

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta



Měření kabelů a konektorů v audiotechnice

Bakalářská práce

František Havel

školitel: Ing. Ladislav Ptáček

České Budějovice 2012

Bibliografické údaje

Havel F., 2012: Měření kabelů a konektorů v audiotechnice.

[Measurement cables and connectors for audio. Bc. Thesis, in Czech.] – 55 p., Faculty of Science, The University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace:

Bakalářská práce se věnuje návrhu a praktické realizaci komplexního testu pro měření a porovnání vlastností audio kabelů a konektorů využívaných v audiotechnice. Součástí práce je teoretická část, která se zabývá signálem, zvukem, kabely a konektory a použitými metodami měření. V praktické části jsou výsledky měření nástrojových kabelů širokého cenového rozpětí a jejich srovnání. Zkoumanými parametry jsou: elektrický odpor kabelu, jeho kapacita, indukčnost. Dále byl zkoumán vliv kabelu na přenos signálu pomocí frekvenční analýzy. Byla vytvořena přehledová tabulka, která shrnuje zjištěné poznatky.

Klíčová slova: signál, propojení, nástrojový kabel, RCA, TRS, XLR

Annotation:

This thesis deals with design and practical implementation of a comprehensive test for measuring and comparing the performance of audio cables and connectors used in audio technology. The theoretical work is the part that deals with the signal, sound, cables and connectors and methods of measurement used. In the practical part are results and comparison of wide price range instrumental cable. Studied parameters are: the electrical resistance of the cable, the capacity and inductance. Was also been studied the affect of the cable using frequency analysis. It was created overview table, which summarizes the findings.

Key words: signal, interconnection, instrument cable, RCA, TRS, XLR

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 25. 4. 2012

.....

František Havel

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Ladislavu Ptáčkovi za odborné vedení, věcné připomínky a zapůjčení testovaných kabelů Planet Waves, Monster a Evidence. Dále bych chtěl touto cestou poděkovat firmě MELODIE - audio - video - hifi České Budějovice za poskytnutí vzorků kabelů a konektorů pro vytvoření vlastní fotodokumentace. Také děkuji Jaroslavu Smrčkovi za podnětné rady.

Obsah

Úvod	7
I. TEORETICKÁ ČÁST.....	8
1. Signál.....	8
1.1. Definice	8
1.2. Dělení signálů.....	8
1.3. Harmonický signál	9
1.3.1. Globální charakteristiky obecného periodického signálu	10
1.3.2. Globální charakteristiky harmonického signálu.....	11
2. Zvuk	12
2.1. Podstata zvuku a jeho šíření.....	12
2.2. Zvuk ve formě elektrického signálu.....	13
2.2.1. Spektrum zvukového signálu	14
2.2.2. Veličiny popisující audio signál	16
2.2.3. Přenos signálu.....	17
2.3. Digitální zpracování zvuku	18
3. Vedení a propojování v audiotechnice	20
3.1. Signálové vedení	20
3.1.1. Nesymetrické vedení	20
3.1.2. Symetrické vedení	21
3.2. Výkonové vedení	22
4. Kabely a konektory	24
4.1. Náhradní schéma kabelu	24
4.2. Konstrukce kabelů a konektorů.....	25
4.2.1. Materiály	25
4.2.2. Konstrukční uspořádání.....	27
4.2.3. Zapojení kabelů	30
5. Metody měření	32
5.1. Měření elektrických parametrů kabelů.....	32
5.1.1. Měření odporu	32
5.1.2. Měření kapacity	34
5.1.3. Měření indukčnosti.....	34
5.2. Měření osciloskopem	35
5.2.1. Měření fázového posunu signálu.....	36
5.2.2. Vizuální zhodnocení vlivu kabelu na tvar signálu	37
5.3. Měření přenosové charakteristiky	37
5.4. Použité přístroje	38

II. PRAKTICKÁ ČÁST	40
6. Měřené kabely	40
7. Výsledky měření.....	42
7.1. Parametry kabelu.....	42
7.1.1. Odpor.....	42
7.1.2. Kapacita.....	42
7.1.3. Indukčnost	43
7.2. Parametry přeneseného signálu.....	44
7.2.1. Fázový posun.....	44
7.2.2. Přenosové charakteristiky.....	44
7.2.3. Rozdíl signálů.....	47
7.3. Přehled výsledků	48
8. Diskuze.....	50
9. Závěr	52
10. Seznam použité literatury	53
11. Seznam příloh.....	55

Úvod

Motivací k výběru tématu mé bakalářské práce „Měření kabelů a konektorů v audiotechnice“ byl můj kladný vztah k hudbě, hudebním nástrojům a tedy i k audiotechnice. Od dětství jsem byl rodiči veden k hudbě, přičemž dovednost hry na hudební nástroj byla vždy prioritou. Od pěveckých sborů a přes dechové nástroje v dětství jsem později našel cestu k působení v rockové kapele jako bubeník. V souvislosti s touto zálibou jsem měl možnost se pravidelně setkávat s audiotechnikou a poznávat komponenty, jako jsou kytarové zesilovače, komba, kytarové efekty a dále možnosti jejich zapojování. Kytary a kytarová technika jsou mi o to bližší, jelikož můj bratr na kytaru hraje a vlastní kytarový aparát. Kvalitu audio kabelů jsem vždy posuzoval výhradně podle mechanického zpracování. Výrazné rozdíly v cenách jednotlivých kusů mě vedly k úvahám, proč tomu tak je.

Bakalářská práce je rozdělena na dvě části. Teoretická část je zaměřena na základní pojmy, týkající se signálu obecně a dále zvuku jak ve formě mechanického vlnění, tak v podobě elektrického signálu a jeho digitálního zpracování. Podrobněji se zabývá kabely, konektory a jejich konstrukcí. Dále jsou zde popsány metody měření elektrických vlastností kabelů a měření vlivu kabelu na přenos signálu.

V praktické části jsou popsány výsledky měření osmi nástrojových kabelů. Na základě výsledků měření jsou kabely objektivně porovnány. V závěrečné diskusi jsou praktická doporučení pro výběr kytarového kabelu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1. Signál

1.1. Definice

Slovo signál je velice obecný pojem a najít přesnou definici není snadné. Latinské slovo *signum* se překládá jako znamení, znak, pokyn. Můžeme tedy říci, že signál je nositelem informace, šíří se v prostředí (mechanické, elektrické, sociální apod.) a čase. Signál může například být:

- Elektromagnetický: proud, napětí, magnetické pole
- Optický: vlnová délka (barva) světla, intenzita
- Mechanický: síla, rychlost, zrychlení
- Akustický apod.

„Každý pokus o popis skutečně existujícího signálu v matematické nebo grafické formě vede na tvorbu jeho modelu. Analýzou modelu pak zjišťujeme vlastnosti skutečného signálu více či méně přesně podle toho, s jak přesným modelem pracujeme.“ (1 str. 1)

1.2. Dělení signálů

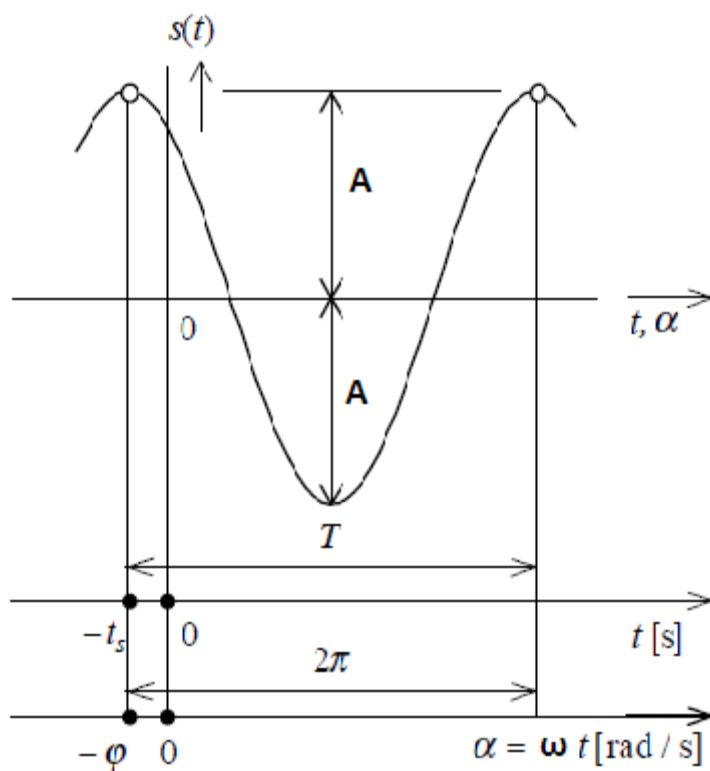
Signály mohou být spojité nebo diskrétní v čase a v hodnotách. Spojité signály v čase mění své hodnoty v jakémkoli okamžiku, diskrétní signály pouze v určitých časových intervalech. Signály souvislé (spojité) v hodnotách mohou nabývat nekonečného množství úrovní a opakem jsou signály diskrétní v hodnotách, neboli kvantované. Signály se souvislým časem a souvislé v hodnotách se nazývají analogové. Digitální signály jsou v diskrétních časech kvantovány. Pokud nebude uvedeno jinak, dále budeme signálem myslet jeho analogovou podobu. Dalším kritériem dělení signálů je doba jejich trvání (nekonečné, jednorázové). Specifickým typem periodických signálů s nekonečnou dobou trvání jsou harmonické signály. (1)

1.3. Harmonický signál

Nejjednodušším signálem je periodický harmonický signál, matematicky popsaný funkcí sinus nebo kosinus. Okamžitou hodnotu signálu můžeme vypočítat ze vzorce

$$A(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + \varphi), \quad (1.1)$$

kde A je amplituda signálu, f [Hz] je frekvence, t [s] je čas a φ [rad] je fázový posuv. Argument funkce sinus je okamžitá fáze signálu. (2)



Graf 1.1 Harmonický signál a jeho základní parametry, převzato a upraveno z (1)

Z grafu 1.1 vyplývá, že nezávislou proměnnou signálu je buď úhel α [rad], nebo čas t . Periodu T [s] je tedy možno vyjádřit v úhlových jednotkách (2π radiánů neboli 360°), nebo v časových jednotkách (T sekund). Přepočtení souřadnic časové a úhlové osy je podle přímé úměrnosti

$$\alpha = \frac{2\pi}{T}t = \omega t, \quad (1.2)$$

kde T [s] je perioda, t [s] je čas a ω [rad/s] je úhlová frekvence, udávající počet period za sekundu, pro kterou platí

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}. \quad (1.3)$$

S využitím rovnice(1.2)můžeme přepočítávat časový posuv t_s na počáteční fázi φ a naopak (vizGraf 1.1):

$$t_s = \frac{\varphi}{\omega}, \quad \varphi = \omega \cdot t_s. \quad (1.4)$$

1.3.1. Globální charakteristiky obecného periodického signálu

Střední hodnota za jednu periodu

$$S_0 = \frac{1}{T} \int_T s(t) dt \quad [\text{jednotka signálu}]. \quad (1.5)$$

Střední hodnota části signálu T_C

$$S_C = \frac{1}{T_C} \int_{T_C} s(t) dt \quad [\text{jednotka signálu}]. \quad (1.6)$$

Efektivní hodnota (druhá odmocnina ze středního výkonu)

$$S_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T s^2(t) dt} = \sqrt{P}.$$

(1.7)

Dosažením rovnice (1.1) do rovnic (1.5), (1.6) a (1.7) dostaneme globální charakteristiky pro harmonický signál.(1)

1.3.2. Globální charakteristiky harmonického signálu

Střední hodnota za jednu periodu

$$S_0 = 0.$$

(1.8)

Střední hodnota kladné půlvlny

$$S_+ = \frac{2}{\pi} A.$$

(1.9)

Efektivní hodnota

$$S_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} A.$$

(1.10)

2. Zvuk

2.1. Podstata zvuku a jeho šíření

Obrázek 2.1 Zhuštění a zředění částic při vzniku zvukové vlny

Zvuk se šíří pomocí zvukových vln postupujících prostorem, například vzduchem. Tyto vlny jsou tvořeny zředováním a zhušťováním hmotných částic v tomto prostoru, přičemž vzdálenost míst maximálně a minimálně zhuštěných částic je nazývána délka zvukové vlny a značena je řeckým písmenem λ [m]. Vlnovou délku můžeme určit vztahem

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.1)$$

kde c [m/s] je rychlost zvuku v daném prostředí. Tabulka 2.1 uvádí několik příkladů rychlostí zvuku v některých prostředích. Rychlost šíření zvuku vypočítáme podle

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (2.2)$$

kde K je modul objemové pružnosti a ρ [kg/m³] je hustota prostředí. (3) (4)

Prostředí	v [m/s]	Prostředí	v [m/s]	Prostředí	v [m/s]
Plyny (0°C)		Pevné látky (0°C)		Kapaliny (20°C)	
Vzduch	331	Hliník	6420	Voda (0°C)	1402
Vzduch	343	Ocel	5941	Voda	1482
Helium	965	Žula	6000	Mořská voda	1522
Vodík	1284				

Tabulka 2.1 Rychlost zvuku, převzato a upraveno z (4)

Změny tlaku proti tlaku prostředí vznikající při zředování a zhušťování částic jsou nazývány akustický tlak p [Pa]. V praxi se příliš nepoužívá okamžitých hodnot akustického tlaku, častěji se užívá efektivní hodnota, nebo hladina akustického tlaku

L [dB], vztažená k referenční hodnotě $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ [Pa]. Hladina akustického tlaku se vypočítá podle

$$L = 20 \log \frac{p}{p_0}. \quad (2.3)$$

Celkový rozsah hladiny akustického tlaku je od 0 dB (práh citlivosti ucha při 1 kHz, vzdálenosti 1 m) až po 130 dB (práh bolestivosti). Více o jednotce dB viz kapitola 2.2.2.

