

FYZIKA KOMUNIKAČNÍCH KANÁLŮ – A JAK JI JEDNODUŠE ZKOUMAT

Jan Koupil, Leoš Dvořák

Příspěvek popisuje několik možností, jak jednoduše zkoumat některé základní vlastnosti komunikačních kanálů, zejména při přenosu analogového signálu pomocí optického záření. Ukazuje, jak lze změřit frekvenční charakteristiku jediným měřením pomocí generátoru šumu a programu pro zobrazení spektra signálu. Ilustruje závislost útlumu signálu na délce světlovodu na modelu světlovodu z netradičních materiálů (želé apod.). V poslední části předvádí možnost jednoduchého „mechanicko-optického“ generování signálů různých průběhů. Popisuje i dva nové programy vytvořené pro zmíněné experimenty. Navržené pokusy mohou sloužit jako inspirace pro různé aktivity žáků a studentů na pomezí fyziky a ICT, při nichž se vystačí s počítačem se zvukovou kartou, doplněnou velmi jednoduchými hardwarovými doplňky a volně šířitelnými programy.

1 Úvod

Cílem tohoto příspěvku je dát náměty na několik jednoduchých měření resp. pokusů, k nimž nejsou potřeba žádné specializované hardwarové doplňky – a které přesto dostatečně názorně ukážou některé fyzikální aspekty přenosu a generování signálů. Naším záměrem je napomoci „stavět mosty“ mezi fyzikou a ICT ve školách.

Navržené pokusy jsou velmi jednoduché a doufáme, že dostatečně přitažlivé, takže by mohly bavit žáky i učitele. Ukazují hlavně principy příslušných jevů; pro zájemce však mohou být i motivací k seznámení s náročnějšími partiiemi přesahujícími středoškolskou úroveň (FFT, diferenciální rovnice popisující útlum záření při průchodu látkou, harmonická analýza apod.).

2 Frekvenční charakteristika jediným měřením

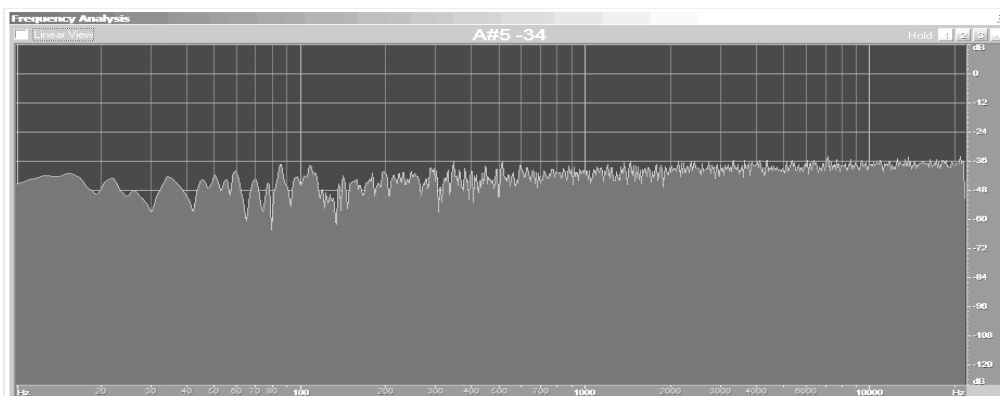
Motivací k tomuto měření byl „optický telefon“: Akustickým signálem modulujeme svit LED nebo žárovky, optické záření vedeme světlovodem nebo vzduchem, detekujeme fotodiodou nebo fototranzistorem, zesílíme a posloucháme. Podobná zařízení si stavěli radioamatéři již před mnoha desetiletími – a jednoduchý optický telefon, který není „černou skříňkou“, ale konstrukcí, do níž je vidět, je velmi zajímavé zařízení i pro středoškoláky (viz [1]).

Jak kvalitní je přenos takovým optickým telefonem? Nestarejme se nyní o zkreslení, ale o to „jak dobře“ jsou přeneseny různé frekvence – tedy o frekvenční charakteristiku přenosového kanálu. Jak ji jednoduše změřit?

