kabelu vždy výrazně s větším podílem vyšších kmitočtů, protože tyto nejsou indukčností utlumovány. Navíc se takto omezuje i vliv skin efektu, a proto můžeme použít nejlevnější vodiče, jako jsou běžné pocínované zvonkové dráty o průřezu 0,8 mm². Pokud bychom použili necínované vodiče, vliv skin efektu se ještě více omezí a kabel bude přenášet vyšší kmitočty až příliš mnoho, což se zejména u větších délek kabelů může projevit jakoby nedostatkem basů. Nevýhodou této metody je, že pro tento způsob připojení musí být reproboxy již připraveny a to s sebou přináší jisté náklady navíc. Tyto náklady však nejsou ani zdaleka tak velké, jako použití kvalitních kabelů s velkým průřezem. Od uživatelů vyžadují i jistou technickou znalost, aby ji dokázali zcela využít.

Protože se tyto kabely běžně nevyrábějí a tato možnost připojení je jistě pro mnoho zájemců velmi zajímavá, uvedu v příštím díle praktický návod, jak takový kabel vyrobit.

(Dokončení příště)