Částice v prostředí kmitají kolem rovnovážné polohy určitou rychlostí, zvanou akustická rychlost v [m/s]. Součinem akustického tlaku a akustické rychlosti dostaneme intenzitu zvuku I [W/m^2], která udává akustickou energii procházející jednotkou plochy za 1 s. Intenzitu zvuku odvodíme podle

$$I = pv \cos \varphi, \quad (2.4)$$

kde φ [rad] je fázový posuv mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí. Akustický výkon P [W] je akustická energie, která projde plochou S [m^2] za sekundu. (3)

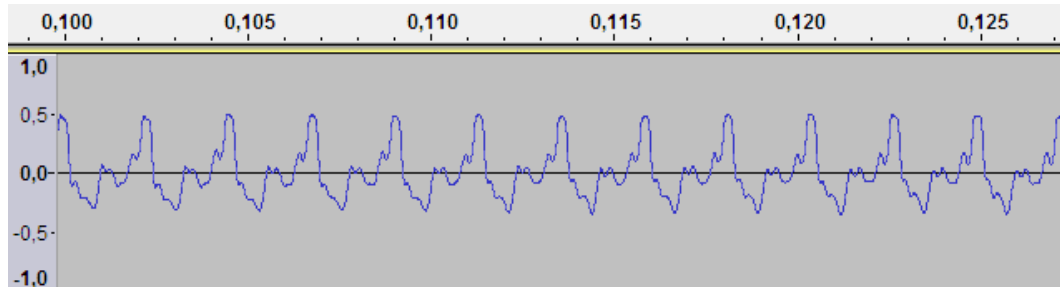
Lidský sluch vnímá zvuk ve frekvenčním pásmu od 20 Hz do 20 kHz, které nazýváme slyšitelné. Každý jedinec má individuální rozsah, který je schopen slyšet. Horní hranice tohoto rozsahu se s rostoucím věkem zpravidla snižuje. Zvuky pod 20 Hz nazýváme infrazvuky, zvuky nad hranicí 20 kHz ultrazvuky. Nejvíce je lidský sluch citlivý v pásmu kolem 3 kHz, protože právě v této oblasti se vyskytuje lidský hlas.

2.2. Zvuk ve formě elektrického signálu

Abychom mohli zvuk přenášet na delší vzdálenosti nebo abychom mohli provádět operace, jako zesílení, míchání a nahrávání apod., je nutné převést zvuk na elektrický signál. K tomuto převodu se používá akusticko-elektrický měnič, tedy mikrofon. Princip převodu závisí na použitém mikrofonu. Důležitý je tvar výstupního signálu. Uvažujeme-li ideální mikrofon, tvar elektrické vlny (napětí) je přesně stejný, jako tvar původní akustické vlny. (5)

2.2.1. Spektrum zvukového signálu

Základní zobrazení zvukové vlny je zobrazení v časové doméně (Graf2.1). Toto zobrazení přímo odpovídá průběhu úrovně napětí v čase. Nevýhodou časového zobrazení je fakt, že z něj nevyčteme jednotlivé frekvenční složky zvukového signálu.



Graf2.1 Časový rozvoj vzorku - trumpana, tón a (vzorek ve formátu mp3)

Každý periodický signál se skládá ze stejnosměrné a střídavé složky. Stejnosměrná složka je právě střední hodnota signálu. Střídavou složku signálu tvoří harmonické signály s nulovou střední hodnotou. První harmonická má stejnou frekvenci, jako původní periodický signál a vyšší harmonické, kterých je obecně nekonečně mnoho, mají vždy celočíselný násobek první harmonické frekvence (viz Graf 2.2); platí tedy

$$f_k = k \cdot f_0, \tag{2.5}$$

kde $k = 1, 2, 3 \dots$

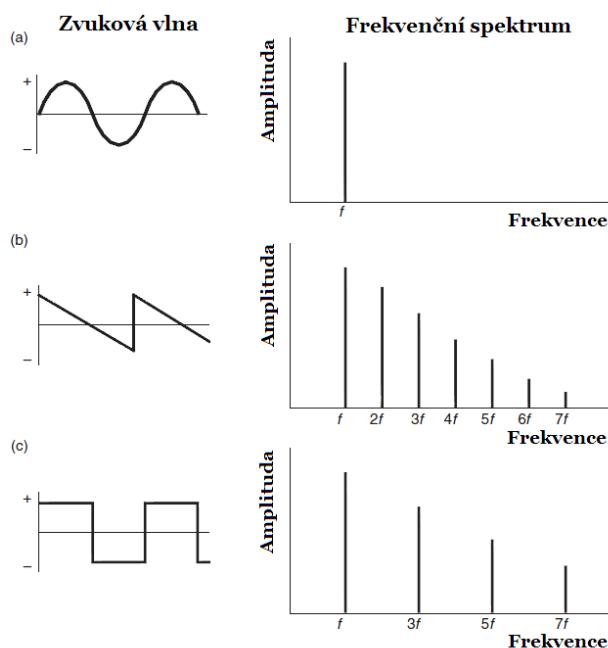
Toto tvrzení se dá matematicky zapsat pomocí Fourierovi řady:

$$\begin{aligned} s_p(t) &= S_0 + S_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + S_2 \cos(\omega t + \varphi_2) + \dots + S_k \cos(k\omega t + \varphi_k) + \dots = \\ &= S_0 + \sum_{k=1}^{\infty} S_k \cos(k\omega t + \varphi_k), \end{aligned} \tag{2.6}$$

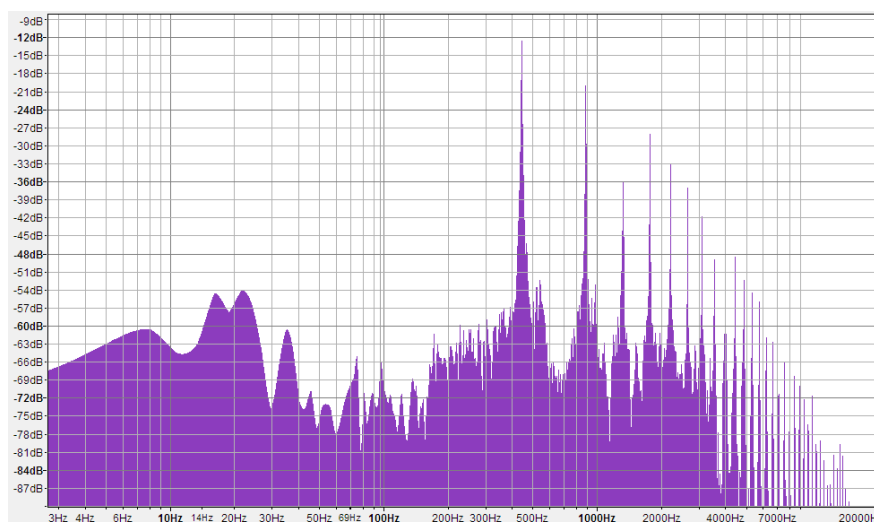
kde $S_p(t)$ je periodický signál, S_k je amplituda k -té harmonické složky, $k\omega$ je kruhová frekvence k -té harmonické složky a φ_k je počáteční fáze k -té harmonické složky. (1)

Spektrum signálu je grafické zobrazení rozkladu signálu na jednotlivé harmonické složky, jejichž sečtením opět vznikne původní signál. Audio spektrum

zobrazujeme ve slyšitelném pásmu 20 Hz až 20 kHz, přičemž se frekvence vyobrazuje na vodorovnou osu. V grafu 2.3 je příklad amplitudového spektra. V tomto případě odpovídá délka spektrální čáry amplitudě odpovídající harmonické složky. Ve fázovém spektru je na svislé ose vynesena počáteční fáze. (6)



Graf 2.2 Frekvenční spektra jednoduchých zvukových vln, převzato a upraveno z (5); a) sinusová vlna se skládá pouze z jedné základní frekvence; b) pilová vlna se skládá ze základní frekvence a jejích celočíselných násobků; c) čtvercová vlna se skládá ze základní frekvence a jejích lichých celočíselných násobků



Graf 2.3 Spektrum vzorku - trumpeta, tón a (vzorek ve formátu mp3)

Audio signál můžeme zobrazit dvěma různými způsoby. Tato dvě rozdílná zobrazení (v oblasti času, v oblasti frekvence) se vzájemně převádějí pomocí Fourierovy transformace. Spektrum signálu nemusí vždy obsahovat špičky. Je tomu tak v případě, že zobrazujeme signál čistě náhodný (šum).

2.2.2. Veličiny popisující audio signál

Frekvence f [Hz] vyjadřuje počet kmitů za vteřinu. S frekvencí úzce souvisí perioda T [s]. Perioda je časový interval, za který proběhne jeden kmit. Mezi frekvencí a periodou platí

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2.7)$$

Fázový posuv mezi dvěma stejnými signály ve stupních nebo radiánech značíme řeckým písmenem φ . Amplitudu zvukové vlny představuje v elektrické formě signálu elektrické napětí U [V]. Často je při popisování signálu vhodnější místo užití absolutních hodnot, jako je napětí ve voltech nebo výkon ve wattech, hodnota poměru jednoho signálu k druhému. K vyjádření tohoto poměru se užívá bezrozměrná logaritmická jednotka decibel (dB). Její logaritmický průběh je vhodný z důvodu, že člověk nevnímá intenzitu zvuku lineárně a také z důvodu, že logaritmický rozsah snáze pokrývá velice malá i velice velká čísla (viz Tabulka 2.2). Hodnotu v decibelech určíme pro dva výkony P_1 a P_2 podle

$$dB = 10 \log \frac{P_1}{P_2}. \quad (2.8)$$

Například dvojnásobné zesílení výkonu znamená nárůst o 3 dB, dvojnásobné zeslabení znamená pokles o 3 dB. U napětí musíme brát v úvahu vztah mezi napětím a výkonem

dB	Výkonový poměr
100	10000000000
90	1000000000
80	100000000
70	10000000
60	1000000
50	100000
40	10000
30	1000
20	100
10	10
0	1
-10	0,1
-20	0,01
-30	0,001
-40	0,0001
-50	0,00001
-60	0,000001
-70	0,0000001
-80	0,00000001
-90	0,000000001
-100	0,0000000001

Tabulka 2.2 Příklad stupnice poměru výkonu a ekvivalentu v dB

$$P = \frac{U^2}{R}. \quad (2.9)$$

Odtud platí

$$dB = 10 \log \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 \quad (2.10)$$

neboli

$$dB = 20 \log \frac{U_1}{U_2}. \quad (2.11)$$

Dvojnásobné navýšení napětí tedy znamená navýšení o 6 dB. (5)

2.2.3. Přenos signálu

„Jestliže signál do nějakého zařízení vstupuje a opět z něj - zpravidla ve více či méně pozměněné podobě - opět vystupuje, hovoříme o přenosu signálu.“ (2 str. 167)

Změny v přenosovém systému určují, zda je systém lineární nebo nelineární. Pro přenos v lineárním systému platí, že mezi vstupním a výstupním signálem je proporcionální závislost (vynásobením vstupního signálu dojde k vynásobení výstupního signálu stejnou hodnotou). Pro tento systém platí také princip superpozice (odezva na součet dvou signálů je rovna součtu odezev na tyto signály působící samostatně). Většina reálných systémů jsou nelineární, ale nelinearita je v řadě případů zanedbatelná, proto se dají tyto systémy zkoumat v rámci jednoduchého lineárního modelu. (1)

Chceme-li zkoumat přenos signálu v určitém přenosovém řetězci nebo jeho části, zajistíme, aby do tohoto vstupoval signál, který je nám známý (již analyzovaný signál nebo signál z generátoru). Na výstupu sledujeme určité změny. V časové doméně pozorujeme změny amplitudy, případně tvaru vlny. Ve frekvenčním spektru můžeme vypořadovat změny závislé na frekvenci.

2.3. Digitální zpracování zvuku

Pojem digitalizace obecně vyjadřuje převod analogového signálu do digitální podoby. Základní převod probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku dochází k tzv. vzorkování v reálném čase, tedy odebírání vzorků signálu v konstantních časových intervalech. V této fázi se z časově spojitého signálu stává signál diskrétní v čase. Minimální vzorkovací frekvenci určíme pomocí Nyquistova nebo Shannon - Kořelnikova teorému:

$$f_S = 2,2 \cdot f_M, \quad (2.12)$$

kde f_S je vzorkovací frekvence a f_M je frekvence měřeného signálu.(7)

Následuje kvantování vzorků, při kterém se pomocí A/D převodníku převedou spojité úrovně signálu na binární číslo, přičemž toto číslo má konečný rozsah, který odpovídá rozlišení převodníku M [bit].Počet N úrovní se vypočítá ze vztahu

$$N = 2^M. \quad (2.13)$$

Můžeme také určit napěťové rozlišení U_Q [V/bit], které odpovídá nejnižší možné změně napětí, která se projeví jako změna hodnoty digitálního čísla o jeden kvantovací krok odpovídající tzv. nejméně významnému bitu (LSB - least significant bit) a to ze vztahu

$$U_Q = \frac{U_{FSR}}{N} = \frac{U_{max} - U_{min}}{N}, \quad (2.14)$$

kde U_{FSR} [V] je maximální rozsah vstupního napětí převodníku. Binární číslo B určíme vztahem

$$B = \text{round} \left(\frac{U_1}{U_{REF}} \cdot 2^N \right), \quad (2.15)$$

kde round je funkce zaokrouhlení, U_1 [V] je vstupní napětí, které se může měnit v rozsahu 0 až U_{FSR} a U_{REF} [V] je referenční stejnosměrné napětí. Vlivem zaokrouhlení

vzniká kvantizační chyba, jejíž velikost se pohybuje v intervalu $-0,5$ až $+0,5$ kvatizačního kroku.(8)

3. Vedení a propojování v audiotechnice

K propojování jednotlivých zařízení v přenosovém řetězci se používá nepřeberné množství různých druhů kabelů, které mají podle druhu použití splňovat dané požadavky. Hlavním z nich, podle kterého dělíme kabely, je požadavek na přenesený výkon. Podle tohoto dělíme vedení na signálové a výkonové. V oblasti signálového vedení můžeme mluvit o symetrickém a nesymetrickém vedení. Podle těchto - i jiných (pevnost spoje, rozměrové možnosti apod.) - aspektů jsou použity různé druhy konektorů (viz kapitola 4).

Hlavní elektrické parametry, které mohou ovlivnit kvalitu přenosu, jsou elektrický odpor, indukčnost a kapacita, přičemž všechny se vztahují k délce kabelu (9).

3.1. Signálové vedení

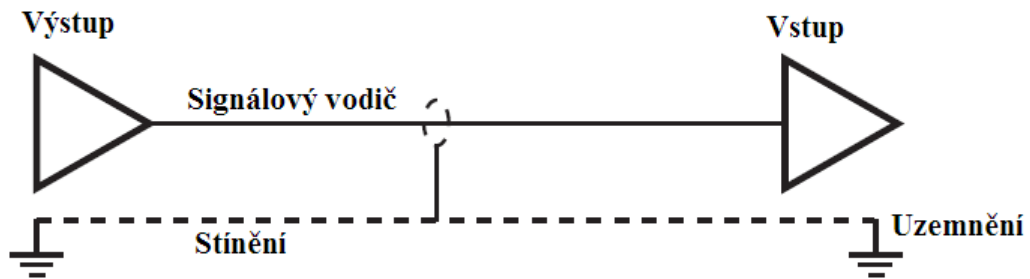
Napětíová úroveň v této části řetězce je pro mikrofonní signál v rozmezí řádově od desítek μV po desítky mV . Proto každé naindukované napětí z okolí kabelu může znamenat ztrátu schopnosti věrně přenést informaci. U signálového vedení proto věnujeme největší pozornost tomu, aby toto naindukované napětí - rušení - bylo co nejmenší. Tomu odpovídá i konstrukce kabelů samotných, ve kterých zpravidla tvoří jeden z vodičů tzv. opletení, které se nazývá stínění.