Vhodným uspořádáním experimentu je přivést například do levého kanálu zvukové karty počítače zdrojový signál (tj. signál na vstupu optického telefonu), do pravého kanálu signál z výstupu telefonu a ukládat záznam stereo signálu. Na vstup telefonu pak můžeme připojit tónový generátor, „pískat“ tóny různých frekvencí, odečítat úroveň signálu na vstupu a na výstupu telefonu a frekvenční charakteristiku tak proměřit postupně, bod po bodu (resp. po jednotlivých frekvencích). Postupné měření ale může být zdlouhavé a únavné. Nešlo by to jednodušeji?

Pomůže nám zobrazení *spektra* signálu. To dnes běžně nabízejí jak „značkové“ tak leckteré freewareové programy. Matematicky jde o využití Fourierovy transformace signálu, v počítači prováděnou digitálně formou rychlé Fourierovy transformace (FFT). Příslušnou matematikou však studenty nemusíme strašit – stačí ukázat, jak se mění spektrum, když pískáme s proměnnou výškou tónu, a základní idea toho, co se zobrazuje, je jasná. Jak ale využít spektra signálu k tomu, abychom frekvenční charakteristiku změřili „naráz“?

Stačí místo jednoduchého tónu pracovat se zvukem který obsahuje (s pokud možno stejnou intenzitou) všechny frekvence v potřebném rozsahu. Takovému zvuku se říká *bílý šum*. Podobný šum umí vygenerovat vhodný software. Frekvenční charakteristika takového signálu je víceméně „rovná“, jak ji ukazuje obrázek. Takovýto signál přivedeme na vstup optického telefonu.



Obr. 1 Frekvenční charakteristika (přibližně) bílého šumu

Na výstupu však již frekvenční charakteristika rovná být nemusí. Jestliže přenos například potlačí vyšší frekvence, budou příslušné amplitudy nižší. Porovnáním amplitud na vstupu a na výstupu pro všechny frekvence získáme frekvenční charakteristiku.

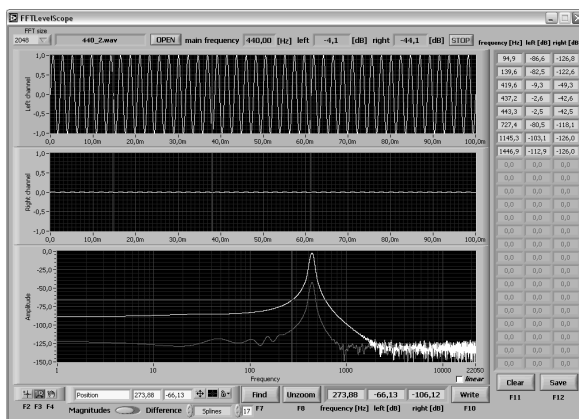
K tomu stačí vypočítat podíl obou amplitud nebo, vyjadřujeme-li je v logaritmické míře, odečíst od sebe příslušné hodnoty v decibelech. Příslušný výpočet může snadno provést počítač. Pro tento typ měření vytvořil první z autorů tohoto příspěvku (J. K.) vlastní program *FFT LevelScope*.

FFT LevelScope

Tento program je určen primárně pro FFT analýzu a zobrazení rozdílů intenzit signálů měřených v decibelech mezi levým a pravým kanálem. *FFT LevelScope* pracuje

se soubory wav (Windows PCM bez komprese a metadat); soubory musí být nahrány jako stereo a mohou mít vzorkování 11,025 kHz, 22,05 kHz nebo 44,1 kHz.

Program vykreslí průběhy signálů v souboru, spočítá v okolí vybraného místa v záznamu spektrum (tj. provede FFT z předem nastaveného počtu bodů) a vyhodnotí nejvýznamnější frekvenci a úroveň levého a pravého kanálu na této frekvenci. Ve spodním okně ukáže potom buď spočtená frekvenční spektra v obou kanálech nebo rozdíl těchto spekter. Úrovně signálů jsou přitom zobrazeny v logaritmické škále (v decibelech). Umožňuje také odečíst úrovní signálu a export odečtených hodnot do textového souboru.

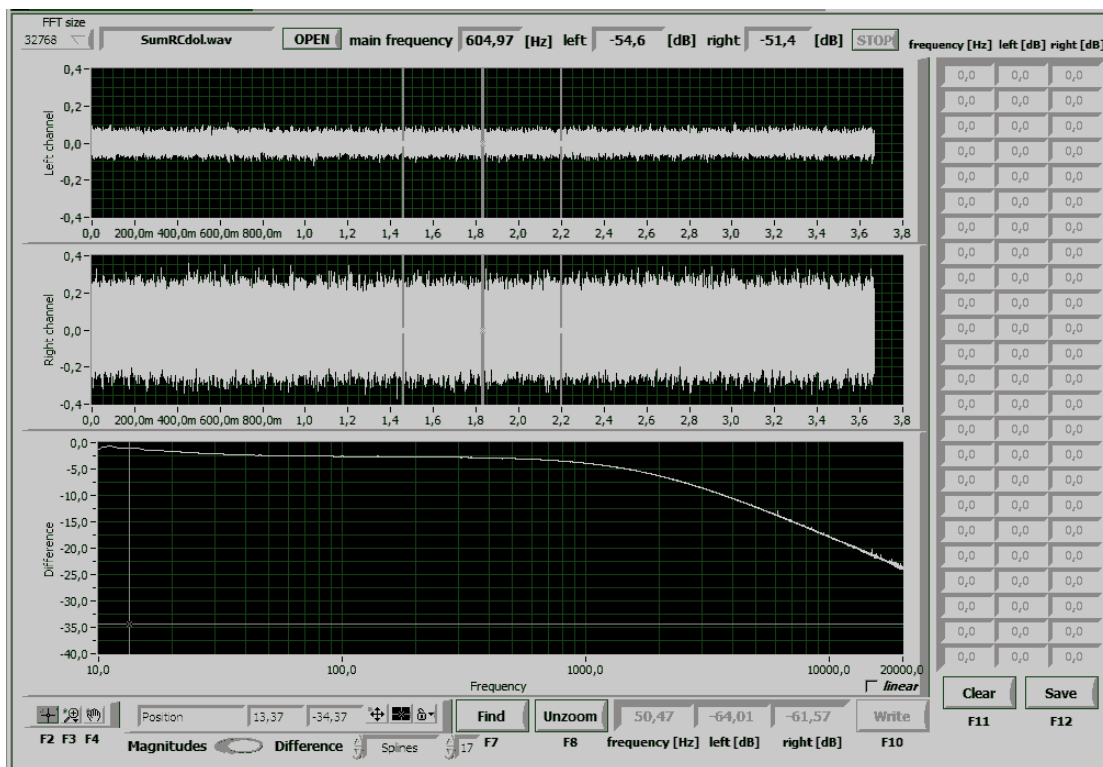


Obr. 2. Program *FFT LevelScope*

Detailnější popis programu *FFT LevelScope* je obsažen v nápovědě programu.

Naměřené charakteristiky

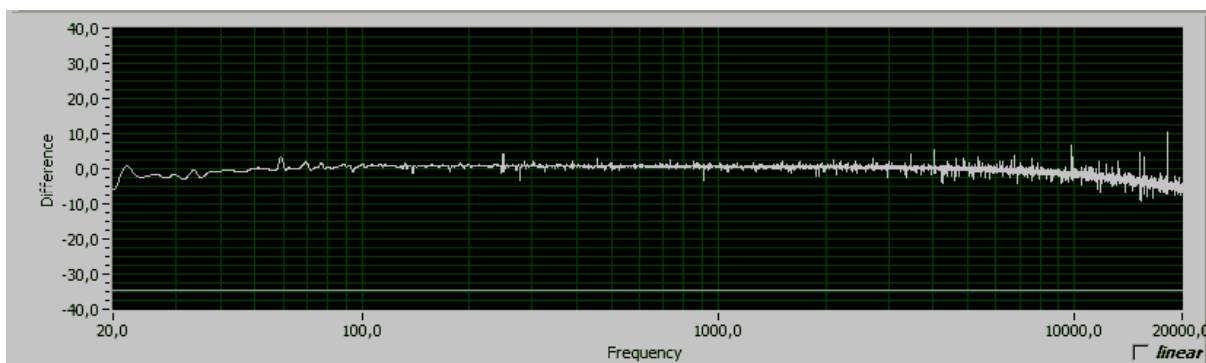
Jak podobná frekvenční charakteristika vypadá v „téměř ideálním případě“ ukazuje obr. 3.