U kabelů tohoto typu nezáleží tolik na elektrickém odporu vodiče, spíše však záleží na velikosti kapacity vztažené na jednotku délky. Vyšší kapacita se projevuje potlačením vyšších kmitočtů. Z toho důvodu musíme dodržet rozumnou délku signálového kabelu. (10)

3.1.1. Nesymetrické vedení

Tento typ vedení se používá všude tam, kde nehrozí znehodnocení přenášeného signálu rušením, kde není kladen tak vysoký důraz na věrnost přenosu, nebo kde by použití symetrie bylo příliš komplikované. Takovým příkladem mohou být neprofesionální aplikace, kde převládá požadavek nízké ceny, nebo například propojení kytary (kytarového snímače) se zesilovačem. Bylo by totiž nutné zajistit napájení obvodů v kytarě. Schéma zapojení takového vedení je na obrázku 3.1. Zapojení sestává

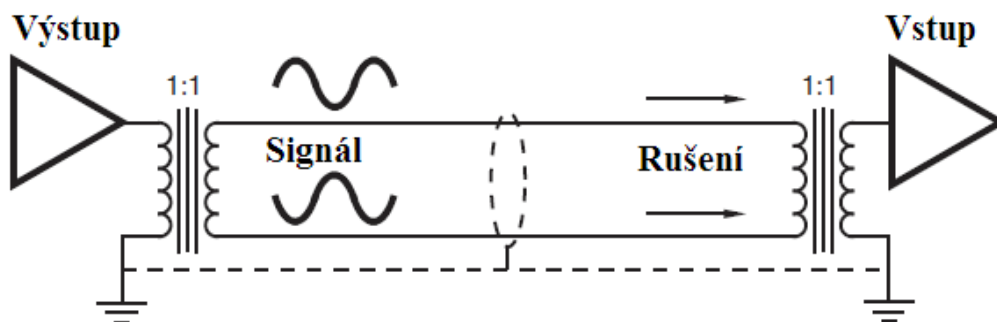
ze signálového vodiče (SEND) a zemnicího vodiče (RETURN) opleteném kolem signálového, které zabraňuje pronikání rušivých elektromagnetických vln (5).



Obrázek 3.1 Jednoduché propojení nesymetrického vedení, převzato a upraveno z (5)

3.1.2. Symetrické vedení

Symetrická vedení lépe odolávají pronikání elektromagnetického rušení. Jak můžeme vidět na obrázku 3.2, kabel se skládá z páru vnitřních vodičů, tvořících cesty HOT (+) a COLD (-), opletených stíněním, které není součástí přenosového obvodu (zapojeno na zem). HOT a COLD vedou totožný signál, ovšem s opačnou fází. (5)

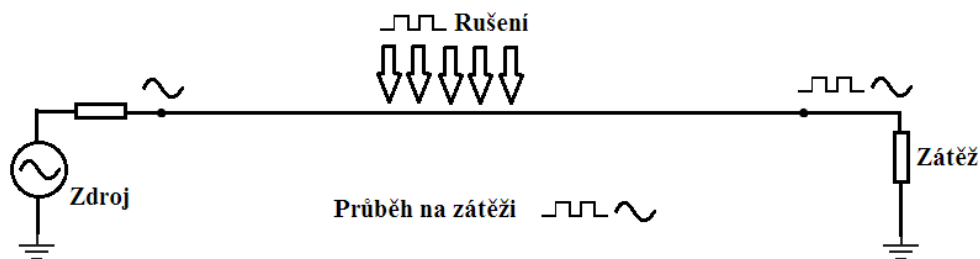


Obrázek 3.2 Symetrické propojení pomocí transformátorů, převzato a upraveno z (5)

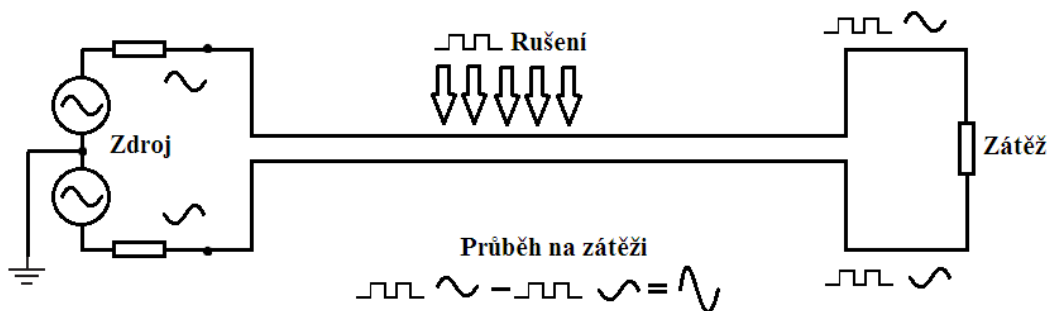
V tomto případě se rušení, které pronikne přes stínění, indukuje na obě živé větve kabelu souhlasně. Při zpětném převodu ve vstupním transformátoru se přenáší signál, který je opačný, souhlasný je naopak potlačen. V praxi však naindukované rušení není potlačeno úplně. Stupeň potlačení souhlasného signálu (Common-Mode Rejection Ratio - CMRR) se udává v dB. Zde platí čím vyšší číslo, tím lépe. Ve většině případů symetrického vedení se dosahuje symetrie pomocí rozdílových zesilovačů místo audio transformátorů. Toto řešení je vhodné kvůli své nižší ceně a také proto, že může být signál při průchodu oddělovacím transformátorem ovlivněn. Nesporná výhoda transformátoru však je, že elektricky odděluje vstup od výstupu. (6)

Symetrická vedení jsou tedy používána pro propojování profesionálních audio zařízení. Díky své odolnosti vůči rušení mohou být připojeny mikrofony produkující signál v řádech milivoltů na vzdálenosti několika až desítek metrů. (5)

Rozdíl mezi nesymetrickým a symetrickým zapojením je zřejmý z obrázků 3.3 a 3.4. V obou případech se v části vedení indukují rušení (obdélkový signál). To se však v případě symetrického vedení odečítá od užitečného signálu (sinusový signál).



Obrázek 3.3 Sběr rušení v nesymetrickém vedení, převzato a upraveno z (6)



Obrázek 3.4 Potlačení rušení v symetrickém zapojení, převzato a upraveno z (6)

3.2. Výkonové vedení

Výkonové vedení propojuje zesilovače s reproduktorovými soustavami. Konstrukce kabelů se výrazně liší od signálových. Zatímco signálové kabely je nutné chránit proti vnikání rušení, u reproduktorových kabelů nutnost stínění díky tomu, že přenášejí vyšší výkony, odpadá. Důležitým parametrem však je elektrický odpor vodiče, který působí jako zátěž pro zesilovač. Ten musí být co nejmenší. Elektrický odpor R [Ω] vodiče vypočítáme ze vztahu

$$R = \frac{\rho l}{S},$$

(3.1)

kde ρ je materiálová konstanta - měrný elektrický odpor, l [m] je délka a S [m²] je průřez vodiče. Proto volíme raději kratší kabely o větším průřezu. Podle (9) je maximální délka kabelu dána vztahem

$$l_{max} = \frac{SZ_R}{2},$$

(3.2)

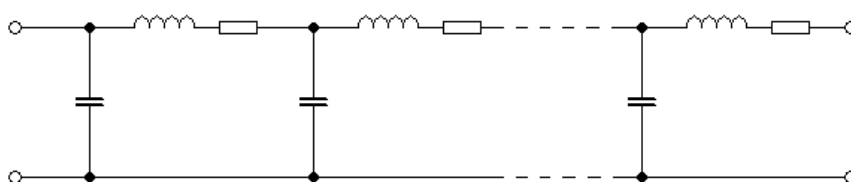
kde S [mm²] je průřez vodiče a Z_R [Ω] je minimální impedance reproduktorové soustavy.

Proud o vyšších frekvencích audio signálu se prakticky přenáší po povrchu vodiče. Tomuto jevu se říká povrchový jev, skin-efekt (z anglického skin = povrch, pokožka). Aby nedocházelo ke ztrátám v této části audio spektra, zvětšuje se povrch vodiče spletením několika malých drátků, které tvoří žílu kabelu. Pro dosažení ještě vyšší vodivosti bývá u některých dražších kabelů povrch dílčích drátků postříbřen. (11)

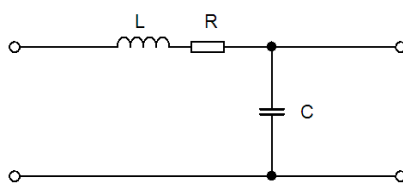
4. Kabely a konektory

4.1. Náhradní schéma kabelu

Pro sledování vlivu kabelu na přenášený signál byl definován model kabelu jako obvod se soustředěnými parametry. Takový obvod je na obrázku 4.1 a zjednodušený je na obrázku 4.2.



Obrázek 4.1 Náhradní schéma kabelu, převzato a upraveno z (2)



Obrázek 4.2 Zjednodušené náhradní schéma kabelu, převzato a upraveno z (2)

„V tomto modelu je vliv kabelu na přenos dán tím, že na podélné složce jeho impedance (sériové spojení odporu a indukčnosti) vzniká úbytek napětí zatížením impedancí obecné zátěže (reproduktor, zesilovač apod.) k níž je paralelně zapojena kapacita kabelu. Kabel je tedy charakterizován třemi parametry, 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 délkovou jednotku kabelu, např. na jeden metr.“ (2 str. 189)

Odpor kabelu je dán odporem vodiče, který je nepřímo úměrný průřezu a měrné vodivosti materiálu vodiče (viz rovnice 3.1). Na výrobu vodičů určených pro audio aplikace se téměř výhradně používá měď. O něco vyšší měrnou vodivost má stříbro, které se někdy používá na potažení vodičů. Jeho použití jako vodiče je z ekonomických důvodů nevhodné. Indukčnost kabelu roste se vzájemnou vzdáleností a s klesajícím průřezem vodičů. U kapacity je to opačně - s rostoucím průřezem zvětšujeme plochu „desek“ kondenzátoru a kapacita roste. Ta roste i přibližováním těchto vodičů. Dále má

velmi podstatný vliv na kapacitu použitý materiál izolace, který zastává roli dielektrika kondenzátoru. Pro kapacitu platí vztah

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d}, \quad (4.1)$$

kde ε_0 je permitivita vakua, ε_r je relativní permitivita dielektrika, $S[\text{m}^2]$ je plocha deseka d [m] je vzdálenost desekkondenzátoru. (2) (9) (4)

Pro nás je důležité to, že tyto parametry jsou snadno měřitelné. Metody měření jsou popsány v kapitole 5.1.

Při konstrukci kabelu se vždy hledá kompromis mezi odporem s indukčností na jedné straně a kapacitou na druhé straně. U signálových kabelů volíme pokud možno nízkou kapacitu, která zapojená paralelně k výstupní impedanci představuje filtr typu dolní propust. Na kmitočtovou charakteristiku reproduktorových kabelů kapacita takový vliv nemá, protože výstupní impedance zesilovačů je dostatečně malá. Pouze v některých případech (zesilovače s výkonovými prvky MOS - FET) může nadměrná kapacita kabelu vést k nestabilitě zesilovače na frekvencích vysoko nad slyšitelným pásmem, která vede ke zhoršení zkreslení zesilovače ve slyšitelném pásmu. Důraz klademe na nízký odpor a indukčnost kabelu kvůli výkonovým ztrátám. (11)(12)

4.2. Konstrukce kabelů a konektorů

4.2.1. Materiály

Celková kvalita kabelů a konektorů do jisté míry ovlivňuje kvalita použitých materiálů. Ta se odvíjí od vlastností materiálu samotného a také od toho, jak byl materiál zpracován. (13)

Měď

Měď patří k nejpoužívanějším kovům v audiotechnice a v elektrotechnice vůbec. Má dobrou elektrickou (i tepelnou) vodivost, je snadno tvárná, pájitelná a svařovatelná. Vodivost je ovlivňována příměsemi a mechanickým zpracováním. Tváření za studena snižuje vodivost mědi z důvodu porušení mřížky. (14)

Díky těmto vlastnostem je nejčastěji měď užívána jako vodivá žíla v kabelu. Na kontaktní plochy není vhodná, protože je měkká a nestálá.

Běžná elektrovedná měď obsahuje mimo měděných krystalů i oxidy kyslíku. Protože, jak tvrdí (13), při průchodu signálu vodičem vzniká na hranicích krystalů mědi a oxidů nelineární zkreslení, vyrábí se takzvaná bezkyslíkatá měď (OFHC - Oxygen-Free High-Conductivity, OFC - oxygen-free copper). Podle (2) však měřitelný rozdíl nelinearity kyslíkaté a bezkyslíkaté mědi nepřesahuje jedno procento.

Zlato

Zlato se díky své stálosti používá k potažení stykových ploch konektorů. Na povrchu zlata nevznikají oxidy a sulfidy a to ani v agresivním prostředí. Případné oxidy na styčných plochách skutečně způsobují zkreslení. Na obrázku 4.3 je fotografie zlaceného konektoru CINCH. (14)



Obrázek 4.3 Pozlacený konektor CINCH - samec

Stříbro

Je to kov světlešedé barvy s nejvyšší vodivostí. Používá se jako potahová vrstva u reproduktorových kabelů k eliminaci rostoucího odporu s frekvencí vznikajícím v důsledku skin-efektu. Můžeme se ale také setkat s kabely, jejichž vodiče jsou celostříbrné. Ceny takových kabelů se pohybují až v desítkách tisíc korun za metr.



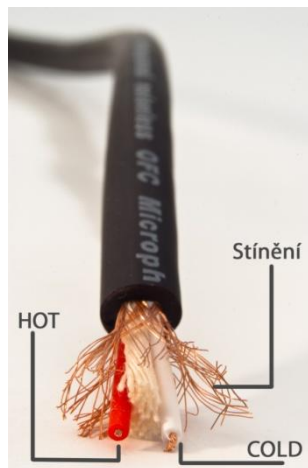
Obrázek 4.4 Postříbřená lanka reproduktorového kabelu

Izolační materiály - dielektrika

Izolační materiály musejí splňovat několik základních vlastností. Protože izolace kabelu tvoří dielektrikum mezi vodiči, je důležité, aby permitivita použitého dielektrika byla pokud možno co nejnižší. Permitivita se dá snížit přidáním vzduchu do dielektrika, to znamená použitím pěny. Izolace kabelu slouží také jako ochrana proti mechanickému poškození kabelů. Ta je u dražších kabelů provedena textilním opletem. Mezi nejčastěji používaná dielektrika patří PVC (polyvinylchlorid), polyetylen, polypropylen nebo teflon.

4.2.2. Konstrukční uspořádání

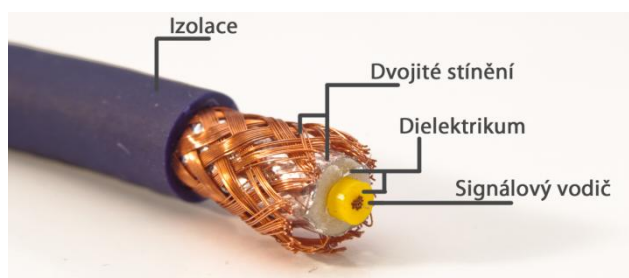
Symetrický kabel



Obrázek 4.5 Uspořádání symetrického kabelu

Na obrázku 4.5 je symetrický mikrofonní kabel se dvěma živými vodiči z OFC mědi. Stínění je tvořeno měděným opletem a pro zlepšení mechanických vlastností obsahuje jádro textilní vlákna.

Nesymetrický kabel



Obrázek 4.6 Uspořádání nesymetrického signálového kabelu

Na obrázku 4.6 je konstrukční uspořádání nesymetrického kabelu který patří mezi kvalitnější na trhu. Oproti uvedenému symetrickému má dvojitě stínění realizováno hustším měděným opletem a hliníkovým plíškem. Bílé dielektrikum zajišťuje větší vzdálenost signálového vodiče od stínění, přičemž permitivita tohoto izolantu je snížena vzduchovými bublinami. Žluté díky své lepší mechanické odolnosti pomáhá chránit signálový vodič před mechanickým poškozením.

Reproduktorový kabel

Reproduktorovým kabelem protéká větší proud, proto má větší průřez než signálový. Pro lepší vodivost i ve vyšších frekvencích se vodič skládá z postříbřených vláken stočených do lanka. Kvůli dodržení správné polariry bývají jednotlivé žíly barevně rozlišeny například červeným pruhem, v případě obrázku 4.7 je to průhledná izolace.



Obrázek 4.7 Reproduktorový kabel

Konektor JACK (TRS, TS, TRRS)

Konektor byl zaveden před více než 100 lety pro přepojování telefonních linek v ústřednách a je dodnes hojně užíván (nikoli však v telefonních ústřednách). Vyrábí se ve třech velikostních variantách. Ty jsou 6,3 mm, 3,5 mm a 2,5 mm. Na obrázku 4.8

jsou znázorněna pojmenování kontaktů. Podle požadavků aplikace existuje více variant konektorů: TRS (stereo, symetrické mono), TS (nesymetrické mono), TRRS (například dvoukanálové audio s kontaktem pro kompozitní video). Při zasouvání konektoru do zdířky dochází ke zkratování kontaktů, které bývá doprovázeno praskáním a bzučením vycházejícím z reproduktorů. (15)



Obrázek 4.8 Konektor TRS úhlový

Konektor CINCH (RCA)

CINCH je novější konektor vyvinutý již zaniklou firmou Radio Corporation of America (RCA) ve čtyřicátých letech dvacátého století. Konektor umožňuje připojit pouze jeden pár vodičů. V audiotechnice lze použít pouze pro nesymetrické vedení. Konstrukce konektoru se odvíjí od jeho ceny. Levné plastové konektory se používají u propojovacích kabelů ve spotřební elektronice. Jejich kvalita spojů a mechanická odolnost není vysoká. U dražších konektorů se setkáme se zlacenými nebo stříbřenými styčnými plochami a odolným kovovým tělem. Hlavní nevýhodou konstrukčního uspořádání konektoru CINCH je fakt, že při připojování dochází k připojení signálového kontaktu a až poté se propojí zemnicí kontakt. Připojení konektoru provází „bzučení“, někdy se může poškodit zařízení. Na rozdíl od konektoru TRS však při připojování nedochází ke zkratování kontaktů. (16)



Obrázek 4.9 Konektor CINCH

Konektor XLR

Tří pinový konektor XLR umožňuje symetrické propojení. Jeho zapojení je vyznačeno na obrázku 4.10. Díky častému užití pro připojení mikrofonu se mu někdy říká mikrofonní, anebo CANNON podle firmy, jež ho uvedla na trh. Tento konektor odstraňuje velkou nevýhodu konektorů CINCH a TRS. Při připojování nedochází k žádnému zkratování a všechny piny jsou propojeny současně. Konektory XLR se vyrábějí se třemi až sedmi piny. V audiotechnice jsou nejčastěji užívány tři pinové, přičemž jednotlivé piny jsou očíslovány. Konektor má ochranu proti nechtěnému rozpojení. (17)

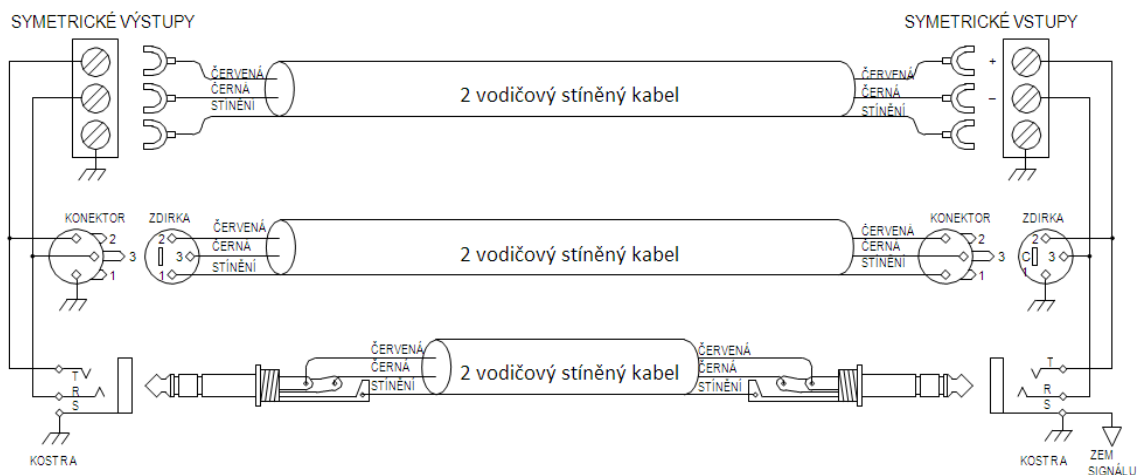


Obrázek 4.10 Tří pinový konektor XLR

4.2.3. Zapojení kabelů

Symetrické vedení

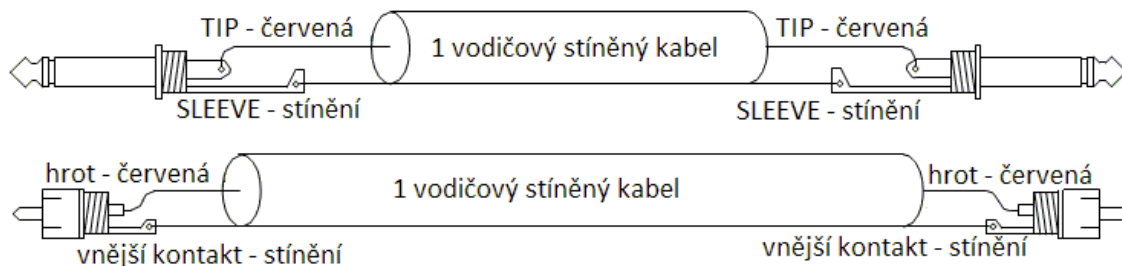
Symetrické vedení z principu vyžaduje kabel se třemi vodiči a konektory se třemi kontakty. Na kontakt TIP konektoru TRS se připojuje pozitivní signál HOT (obvykle červená barva), na kontakt RING se připojuje COLD (černá) a na kontakt SLEEVE stínění. Konektor XLR je zapojen následovně: pin 1 - stínění, pin 2 - HOT, pin 3 - COLD.



Obrázek 4.11 Zapojení symetrických kabelů, převzato a upraveno z (18)

Nesymetrické vedení

V případě konektoru TS je signálový vodič zapojen na kontakt TIP a stínění je zapojeno na SLEEVE. CINCH je zapojen obdobně, tedy na hrot je připojen signálový vodič a na vnější kontakt stínění.



Obrázek 4.12 Zapojení nesymetrických kabelů, převzato a upraveno z (18)

5. Metody měření

Pro měření, která jsou závislá na frekvenci, budeme volit takové kmitočtové rozsahy, které odpovídají slyšitelnému rozsahu lidského sluchu. Protože jsou předmětem našeho měření instrumentální kabely určené pro kytary a baskytary, budeme ctít jejich účel. Pozornost tedy zaměříme na pásma z tabulky Tabulka 5.1. Všechna měření jsou ovlivněna propojovacími kabely, konektory a sondami. Protože však byly všechny kabely měřeny za stejných podmínek (naprosto totožné zapojení pomocí propojovacího přípravku), nebyly výsledky měření nijak korigovány. Výsledky měření slouží k porovnání kabelů v rámci této práce, nelze je porovnat s výsledky jiných měření nebo s hodnotami udávanými výrobcem. Kvůli snížení vlivu náhodné chyby na výsledky měření byla jednotlivá měření několikrát opakována a průměrována.

Nástroj	Frekvence	
	Dolní mez [Hz]	Horní mez [kHz]
Elektrická/akustická kytara	80	5
Basová kytara	40	6
Klavír	60	15
Housle	300	10
Vokál	125	16

Tabulka 5.1 Frekvenční rozsahy vybraných nástrojů, volně podle (19)

5.1. Měření elektrických parametrů kabelů

Elektrický odpor, kapacita a indukčnost změříme pomocí níže uvedených metod. Tyto parametry jsou kvůli možnosti porovnání jednotlivých kabelů přepočítány na metr délky.

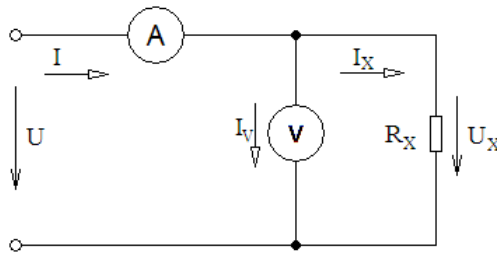
5.1.1. Měření odporu

Aby měření odporu neovlivnila indukčnost s kapacitou, musíme obvod napájet stejnosměrným napětím. Dále musíme brát v úvahu vliv teploty na odpor, který je závislý na teplotě podle vzorce

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta t),$$

(5.1)

kde α je teplotní součinitel elektrického odporu a Δt je rozdíl teplot. Protože se podle (20) pohybují hodnoty odporu kabelů v řádu $m\Omega$, musí tomu odpovídat metoda měření.



Obrázek 5.1 Zapojení Ohmovy metody pro malé R_X

Vhodnou metodou je Ohmova metoda, která spočívá ve výpočtu odporu měřeného kabelu ze znalostí úbytku napětí a proudu jím protékající. Ze zapojení (Obrázek 5.1) je zřejmé, že naměřenou hodnotu proudu I ovlivňuje proud protékající voltmetrem I_V . Pro odpor R_X platí

$$R_X = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U_X}{I - I_V} = \frac{U_X}{I - \frac{U_X}{R_V}}, \quad (5.2)$$

kde U_X [V] je napětí na odporu R_X a R_V [Ω] je vnitřní odpor voltmetru. Při zanedbání vlivu proudu protékající voltmetrem vzniká chyba metody

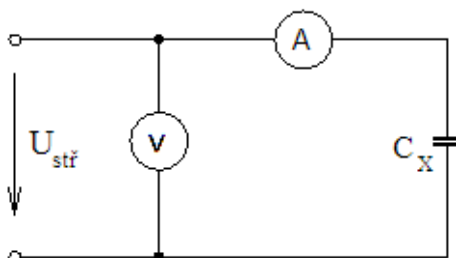
$$\delta_M = -\frac{R_X}{R_X + R_V} \cdot 100 \text{ (\%)}. \quad (5.3)$$

Z toho vyplývá, že s klesající hodnotou odporu R_X klesá chyba metody. (8)

Kabel na jednom konci zkratujeme a zapojíme do obvodu podle obrázku 5.1. Protože je odpor kabelu velice malý (menší než 1Ω), musí být nastavený rozsah ampérmetru s ohledem na napětí dostatečný. Postupně odečítáme proud z ampérmetru pro deset různých napětí a tyto hodnoty zapisujeme do tabulky (viz Příloha 1).

5.1.2. Měření kapacity

Měření kapacity ampérmetrem a voltmetrem připomíná Ohmovu metodu měření odporu. Kabel zapojíme naprázdno do obvodu napájeného střídavým proudem podle obrázku 5.2.



Obrázek 5.2 Schéma zapojení měření kapacity ampérmetrem a voltmetrem pro malé C_x

U této metody jde o zjednodušení, které předpokládá, že impedance kondenzátoru Z_C [Ω] se rovná jeho reaktanci X_C [Ω], tedy že platí

$$Z_C = X_C = \frac{1}{2\pi f C_x}. \quad (5.4)$$

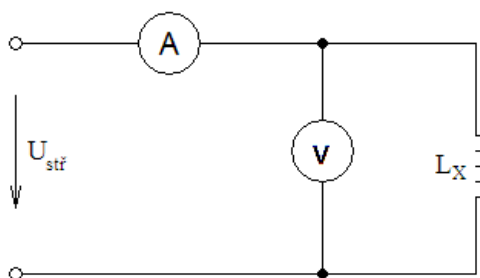
Známe-li frekvenci f [Hz], můžeme hodnotu C_x [F] vypočítat ze vztahu

$$C_x = \frac{I}{2\pi f U}. \quad (5.5)$$

Zdroj střídavého napětí je realizován funkčním generátorem signálu ETT FG1641A (specifikace viz kapitola 5.4). Nastavíme funkci sinus na výstupu generátoru a zaznamenáme čtyři kombinace napětí a proudu pro frekvence uvedené v tabulce (viz Příloha 2).

5.1.3. Měření indukčnosti

Obdobně jako u předchozích měření použijeme pro měření indukčnosti voltmetr a ampérmetr. Kabel na jedné straně zkratujeme a druhou stranu připojíme do obvodu podle schématu. Zapojení pro malé indukčnosti je na obrázku 5.3.