Obr. 3. Naměřená frekvenční charakteristika RC-členu typu dolní propust.

V tomto případě byl přenosovým kanálem jednoduchý RC člen, který potlačil vyšší frekvence (asi od 1 kHz). Samozřejmě zde jde spíše o testovací měření, které demonstruje funkčnost daného principu měření. Je ale dobře vidět, jak pro vyšší kmitočty frekvenční charakteristika klesá se známou směrnicí 6 dB na oktávu (tj. pro 2x vyšší frekvenci je úroveň signálu poloviční).

Frekvenční charakteristiku již skutečného optického přenosového kanálu ukazuje obr. 4. V tomto případě je všem zdrojem světla svítivá dioda (LED).

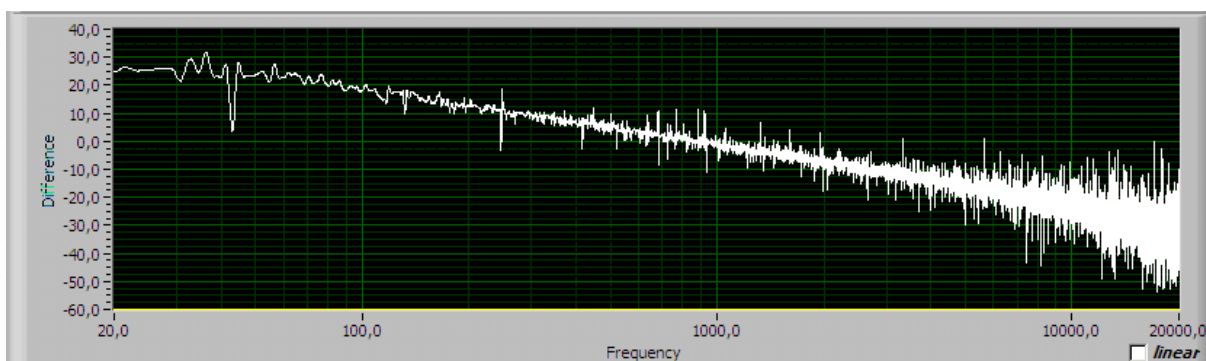


Obr. 4. Frekvenční charakteristika optického telefonu s LED

Je vidět, že frekvenční charakteristika je rovná až téměř do 20 kHz. (Výše již s běžnou zvukovou kartou měřit nemůžeme.) Zároveň vidíme, že naše měření dává poněkud „zašuměnou“, ale přesto dobře využitelnou frekvenční charakteristiku.

Vysílač optického telefonu využíval běžnou LED, jejíž napájecí proud se skládal ze stejnosměrné složky a ze vstupního střídavého signálu. Detektorem byl fototranzistor, jehož signál byl zesílen velmi jednoduchým jednostupňovým tranzistorovým zesilovačem. Principiální schéma a hodnoty některých součástí jsou uvedeny v [2].

Obr. 5 ukazuje frekvenční charakteristiku světelného telefonu se žárovkou. U vyšších frekvencí se výrazně projevuje šum; celkově je však vidět, že frekvenční charakteristika klesá (více méně již od nízkých frekvencí) se sklonem 6 dB na oktávu (tedy 20 dB na dekádu), podobně jako u RC-členu. S ohledem na tepelnou setrvačnost vlákna žárovky může být ale poněkud překvapující, že jsou signály o frekvencích stovek Hz až kilohertzů přeneseny vůbec.