Obrázek 5.3 Schéma zapojení měření indukce ampérmetrem a voltmetrem pro malé L_X

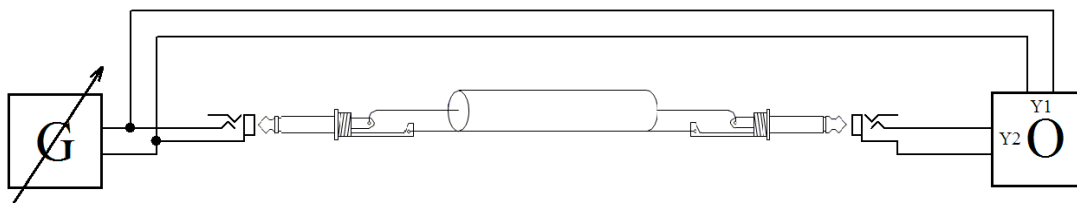
Pro výpočet je třeba znát hodnotu odporu kabelu R_X [Ω] z předchozího měření. Pro indukčnost L_X [H] při známé frekvenci f [Hz] pak platí

$$L_X = \frac{1}{2\pi f} \cdot \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R_X^2} = \frac{1}{2\pi f} \cdot X_L, \quad (5.6)$$

kde X_L [Ω] je induktivní reaktance.

5.2. Měření osciloskopem

Osciloskop je měřicí přístroj, který zobrazuje časový průběh napětí nebo znázornění jednoho napětí jako funkci napětí druhého. Osciloskopy se dělí na analogové a číslicové (osciloskop s číslicovou pamětí - DSO - digital storage oscilloscope). Analogové mění velikost signálu pomocí analogových obvodů (vertikální zesilovač) a zobrazují ho na stínítku obrazovky. Číslicové osciloskopy signál digitalizují pomocí A/D převodníku a kódované hodnoty ukládají do rychlé paměti vzorků. Odtud jsou vzorky vybírány pro zobrazení nebo další zpracování. V současné době jsou analogové osciloskopy často nahrazovány číslicovými. Měření bylo provedeno číslicovým osciloskopem značky UNI-T (detailní specifikace viz kapitola 5.4).(8)



Obrázek 5.4 Schéma zapojení obvodu pro měření osciloskopem

5.2.1. Měření fázového posunu signálu

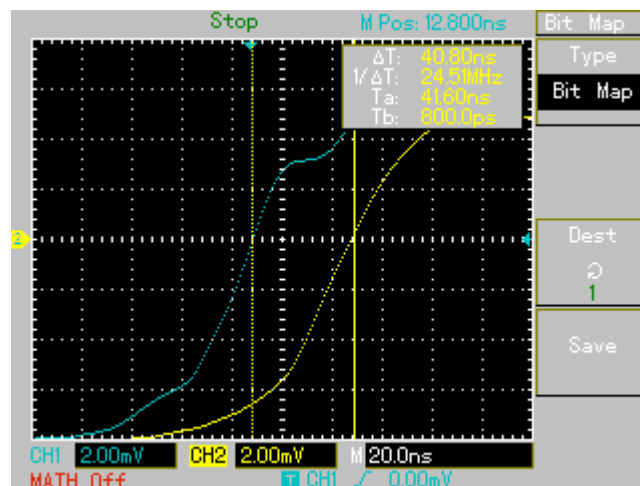
Signál procházející kabelem je oproti signálu z generátoru fázově posunut. Označíme-li harmonický signál z generátoru x_1 a signál po průchodu kabelem x_2 , platí

$$\begin{aligned}x_1(t) &= A_1 \sin(\omega t), \\x_2(t) &= A_2 \sin(\omega t - \varphi),\end{aligned}\tag{5.7}$$

kde φ [rad] je fázový rozdíl. Fázový rozdíl vypočítáme ze vztahu

$$\varphi = \omega t_0 = 2\pi f t_0,\tag{5.8}$$

kde t_0 [s] je časový rozdíl mezi průchody signálů $x_1(t)$ a $x_2(t)$ nulovou úrovní.



Obrázek 5.5 Měření časového rozdílu pomocí kurzorů

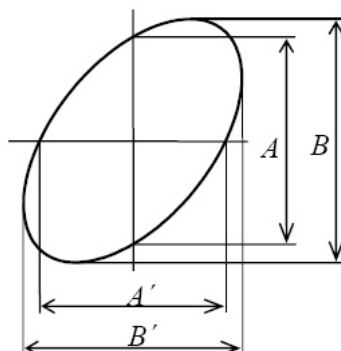
Připojíme signál z generátoru do prvního kanálu osciloskopu a signál za měřeným kabelem připojíme do druhého kanálu. Časový rozdíl přesně změříme pomocí kurzorů na obrazovce osciloskopu (viz Obrázek 5.5). Měření provedeme pro frekvence 10 kHz, 20 kHz a 80 kHz.

Fázový posun dvou harmonických signálů lze také měřit v režimu XY. V tomto režimu osciloskop zobrazuje signál z prvního kanálu jako funkci signálu z druhého kanálu. Takovému zobrazení se říká Lissajousovy obrazce. Signály o stejné frekvenci se zobrazí jako elipsa. Dosazením parametrů A, A', B, B' (viz Obrázek 5.6) a vypočtením φ z rovnice

$$\sin \varphi = \frac{A}{B} = \frac{A'}{B'}$$

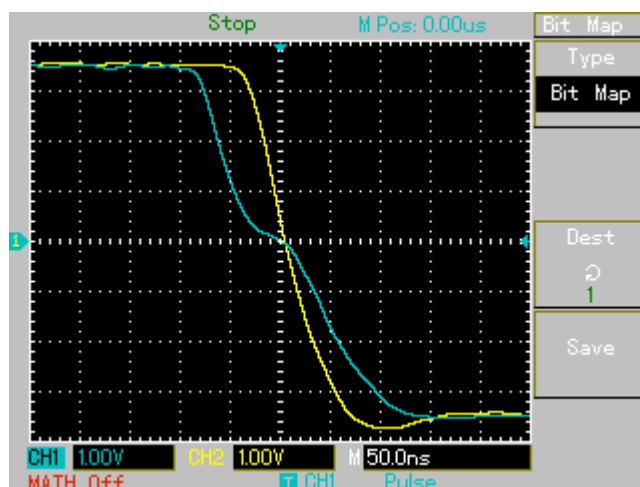
(5.9)

dostaneme fázový posun.



Obrázek 5.6 Lissajousův obrazec

5.2.2. Vizuální zhodnocení vlivu kabelu na tvar signálu



Obrázek 5.7 Detailní zobrazení sestupné hrany obdélníkového signálu; CH1 - výstupní signál z generátoru; CH2 - výstupní signál z kabelu

Při detailním prohlédnutí průběhu signálu si všimáme, jak ovlivňuje kapacita měřeného kabelu průběh signálu. Rychlé změny signálu jsou po průchodu kabelem pozvolnější.

5.3. Měření přenosové charakteristiky

Analýza spočívá v porovnání frekvenčních spekter u zkoumaných kabelů. Cílem měření je získat frekvenční spektrum signálu před průchodem a po průchodu kabelem.

Následně můžeme porovnávat spektra kabelů vzájemně mezi sebou nebo se spektrem vstupního signálu. Jako měřicí signál použijeme bílý šum, který je vhodný pro svůj konstantní výkon v definovaném frekvenčním pásmu.

Jako zdroj bílého šumu použijeme zvukový soubor v počítači. Kabel propojíme z výstupu zvukové karty do vstupu, přehrajeme v přehrávači šum, vstupní signál zaznamenejme a uložíme do souboru. Zvuková karta M-Audio OmniStudio USB umožňuje nahrávat signál do počítače vzorkovací frekvencí až 96 kHz. Můžeme tedy s dostatečným přesahem proměřit celé slyšitelné spektrum.

5.4. Použité přístroje

Kvůli možnosti rychlého propojení kabelu a měřicích přístrojů jsem vyrobil krabičku s konektory. Umožňuje snadno připojit generátor, ampérmetr, voltmetr před nebo za ampérmetr a měřený kabel.



Obrázek 5.8 Propojovací krabička

Osciloskop UNI-T 2025c

Jedná se o dvoukanálový osciloskop s šířkou pásma 25 MHz a rychlostí vzorkování 250 MS/s (250 milionů vzorků za sekundu). Tento přístroj umožňuje připojení USB paměťového disku, na který je možné ukládat obrazový výstup v podobě bitmapového obrázku. Také ho můžeme ovládat pomocí software v počítači připojeném USB kabelem. Osciloskop je schopen zobrazovat naměřené hodnoty v oblasti vertikální napěťové i horizontální časové osy. Pomocí kurzorů lze přesně měřit rozdíl mezi nimi.

Multimetr UNI-T UT39A

Tento přístroj měří stejnosměrné a střídavé napětí, stejnosměrný a střídavý proud, elektrický odpor a kapacitu. Má diodový a tranzistorový tester. Všechny měřené veličiny (kromě kapacity) měří s přesností do 1%.

Funkční generátor a čítač ETT FG1641A

Generátor vytváří sinusové, obdélníkové a trojúhelníkové signály. Díky vestavěnému čítači je možné odečítat frekvenci na displeji generátoru. Rozsah výstupní frekvence je od 0,1 Hz do 2 MHz a amplitudy do 20 V (U_{PP} - napětí špička - špička).

Zdroj stejnosměrného napětí

Výstup je napájen spínaným zdrojem napětí, které lze nastavit v rozsahu 0 až 36 V. Ze zdroje je možné odebírat proud až 3 A. Napětí i proud se zobrazují na vestavěném displeji.

Zvuková karta M-Audio OmniStudio USB

Karta OmniStudio má 24 bitové vstupní A/D převodníky s vzorkovací frekvencí až 96 kHz. Na předním panelu karty jsou dva symetrické vstupy 1 a 2 umožňující připojení TRS/TS konektoru nebo XLR konektoru mikrofonní úrovně. Na zadním panelu nalezneme celkem čtyři stereo AUX vstupy a dva nesymetrické vstupy LINE IN 3 a 4. Karta má dva stereo výstupy MAIN a MONITOR, čtyři symetrické výstupy DIRECT OUT a dva výstupy pro sluchátka.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6. Měřené kabely

Kabel č.	Značka	Délka [m]	Přibližná cena [Kč]	Poznámka, označení
1	neuveдено	2,57	0	zdarma ke kytáře
2	Planet Waves	3,41	80Kč/m, 50Kč/TS	ručně pájený, Cable Station
3	Proel	5,98	350	Challenge Series
4	Klotz	2,92	500	AC106
5	Planet Waves	3,09	600	PW-AG, Circuit Breaker
6	Planet Waves	4,59	800	PW-G, vyznačena směrovost
7	Monster	3,61	1500	Monster Rock
8	Evidence Audio	3,08	2500	vyznačena směrovost, Lyric HG

Tabulka 6.1 Přehled měřených kabelů

Vzorek kabelů sestává z osmi kabelů určených k připojení elektrické, basové eventuálně elektro-akustické, kytary. Kabel č. 1 je neznačkový a zřejmě velice levně vyrobený. Jeho konektory jsou nerozebíratelné, zalité plastem, drát má velice malý průřez. Mechanická odolnost kabelu ve srovnání s ostatními měřenými kabely evidentně pokulhává. Kabel č. 2 je vyroben z metráže značky Planet Waves Cable Station. Na tento nízkokapacitní kabel jsem připájel přímý, neznačkový TS konektor a úhlový konektor značky Amphenol. Vnější obal kabelu působí pevně, mechanickou odolnost takto vyrobeného kabelu hodnotím velice kladně. Třetí kabel je nejdelší ze všech měřených kabelů. Má kovové konektory (přímý a úhlový). Kvůli menšímu průřezu působí kabel celkově méně odolně. Kabel č. 4 od německého výrobce Klotz naopak vyhlíží kvalitněji. Má pozlacené konektory Neutrik a vnější průřez kabelu je větší.

Dalšími jsou kabely č. 5 a 6 od firmy Planet Waves. První z nich je osazen masivními kovovými konektory v kombinaci úhlový a přímý. Úhlový konektor je vybaven vypínačem. Kytarista tak nemusí otáčet potenciometrem na kytáře ve chvíli, kdy chce odpojit signál ze snímače, stačí jen klepnout prstem do konektoru. Druhý z dvojice kabelů Planet Waves (PW-G) má nerozebíratelné konektory, které jsou barevně odlišeny. Na plášti kabelu je vyznačen směr signálu, podle kterého se má kabel zapojovat. „Směrové“ zapojení spočívá v použití symetrického kabelu. Signál je veden středními vodiči a opletení je uzemněno pouze na straně zesilovače. Toto zapojení by

podle výrobce mělo eliminovat vnik vnějších ruchů. Kabel Monster ze série Rock je koncipován tak, aby vydržel i nešetrné zacházení. Má masivní kovové konektory, které jsou pozlacené 24 karátovým zlatem a plášť je vyroben z materiálu DuraFlex - ohebný a zároveň odolný. Posledním a také nejdražším kabelem je Evidence Audio Lyric HG. Kabele tohoto výrobce jsou ručně vyráběny v USA. Pro výrobu dvou plných středních vodičů byla použita bezkyslíkatá měď. Měděné stínění kabelu je velice husté. Zelenočerný tkaný oplet chrání kabel před mechanickým poškozením a prakticky znemožňuje jeho kroucení. U tohoto kabelu bylo použito, obdobně jako u kabelu č. 6, pseudo-symetrické - „směrové“ - zapojení. Směr je vyznačen šipkou a různými barvami konektorů značky Neutrik.



Obrázek 6.1 Měřené kabely

7. Výsledky měření

7.1. Parametry kabelu

7.1.1. Odpor

Kabel č.	Značka	d [m]	R [m Ω]	R/d [m Ω /m]
7	Monster	3,61	289,08	80,08
8	Evidence Audio	3,08	317,08	102,95
2	Planet Waves pájený	3,41	395,76	116,06
5	Planet Waves PW-AG	3,09	404,77	130,99
4	Klotz	2,92	431,57	147,80
3	Proel	5,98	925,38	154,75
1	neuveдено	2,57	470,86	183,21
6	Planet Waves PW-G	4,59	900,91	196,28

Tabulka 7.1 Odpor; seřazeno od dle R/d

Odpor kabelu způsobuje celkový útlum, který je však u signálových kabelů zanedbatelný. Může nám však napovědět, jak je kabel konstruován, zejména se dá odvodit průřez vodiče. Zatímco kabel č. 1 má malý průřez zřejmě z důvodu ekonomického, kabel č. 6 má malý průřez středního vodiče kvůli snaze maximálně snížit kapacitu kabelu. Nízkou hodnotu odporu vzorku č. 7 přisuzují kvalitním pozlaceným konektorům a také velkému průřezu středního vodiče i stínění.

7.1.2. Kapacita

Kabel č.	Značka	d [m]	C [pF]	C/d [pF/m]
2	Planet Waves pájený	3,41	197,22	57,84
5	Planet Waves PW-AG	3,09	193,83	62,73
4	Klotz	2,92	315,35	108,00
6	Planet Waves	4,59	498,09	108,52
8	Evidence Audio PW-G	3,08	344,82	111,96
3	Proel	5,98	738,68	123,52
1	neuveдено	2,57	327,92	127,60
7	Monster	3,61	461,90	127,95

Tabulka 7.2 Kapacita; seřazeno dle C/d

Více signifikantním parametrem je kapacita. Vysoká kapacita kabelu Monster mě překvapila. Příčinu bych hledal ve velkém průřezu vodičů. Připomenu, že naměřený odpor byl o 20% menší než u druhého kabelu v pořadí - Evidence. Firma Monster

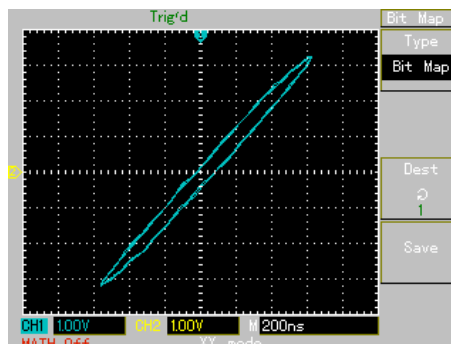
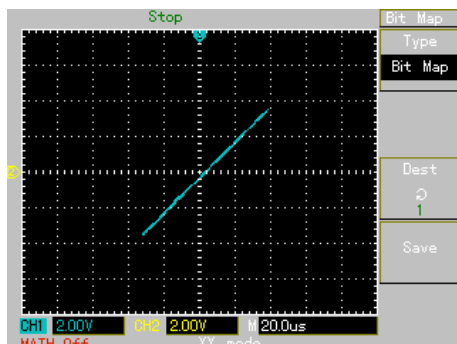
o svém kabelu Rock uvádí, že je přizpůsoben rockovému hráči pro živé hraní, přičemž je velký důraz kladen na eliminaci vniku elektromagnetického rušení a na vysokou odolnost. Požadované vlastnosti zřejmě musela ustoupit nízká kapacita. Na druhé straně tabulky jsou kabely Planet Waves - pájený kabel z metráže a kabel PW-AG. V obou případech se jedná o kabel ze série Cable Station vyznačující se velice nízkou kapacitou. Kabely č. 6 a 8 využívají již zmíněné směrové, pseudo-symetrické zapojení, které zřejmě stojí za zvýšením jejich kapacity. Špatně, co se týče kapacity, vyšel kabel č. 3, který vzhledem ke své délce dosahuje bezkonkurenčně nejvyšší celkové hodnoty. Kapacita kabelu č. 1 byla vzhledem k jeho malým rozměrům očekávána.

7.1.3. Indukčnost

Při dílčím výpočtu induktivní reaktance X_L v rovnici (5.6) zjišťujeme, že je X_L v poměru k stejnosměrnému odporu cívky R_X zanedbatelně malá. Připočteme-li vliv chyby měřících přístrojů, dojdeme k závěru, že je zvolená metoda pro měření indukčnosti kabelu nevhodná. Mohu pouze konstatovat, že indukčnost je velice malá. Pro srovnání uvedu, že podle některých zdrojů je indukčnost signálových kabelů CINCH menší než $1 \mu\text{H}$ na metr kabelu. Indukčnost by mohla být změřena například digitálním měřičem impedančních složek. Měření provedeno nebylo, protože uvedený přístroj nebyl k dispozici. (12)(20)

7.2. Parametry přeneseného signálu

7.2.1. Fázový posun



Obrázek 7.1 Lissajousův obrazec při frekvenci 20 kHz; kabel č. 1

Obrázek 7.2 Lissajousův obrazec při frekvenci 2 MHz; kabel č. 1

Pro ověření vlivu kabelu na fázi signálu jsem použil metodu Lissajousových obrazců, pomocí které rychle ověříme, zda vůbec dochází k fázovému posunutí. Pro frekvence ve slyšitelném pásmu je fázový posun minimální a rozdíly mezi jednotlivými kabely jsou neměřitelné. V tabulce Tabulka 7.3 je uveden fázový posun pro kabel č. 4 změřený pomocí kurzorů na časové ose. Nás samozřejmě zajímá hodnota pro 20 kHz, ostatní jsou pouze pro vytvoření představy. Protože byl časový rozdíl signálů u jednotlivých kabelů pro stejné frekvence prakticky stejný, můžeme říci, že tabulka je přibližně platná pro všechny kabely.

f [kHz]	Δt [ns]	ϕ [rad]	ϕ [°]
20	40,8	0,0052	0,296
100	38,4	0,0242	1,387
1012	28,0	0,1781	10,202

Tabulka 7.3 Fázový posun pro kabel č. 4

7.2.2. Přenosové charakteristiky

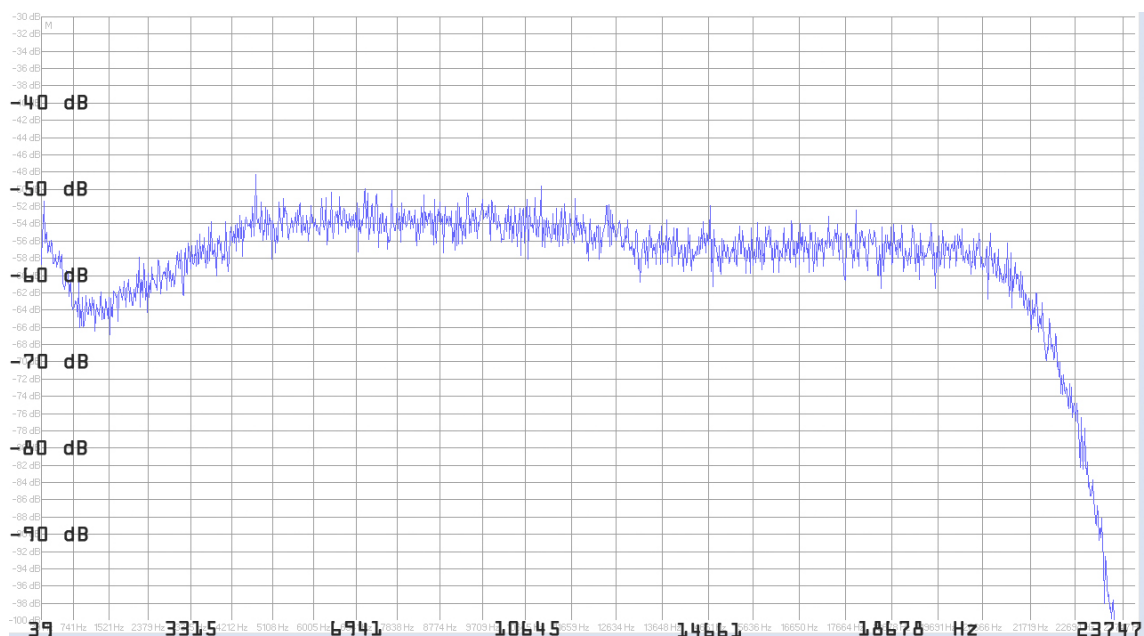
K získání zvukového souboru s bílým šumem jsem využil program Noise Generator stažený z webu University of California at Berkeley. Generovaný šum jsem nahrál přes zvukovou kartu M-Audio OmniStudio USB (Obrázek 7.3) do počítače a uložil do souboru. Měřený kabel jsem propojil z výstupu do vstupu karty. Nevýhodou tohoto zapojení je fakt, že vzorkovací frekvence karty klesne na 48 kHz. Přestože měl původní zdrojový soubor šířku pásma 30 kHz, musel být převzorkován 48 kHz a tedy šířka frekvenčního pásma klesla přibližně na 24 kHz. Šum po průchodu kabelem jsem

nahrál a uložil do souboru pro pozdější zpracování. Frekvenční spektra všech naměřených signálů jsem vygeneroval v programu Wave Lab 6.



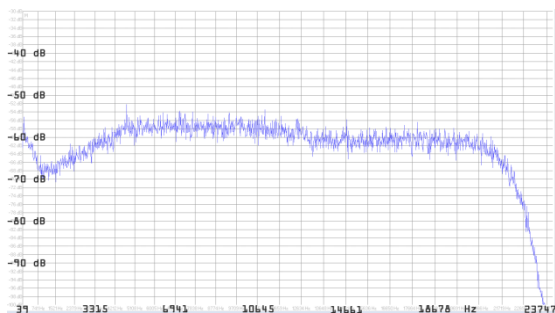
Obrázek 7.3 Zvuková karta M-Audio OmniStudio USB

Porovnáním získaných spekter se spektrem zdrojového souboru zjistíme, že touto metodou nebylo zjištěno ovlivnění signálu kabelem a rozdíly mezi spektry jednotlivých kabelů jsou naprosto minimální. Úrovně spektrálních složek zdroje navíc nemůžeme porovnávat se spektrem za kabelem, protože je vstupní úroveň na zvukové kartě ovlivněna potenciometrem GAIN.

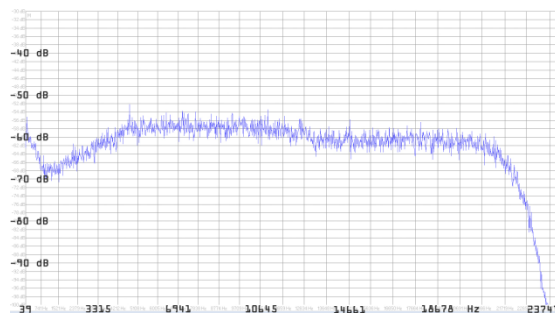


Graf 7.1 Frekvenční spektrum zdrojového souboru

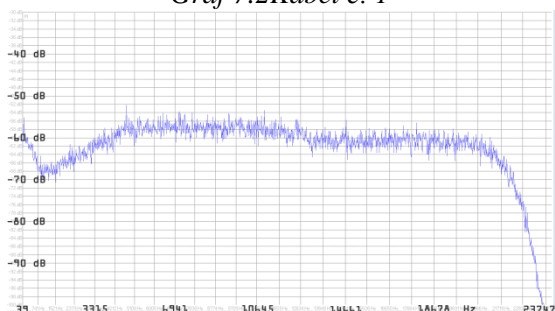
Výhodnější řešení by spočívalo v tom, že zdroj signálu by byl tvořen jiným zařízením a signál by do zvukové karty přiváděli dva kabely - jeden do pravého kanálu a druhý do levého kanálu stereo vstupu, přičemž jeden z těchto dvou kabelů by byl určen jako referenční kabel, vůči kterému by byly všechny kabely porovnány. Toto zapojení by také umožnilo použít maximální vzorkovací frekvenci 96 kHz.



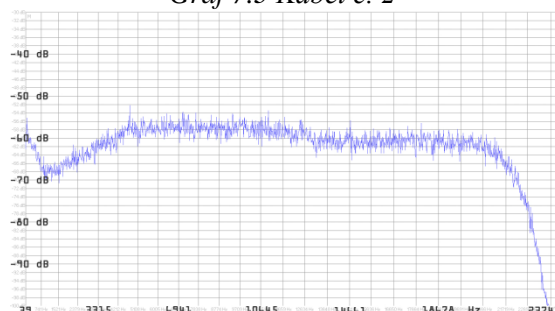
Graf 7.2 Kabel č. 1



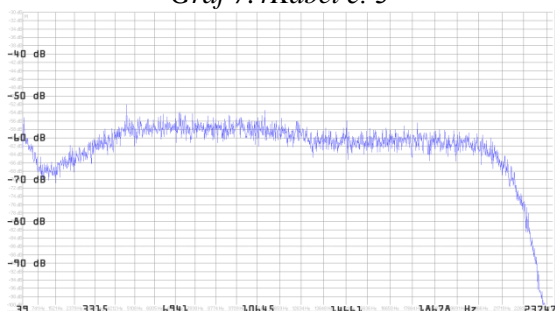
Graf 7.3 Kabel č. 2



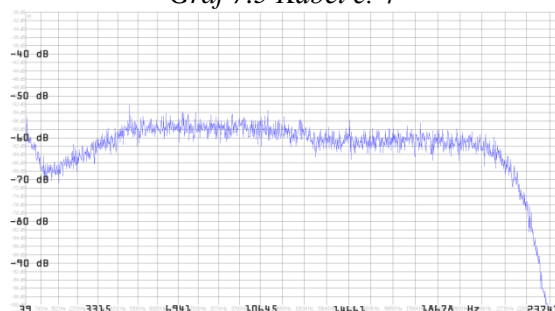
Graf 7.4 Kabel č. 3



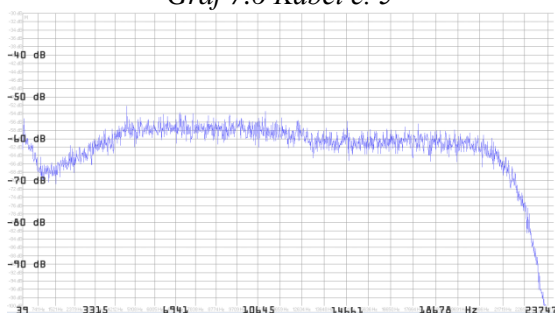
Graf 7.5 Kabel č. 4



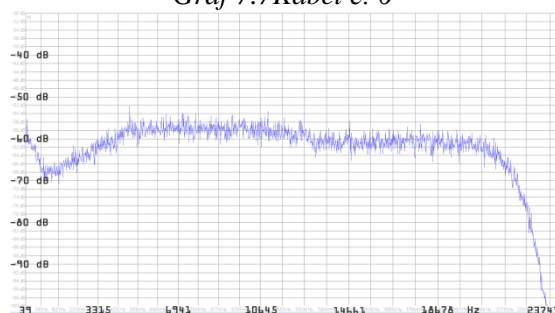
Graf 7.6 Kabel č. 5



Graf 7.7 Kabel č. 6



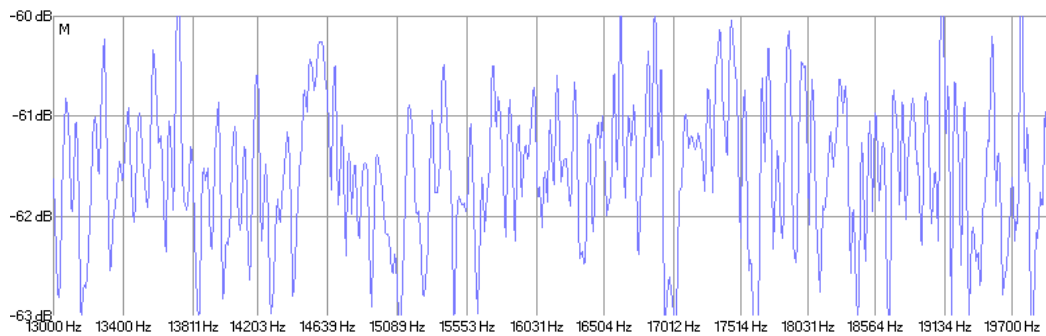
Graf 7.8 Kabel č. 7



Graf 7.9 Kabel č. 8

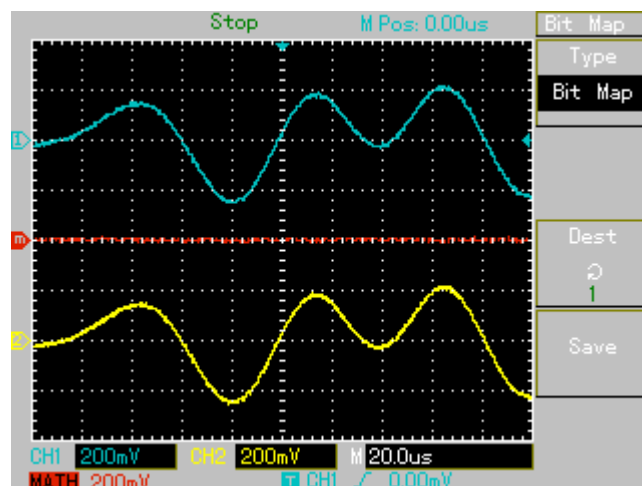
Podle (20) je chyba přenosu kabelu maximálně v řádu setin dB, přičemž rozdíly mezi jednotlivými kabely se pohybují v tisících dB. Zvolený zdrojový soubor šumu se ukázal jako nevhodný, protože má příliš nevyrovnané spektrum. Nebylo tedy možné v dostatečném zvětšení křivky porovnat ani při maximálním vyhlazení, které program Wave Lab umožňuje (viz Obrázek 7.10). Pro měření přenosu kabelu bych doporučil

použití generátoru šumu a spektrální analyzátor. Práce se zvukovými soubory v počítači není pohodlná.