Obr. 5. Frekvenční charakteristika optického telefonu se žárovkou

3 Netradiční model světlovodu – a jeho útlum

Dnes užívaná optická vlákna mají tak malý útlum, že není reálné ve školních podmínkách jednoduše změřit, jak tento útlum závisí na vzdálenosti. Zajímavý model, na němž lze útlum „světlovodu“ změřit, přináší učebnice anglického projektu Salters Horners Advanced Physics Course [3]. (Viz též [4].)

Místo optického vlákna užívá kus želé o příčných rozměrech asi 1x1 cm a délce do 20 cm. Zdrojem záření je infračervená LED, přijímačem infračervený fototranzistor. Signál dokonce ani není nutno nijak modulovat; úroveň signálu na výstupu udává proud fototranzistorem. Světlovod ze želé lze postupně zkracovat, změřené hodnoty signálu (v závislosti na délce světlovodu) zadat do Excelu, nechat vykreslit graf a změřenými hodnotami proložit vhodnou závislost. „Vhodnou“ je samozřejmě závislost exponenciální. (Po zlogaritmování amplitud signálu pak závislost lineární.) Celá idea je nádherně jednoduchá – a je určitě na místě zapropagovat ji i v českých školách.

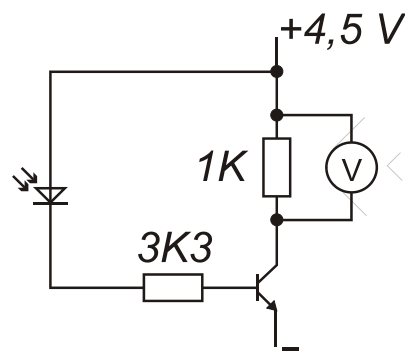
Praktická zkouška ukázala, že „navarřit“ z želé dlouhý pásek s rovnými stěnami není úplně triviální. (Alespoň pro druhého z autorů tohoto příspěvku – L. D.) Potřebnou formu sice můžeme vytvořit třeba s pomocí úzké elektrikářské lišty, ale želé má tendenci ulpívat na formě, na razantnější zásah reaguje vznikem trhliny (která se projeví vyšším útlumem) a necháme-li ho déle svému osudu, pak buď ztvrdne, nebo začne sloužit jako živná půda pro mezipředmětové vztahy směrem k biologii (a co to na něm roste, běžný fyzik ani informatik asi neurčí). Exponenciální závislost útlumu na délce sice naměříme, ale často poněkud upatláni od želé.

Podíváme-li se, co by ještě mohlo sloužit jako modelový světlovod, může nám zrak padnout na „tyčky“ lepidla do tavných pistolí. Jde o válečky o průměru cca 1 cm (my jsme vyzkoušeli tyčky o průměrech asi 7 a 11 mm) a délce až 25 cm. Útlum je obvykle vyšší než u želé, jak lze vidět už z jednoduchého pokusu, kdy do válečku posvítíme „po délce“ tužkovým laserem. Světlo se výrazně zeslabuje i rozptylem, takže tyčky tavného lepidla by opravdu nebyly dobrými světlovody – přesto je vidět, že na hranici válečku a vzduchu dochází k úplnému odrazu.

Útlum jsme vyzkoušeli s trochu jiným hardwarem než udával původní pramen [4]. Použili jsme dvojici IR vysílač – IR přijímač od firmy Agilent Technologies. Typové označení je HSDL4400 a HSDL5400; tyto součástky jsou již u nás na trhu v cenách zhruba 15 Kč. Výhodou je, že je k nim k dispozici podrobná dokumentace [5], kde najdeme spektrální charakteristiky, citlivost a řadu dalších parametrů.

Další výhodou je omezená citlivost fotodiody HSDL5400 na běžné osvětlení (ostatně daná dvojice součástek je určena i pro IrDA, bezdrátové audio a podobné účely). Protože proudy tekoucí fotodiodou jsou řádu mikroampér nebo méně, byl pro účely měření její proud zesílen jednoduchým zapojením (viz obr. 6).