Graf 7.10 Detail spektra kabelu č. 1- kvůli nevyrovnanému spektru nelze sledovat pokles v tisícínách dB

7.2.3. Rozdíl signálů



Obrázek 7.4 Rozdíl „vstupního“ a „výstupního“ signálu; CH1 - vstupní signál; CH2 - výstupní signál; MATH (červená) - rozdíl signálů

Použitý osciloskop umožňuje provádět vstupními signály matematické operace, mezi které patří součet, rozdíl, násobení a dělení dvou signálů a rychlá Fourierova transformace zvoleného kanálu. Výsledek matematické operace osciloskop zobrazí jako třetí křivku na stínítku. Snažil jsem se prokázat vliv kabelu na průchozí signál pomocí rozdílu vstupního a výstupního signálu. Na „vstup“ kabelu jsem přivedl bílý šum ze zvukové karty a v tomtéž místě jsem připojil jednu sondu osciloskopu. Druhou sondu jsem připojil na druhém konci kabelu. Nechal jsem zobrazit rozdíl obou signálů. V případě že by kabel vstupní signál ovlivňoval, rozdíl signálů by se zobrazil

jako křivka. Touto metodou jsem opět žádný vliv nezjistil - matematickým rozdílem signálů je přímka (viz Obrázek 7.4).

7.3. Přehled výsledků

č.	Značka	d [m]	R [m Ω]	C [pF]	R/d [m Ω /m]	C/d [pF/m]	Přibližná cena [Kč]
1	neuveдено	2,57	470,86	327,92	183,21	127,60	0
2	Planet Waves	3,41	395,76	197,22	116,06	57,84	80Kč/m, 50Kč/TS
3	Proel	5,98	925,38	738,68	154,75	123,52	350
4	Klotz	2,92	431,57	315,35	147,80	108,00	500
5	Planet Waves	3,09	404,77	193,83	130,99	62,73	600
6	Planet Waves	4,59	900,91	498,09	196,28	108,52	800
7	Monster	3,61	289,08	461,90	80,08	127,95	1500
8	Evidence	3,08	317,08	344,82	102,95	111,96	2500

Tabulka 7.4 Přehled naměřených výsledků

Kabel číslo 1 má vysoké hodnoty odporu i kapacity vztážené na délkovou jednotku. V tomto ohledu dopadl nejhůře, přičemž byl tento výsledek očekávaný. Nesmíme však opomenout celkové naměřené hodnoty, zejména pak u kabelu č. 3, který je nejdelší a celková kapacita kabelu je absolutně nejvyšší. Naměřené hodnoty kabelu č. 7 mě překvapily a při poslechovém testu bych se zaměřil hlavně na tento kabel. Kapacita tohoto kabelu zřejmě ustoupila snaze minimalizovat vnik ruchů a maximalizovat odolnost.

Přikládám přehledovou tabulku (Tabulka 7.5), která shrnuje zjištěné klady a zápory. Přestože nelze z naměřených výsledků objektivně sestavit žebříček kabelů podle kvality ani stanovit „vítěze“ testu, dle mého názoru je nejvýhodnější a nejuniverzálnější kabel č. 2. Ať z hlediska jeho bezkonkurenčně nejnižší kapacity, nízké ceny a také proto, že můžeme použít libovolné konektory. Svoji kapacitou je srovnatelný kabel č. 5, který má navíc na konektoru vypínač. Ten ze svého principu hodnotím velice kladně. Kabel o délce 6 metrů by měl být vyroben z méně kapacitního drátu, než jak je tomu v případě kabelu Proel (č. 3). Naproti tomu kabel Klotz (č. 4) má přijatelně malou kapacitu a kvalitní konektory. U kabelů č. 6 a 8 nemůžu objektivně hodnotit jejich kapacitu, která je zřejmě ovlivněna tím, že jsou zapojeny jinak („směrové“, pseudo-symetrické zapojení) než zbytek testovaných kabelů. Velice kladně na mě působí design kabelu č. 8. Tento kabel rovněž zaujme kvalitním zpracováním. V tomto

ohledu je na tom stejně kabel Monster (č. 7), který má však nejvyšší kapacitu na metr délky.

č.	Značka	Klady	Zápory	Použití, komentář
1	neuvedeno	- cena	- mechanická odolnost - kapacita - odpor	nouzové použití
2	Planet Waves pájený	- kapacita - cena - univerzálnost	- nutnost sestavení	široké použití
3	Proel	- cena vzhledem k délce	- celková kapacita - celkový odpor	velké podium
4	Klotz	- konektory - kapacita		střední třída v rámci testu
5	Planet Waves PW-AG	- kapacita - konektory - vypínač obvodu	- cena (ve srovnání s kabelem č. 2)	živé hraní
6	Planet Waves PW-G	- směrové zapojení - odolnost vůči rušení - kapacita - dobrá ohebnost	- celková kapacita	živé hraní
7	Monster	- mechanická odolnost - kvalita zpracování - odpor konektory	- kapacita	živé hraní
8	Evidence	- směrové zapojení - odolnost vůči rušení - mechanická odolnost - design - konektory - kvalita zpracování	- cena	do studia

Tabulka 7.5Přehledová tabulka

8. Diskuze

Je nutné zdůraznit, že elektrické parametry kabelů nemusí představovat směrodatné určení kvality z pohledu vnímání kvality, jak jí bude chápat hudebník. Mohou nám ale poskytnout jakousi představu o tom, jak bude procházející signál kabelem ovlivněn. Na parametry je třeba nahlížet v celkovém kontextu a musíme brát také v potaz, k čemu je kabel určený. Důležitým posouzením toho, jaký kabel opravdu je, by byl poslechový test, který ale na druhou stranu není zcela objektivní a vyžaduje zkušeného posluchače. Poslechem bychom mimo jiné také mohli posoudit, jaký je rozdíl zvuku směrového kabelu v zapojení po směru od zapojení proti směru. Bohužel jsem neměl dostatek prostředků potřebných k provedení poslechového testu. Dalším možným testem by mohlo být sledování naindukovaných ruchů v elektromagnetickém poli pomocí osciloskopu.

Při výběru kabelu se řídíme krom pořizovací ceny hlavně tím, k čemu budeme kabel používat a co od něj očekáváme. Výrazně odlišné jsou kabely pro hru na podiu od těch, jenž se používají pro nahrávání ve studiu. I pod výrazem „hra na podiu“ najdeme zásadní odlišnosti spočívající ve stylu hraní a s tím spojenými požadavky například na mechanickou odolnost. V tomto ohledu v našem testu proti sobě stojí kabely č. 7 a 8. Monster Rock je připraven na opravdu nešetné zacházení, kterému samozřejmě snadno odolá i kabel Evidence Lyric HG. Ten je ovšem velice neohebný a není tedy vhodný pro kytaristy, kteří potřebují při živém hraní volnost. Vždy je třeba hledat správný kompromis mezi zvukovou kvalitou, mechanickou stálostí a odolností proti ceně kabelu.

Dalším kritériem při výběru kabelu je to, jak kvalitní máme zesilovač, reproduktory a ostatní části přenosového řetězce. Kabel, ostatně jako každý článek onoho řetězce, může výsledný zvuk jedinečně - více či méně - zhoršit. Kabel tedy vybíráme s ohledem na zbytek systému tak, aby ho nedegradoval. Naopak nemá příliš smysl uvažovat o pořízení drahého kabelu do nekvalitního přenosového řetězce. Nicméně drahý nemusí vždy znamenat kvalitní. Je možné, že kabel, který v některém konkrétním systému funguje perfektně, může mít odlišné výsledky v systému jiném.

V neposlední řadě je tu také vkus jednotlivce. Obecně sice můžeme říci, že kvalita kabelu spočívá v jeho minimálním vlivu na přenesený signál, ovšem osobní

preferenci na výsledný zvuk má každý kytarista jiné. Nakonec - s přihlédnutím k elektrickým parametrům kabelů - doporučuji volit délku kabelu tak, aby byly vzhledem ke svému použití nejkratší.

9. Závěr

V rámci práce byl změřen elektrický odpor kabelu a jeho kapacita. Tyto parametry byly přepočítány na metr délky. Zvolená metoda měření indukčnosti neposkytla očekávané výsledky. Dalšími měřeními se za použití dostupných prostředků nepodařilo ve slyšitelném spektru prokázat vliv kabelu na přenesený signál - to ovšem neznamená, že kabel na přenos vliv nemá. Ze všech zjištěných aspektů byla sestavena přehledová tabulka (Tabulka 7.5), která rekapituluje zjištěné poznatky. Byly pořízeny fotografie měřených kabelů, měřících přístrojů, kabelů a konektorů pro ilustraci v kapitole 4. Pro potenciální opakované měření doporučuji:

- použití měřiče impedančních složek pro měření indukčnosti,
- přenos kabelu měřit spektrálním analyzátozem za použití kvalitního generátoru šumu,
- provedení poslechového testu,
- provedení objektivního testu míry vniku elektromagnetického rušení.

10. Seznam použité literatury

1. **Biolek, Dalibor, a další.***Elektronické obvody I.* Brno : Univerzita obrany, 2006. ISBN 80-7231-169-7.
2. **Sýkora, Bohumil.** Reprodukory a reproduktorové soustavy trochu jinak. *Amatérské Radio.* Řada B - pro konstruktéry, 1993, 5.
3. **Svoboda, Ladislav a Štefan, Miloslav.***Reprodukory a reproduktorové soustavy.* Praha : SNTL, 1976. L 26-B2-IV-31f/52213.
4. **Halliday, David, Resnick, Robert a Walker, Jearl.***Fyzika.* [překl.] Petr Dub, a další. Brno : VUTIM, 2000. ISBN 80-214-1869-9.
5. **Rumsey, Francis a McCormick, Tim.***Sound and Recording.* 6. vydání. Oxford : Focal Press, 2009. ISBN 978-0-240-52163-3.
6. **Benson, K. Blair.***Audio Engineering Handbook.* New York : McGraw-Hill, 1988. ISBN 0-07-004777-4.
7. **Adámek, Petr.***Obvody a části měřících přístrojů.* České Budějovice : Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2010. ISBN 978-80-7394-200-7.
8. **Haasz, Vladimír a Sedláček, Miloš.***Elektrická měření - Přístroje a metody.* Praha : ČVUT, 2005. ISBN 80-01-02731-7.
9. **Sýkora, Bohumil.** Kabel je víc než jen kus drátu. *Stereo & Video.* 1994, 2.
10. **Janda, Jiří.** Kabelové hystérium. *Stereo & Video.* 1996, 6.
11. **Sýkora, Bohumil.** Vliv reproduktorových kabelů na kvalitu zvuku. *Audio Video Revue.* 1997, 2.
12. **Dostál, Zdeněk a Pokorný, Miroslav.** Signálové kabely cinch. *Stereo & Video.* 2000, 5.
13. **Audioquest.** Cable Theory. *AudioQuest.* [Online] 2006. [Citace: 20. březen 2012.] http://www.audioquest.com/pdfs/aq_cable_theory.pdf.
14. **Kvítek, Emil.***Materiály pro elektrotechniku.* Pardubice : Univerzita Pardubice, 2007.

15. **Příspěvatelé Wikipedie.** TRS connector. *Wikipedia*. [Online] 16. březen 2012. [Citace: 21. březen 2012.] http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=TRS_connector&oldid=482270656.
16. —. RCA connector. *Wikipedia*. [Online] 20. březen 2012. [Citace: 21. březen 2012.] http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=RCA_connector&oldid=479603685.
17. —. XLR connector. *Wikipedia*. [Online] 16. březen 2012. [Citace: 21. březen 2012.] http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=XLR_connector&oldid=482199944.
18. **Rane Corporation.** Propojování zvukových systémů. *Průručka Rane*. 1995.
19. **Kostelný, Štefan.** Frekvence, panorama a hloubka. *Muzikus.cz - Hudební portál*. [Online] 21. 8 2007. [Citace: 2. 4 2012.] <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-clanky/Frekvence-panorama-a-hloubka-Tema-mesice~21~srpen~2007/>.
20. **Sýkora, Bohumil.** Kabelová kabala. *Stereo & Video*. 1995, 5.

11. Seznam příloh

Tabulky naměřených hodnot

Příloha 1: Měření odporu

Příloha 2: Měření kapacity

Elektronické přílohy na CD

Mereni_kabelu_a_konektoru_v_audiotechnice.pdf

adresáře:

fotodokumentace

měření přenosu - zvukové soubory

měření přenosu - spektra

Příloha 1: Měření odporu

Kabel	č. 1	d [m]	2,57	Kabel	č. 2	d [m]	3,41
U [V]	I [A]	R [Ω]	R/d [m Ω /m]	U [V]	I [A]	R [Ω]	R/d [m Ω /m]
1,44	3,06	0,47	183,108	1,36	3,40	0,40	117,302
1,31	2,77	0,47	184,017	1,20	3,03	0,40	116,141
1,15	2,43	0,47	184,144	1,05	2,66	0,39	115,759
0,94	1,99	0,47	183,798	1,00	2,53	0,40	115,911
0,78	1,66	0,47	182,832	0,92	2,34	0,39	115,297
0,62	1,33	0,47	181,387	0,85	2,15	0,40	115,938
0,49	1,05	0,47	181,582	0,77	1,96	0,39	115,207
0,41	0,88	0,47	181,288	0,64	1,65	0,39	113,747
0,67	1,45	0,46	179,793	0,57	1,46	0,39	114,490
1,31	2,77	0,47	184,017	0,42	1,07	0,39	115,109
	Průměr	0,47	183,215		Průměr	0,40	116,058

Kabel	č. 3	d [m]	5,98	Kabel	č. 4	d [m]	2,92
U [V]	I [A]	R [Ω]	R/d [m Ω /m]	U [V]	I [A]	R [Ω]	R/d [m Ω /m]
3,14	3,40	0,92	154,436	1,47	3,39	0,43	148,503
3,05	3,30	0,92	154,556	1,39	3,21	0,43	148,295
2,99	3,24	0,92	154,321	1,31	3,03	0,43	148,063
2,91	3,14	0,93	154,975	1,23	2,86	0,43	147,284
2,82	3,04	0,93	155,122	1,18	2,74	0,43	147,485
2,55	2,75	0,93	155,062	1,10	2,56	0,43	147,153
2,40	2,59	0,93	154,957	1,02	2,39	0,43	146,157
2,30	2,49	0,92	154,464	0,95	2,21	0,43	147,214
2,12	2,30	0,92	154,137	0,87	2,03	0,43	146,771
1,79	1,94	0,92	154,294	0,79	1,85	0,43	146,242
	Průměr	0,93	154,745		Průměr	0,43	147,797

Kabel	č. 5	d [m]	3,09	Kabel	č. 6	d [m]	4,59
U [V]	I [A]	R [Ω]	R/d [m Ω /m]	U [V]	I [A]	R [Ω]	R/d [m Ω /m]
1,40	3,42	0,41	132,478	3,17	3,48	0,91	198,457
1,31	3,24	0,40	130,848	3,05	3,37	0,91	197,177
1,23	3,05	0,40	130,511	2,87	3,19	0,90	196,010
1,16	2,87	0,40	130,803	2,81	3,13	0,90	195,591
1,11	2,74	0,41	131,103	2,72	3,03	0,90	195,575
1,03	2,56	0,40	130,208	2,54	2,84	0,89	194,851
0,96	2,37	0,41	131,088	2,45	2,74	0,89	194,806
0,88	2,19	0,40	130,041	2,3	2,57	0,89	194,976
0,80	2,00	0,40	129,450	2,11	2,38	0,89	193,149
0,73	1,81	0,40	130,523	1,97	2,21	0,89	194,205
	Průměr	0,40	130,992		Průměr	0,90	196,277

Kabel	č. 7	d [m]	3,61
U [V]	I [A]	R [Ω]	R/d [m Ω /m]
1,03	3,5	0,29	81,520
0,96	3,29	0,29	80,829
0,89	3,07	0,29	80,305
0,84	2,92	0,29	79,687
0,77	2,69	0,29	79,292
0,7	2,46	0,28	78,824
0,63	2,22	0,28	78,610
0,56	1,99	0,28	77,952
0,49	1,75	0,28	77,562
0,44	1,59	0,28	76,656
	Průměr	0,29	80,076

Kabel	č. 8	d [m]	3,08
U [V]	I [A]	R [Ω]	R/d [m Ω /m]
1,13	3,53	0,32	103,933
1,08	3,39	0,32	103,436
1,01	3,18	0,32	103,120
0,94	2,96	0,32	103,106
0,87	2,75	0,32	102,715
0,79	2,53	0,31	101,381
0,67	2,16	0,31	100,709
0,6	1,94	0,31	100,415
0,53	1,71	0,31	100,630
0,39	1,26	0,31	100,495
	Průměr	0,32	102,949

Příloha 2: Měření kapacity

Kabel	č. 1	$d = 2,57 \text{ m}$			
	f [Hz]	U [V]	I [μA]	C [pF]	C/d [pF/m]
	80,5	7,70	1,3	333,79	129,88
	80,5	6,72	1,1	323,63	125,93
	80,5	5,64	0,9	315,49	122,76
	80,5	4,38	0,7	315,97	122,95
	324,9	7,67	5,1	325,72	126,74
	324,8	6,02	4,0	325,59	126,69
	324,7	4,76	3,1	319,22	124,21
	324,6	3,65	2,4	322,40	125,45
	1203	7,63	18,6	322,51	125,49
	1202	6,48	15,7	320,80	124,83
	1202	5,10	12,3	319,34	124,26
	1202	3,99	9,6	318,58	123,96
	4903	7,48	75,2	326,34	126,98
	4900	6,25	62,9	326,88	127,19
	4898	4,89	49,2	326,93	127,21
	4898	3,80	38,2	326,65	127,10
	14170	3,90	107,7	310,17	120,69
	14170	2,83	80,5	319,49	124,32
	14170	1,70	51,6	340,92	132,65
	14170	1,20	38,6	361,29	140,58
	20010	1,10	46,0	332,61	129,42
	20010	0,91	40,6	354,86	138,08
	20010	0,85	38,9	364,00	141,64
	20010	1,33	53,0	316,95	123,33
			průměr	327,92	127,60

Kabel	č. 2	$d = 3,41 \text{ m}$			
	f [Hz]	U [V]	I [μA]	C [pF]	C/d [pF/m]
	80,4	7,70	0,8	205,67	60,31
	80,4	6,50	0,7	213,18	62,52
	80,4	5,19	0,5	190,71	55,93
	80,4	3,96	0,4	199,95	58,64
	318,8	7,04	2,8	198,56	58,23
	318,7	4,97	2,0	200,96	58,93
	318,6	4,20	1,7	202,20	59,30
	318,5	3,32	1,3	195,67	57,38
	1209	7,36	11,2	200,32	58,75
	1209	6,04	9,2	200,51	58,80
	1209	4,65	7,0	198,17	58,11
	1209	3,35	5,0	196,48	57,62
	5068	7,47	48,2	202,63	59,42
	5066	5,27	33,8	201,49	59,09
	5065	3,61	23,0	200,20	58,71
	5064	2,43	15,3	197,88	58,03
	14020	8,13	132,2	184,59	54,13
	14020	7,49	121,9	184,75	54,18
	14010	5,88	96,3	186,05	54,56
	14010	5,03	83,0	187,45	54,97
	20010	1,94	41,6	170,56	50,02
	20010	1,29	29,6	182,51	53,52
	20000	0,61	17,2	224,38	65,80
	20000	0,76	19,9	208,37	61,10
			průměr	197,22	57,84

Kabel	č. 3			d = 5,98 m	
	f [Hz]	U [V]	I [μ A]	C [pF]	C/d [pF/m]
	77,5	7,69	2,7	721,03	120,57
	77,5	5,90	2,1	730,95	122,23
	77,5	5,11	1,8	723,39	120,97
	77,5	3,84	1,4	748,71	125,20
	325,6	7,07	10,4	719,03	120,24
	325,5	5,65	8,3	718,29	120,12
	325,4	4,49	6,6	718,95	120,23
	325,3	3,38	4,9	709,28	118,61
	1213	7,42	40,6	717,93	120,06
	1213	5,89	32,4	721,75	120,69
	1212	4,55	25,0	721,52	120,65
	1212	3,70	20,3	720,46	120,48
	4888	5,94	134,4	736,72	123,20
	4888	4,29	97,5	740,01	123,75
	4885	3,51	80,1	743,50	124,33
	4885	2,70	62,2	750,55	125,51
	14000	3,02	194,0	730,28	122,12
	14000	2,25	151,2	763,94	127,75
	14000	1,49	104,5	797,30	133,33
	14000	0,96	61,8	731,83	122,38
	20080	1,84	160,1	689,65	115,33
	20080	1,35	128,6	755,03	126,26
	20080	1,05	108,2	816,76	136,58
	20000	1,14	114,8	801,36	134,01
			průměr	738,68	123,52

Kabel	č. 4	d = 2,92 m			
	f [Hz]	U [V]	I [μ A]	C [pF]	C/d [pF/m]
	80	7,70	1,3	335,88	115,03
	80	5,64	0,9	317,46	108,72
	80	4,51	0,7	308,78	105,75
	80	3,28	0,5	303,27	103,86
	319,7	7,62	4,9	320,12	109,63
	319,6	6,03	3,9	322,08	110,30
	319,5	5,80	3,7	317,78	108,83
	319,5	4,39	2,8	317,72	108,81
	1205	7,61	18,3	317,61	108,77
	1205	6,08	14,6	317,16	108,62
	1205	4,95	11,8	314,85	107,83
	1206	4,27	10,2	315,24	107,96
	5000	7,48	75,9	322,99	110,61
	5000	5,92	60,2	323,69	110,85
	5000	4,54	46,0	322,52	110,45
	5000	3,29	33,5	324,11	111,00
	14000	6,59	178,5	307,92	105,45
	14000	5,56	146,0	298,52	102,23
	14000	4,28	114,6	304,39	104,24
	14000	3,36	91,8	310,60	106,37
	20010	1,88	72,1	305,04	104,46
	20010	1,54	58,1	300,07	102,77
	20010	0,91	37,5	327,77	112,25
	20000	1,31	51,5	312,84	107,14
			průměr	315,35	108,00

Kabel	č. 5	d = 3,09 m			
	f [Hz]	U [V]	I [μ A]	C [pF]	C/d [pF/m]
	80	7,71	0,8	206,43	66,80
	80	6,13	0,6	194,72	63,02
	80	4,25	0,4	187,24	60,60
	80	3,34	0,3	178,69	57,83
	321,1	7,52	3,0	197,73	63,99
	321	6,29	2,5	197,06	63,77
	320,9	4,70	1,9	200,50	64,89
	320,8	3,88	1,5	191,80	62,07
	1209	7,62	11,6	200,40	64,85
	1209	5,76	8,6	196,55	63,61
	1209	4,45	6,6	195,24	63,19
	1209	3,37	5,0	195,31	63,21
	5059	7,49	48,0	201,61	65,25
	5059	6,12	39,1	200,99	65,05
	5059	5,31	34,0	201,44	65,19
	5060	4,40	27,5	196,58	63,62
	14030	8,16	131,9	183,37	59,34
	14030	6,99	113,6	184,36	59,66
	14030	5,26	86,4	186,33	60,30
	14030	4,05	67,3	188,50	61,00
	20080	7,79	185,6	188,84	61,11
	20080	5,68	137,2	191,45	61,96
	20080	4,72	108,6	182,37	59,02
	20080	3,12	80,5	204,50	66,18
			průměr	193,83	62,73

Kabel	č. 6	d = 4,59 m			
	f [Hz]	U [V]	I [μ A]	C [pF]	C/d [pF/m]
	80,5	7,62	2,0	518,92	113,05
	80,6	6,53	1,7	514,07	112,00
	80,7	5,89	1,5	502,25	109,42
	80,7	5,06	1,3	506,69	110,39
	319,6	7,69	7,6	492,15	107,22
	319,6	7,03	7,0	495,86	108,03
	319,6	5,16	5,1	492,19	107,23
	319,7	4,60	4,5	487,00	106,10
	1200	7,62	28,6	497,79	108,45
	1200	5,76	21,5	495,06	107,86
	1201	4,37	16,2	491,26	107,03
	1201	3,45	12,8	491,66	107,12
	4982	7,49	118,1	503,71	109,74
	4984	5,28	83,5	505,00	110,02
	4985	4,34	68,6	504,65	109,95
	4985	3,75	59,4	505,72	110,18
	13940	4,57	190,7	476,42	103,80
	13930	3,71	157,6	485,35	105,74
	13930	3,00	130,2	495,86	108,03
	13930	2,45	109,5	510,64	111,25
	20040	2,78	148,7	424,80	92,55
	20040	1,89	109,4	459,70	100,15
	20030	1,24	80,2	513,92	111,96
	20040	0,72	52,9	583,51	127,13
			průměr	498,09	108,52

Kabel	č. 7	d = 3,61 m			
f [Hz]	U [V]	I [μ A]	C [pF]	C/d [pF/m]	
80,5	7,66	1,8	464,59	128,69	
80,4	6,72	1,6	471,32	130,56	
80,4	5,54	1,3	464,51	128,67	
80,4	4,22	1,0	469,09	129,94	
320,1	7,65	7,1	461,46	127,83	
319,8	6,76	6,3	463,81	128,48	
319,7	6,12	5,7	463,66	128,44	
319,7	5,62	5,2	460,62	127,60	
1202	7,65	26,8	463,86	128,49	
1202	5,93	20,7	462,20	128,03	
1202	4,59	16,0	461,55	127,85	
1202	3,91	13,6	460,55	127,58	
4988	7,49	110,4	470,31	130,28	
4985	5,94	87,8	471,91	130,72	
4984	4,77	70,5	471,97	130,74	
4983	4,18	62,1	474,51	131,44	
13990	4,78	187,6	446,49	123,68	
13990	4,18	165,5	450,43	124,77	
14000	3,88	154,3	452,09	125,23	
14000	3,04	124,4	465,20	128,86	
19930	3,46	193,1	445,68	123,46	
19940	2,98	173,5	464,71	128,73	
19940	2,65	150,4	453,00	125,48	
19950	1,89	107,1	452,07	125,23	
průměr			461,90	127,95	

Kabel	č. 8	d = 3,08 m			
	f [Hz]	U [V]	I [μ A]	C [pF]	C/d [pF/m]
	80	7,71	1,4	361,25	117,29
	79,9	6,73	1,2	355,17	115,32
	79,9	5,98	1,1	366,41	118,96
	79,9	5,23	0,9	342,78	111,29
	319,6	7,69	5,4	349,69	113,54
	316,1	6,79	4,7	348,52	113,15
	316,6	5,99	4,1	344,09	111,72
	318,5	5,22	3,6	344,62	111,89
	1202	7,64	19,9	344,89	111,98
	1202	6,71	17,5	345,33	112,12
	1202	5,89	15,3	343,95	111,67
	1202	4,92	12,8	344,48	111,84
	4998	7,48	82,4	350,79	113,89
	4997	6,19	68,3	351,43	114,10
	4997	5,48	60,4	351,05	113,98
	4997	4,28	47,2	351,24	114,04
	14030	6,36	182,2	324,98	105,51
	14040	5,76	165,7	326,10	105,88
	14040	5,15	149,4	328,85	106,77
	14040	4,55	132,9	331,11	107,50
	20020	4,58	195,6	339,52	110,23
	20020	3,80	156,8	328,03	106,50
	20020	3,02	133,9	352,48	114,44
	20020	2,51	110,2	349,03	113,32
			průměr	344,82	111,96