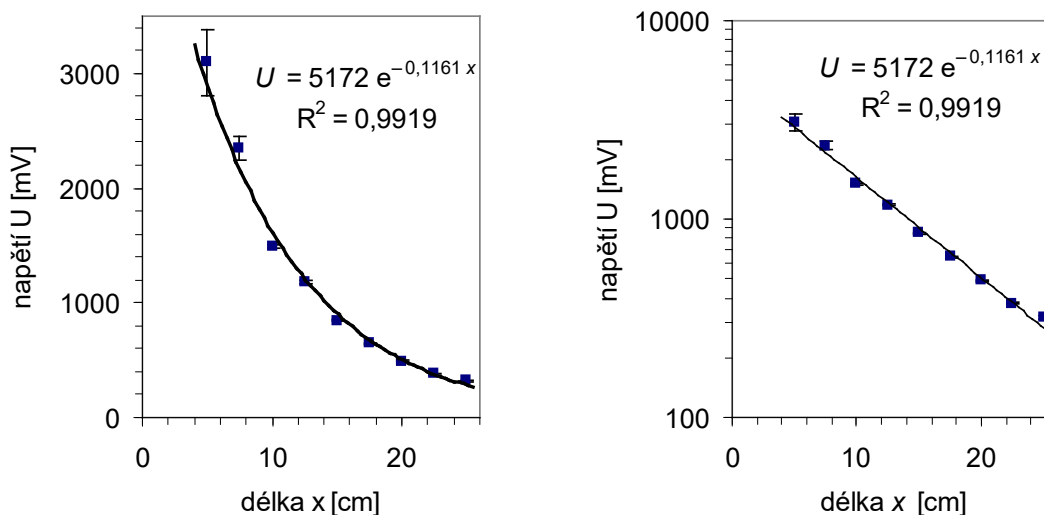
Jako tranzistor zde vyhoví např. BC547C, k měření napětí poslouží běžný multimetr. Potřebujeme-li snížit citlivost, lze v kolektoru místo rezistoru 1 k Ω použít rezistor o menším odporu (např. 100 Ω). Infračervený vysílač



Obr. 6. Zapojení detektoru IR záření

HSDL4400 byl napájen z ploché baterie přes rezistor o odporu 100 Ω, tekli jím proud asi 25 mA.

Měření ukázala, že útlum použitých tyček tavného lepidla se kus od kusu může i výrazněji lišit. Zkracujeme-li však jednu tyčku, výsledky docela dobře odpovídají exponenciálnímu poklesu výstupního signálu s délkou „světlovodu“. Obr. 7 to ukazuje jak v normálním, tak v semilogaritmickém zobrazení.



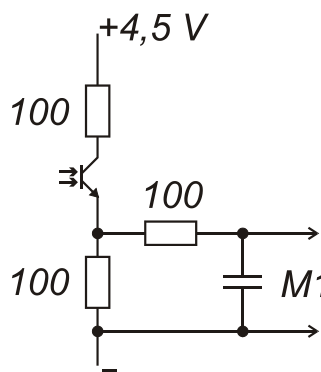
Obr. 7. Pokles výstupního signálu v závislosti na délce „světlovodu“

Jako světlovod by se daná tyčka příliš neuplatnila – výstupní signál poklesne na délce asi 20 cm zhruba desetkrát, což odpovídá útlumu 20 dB, tedy 100 dB na metr. (Starší tyčky lepidla měly útlum ještě o dost vyšší.) Ovšem k měření ilustrujícímu závislost útlumu na délce se hodí docela dobře.

4 Jak vytvářet sinusové a jiné signály bez generátoru

Pro demonstraci fyzikálních vlastností elektrických obvodů stejně jako pro demonstrace typu „co se děje ve zvukové kartě“ nebo „jak se zpracovává zvuk a co s ním můžeme dělat“ se nám hodí externí generátor funkcí. Pokud jej nemáme v kabinetě, není vše ztraceno – o výrobu velmi jednoduchého generátoru se můžeme pokusit svépomocí.

Využijeme toho, že pomocí fotodiody či fototranzistoru umíme převést osvětlení na elektrický signál. Pokud dokážeme osvětlení rozumným způsobem periodicky modulovat, získáme generátor funkcí.



Obr. 7. Zapojení fototranzistoru jako snímače ke kotoučku

Náš generátor využívá kotoučku s různými intenzitami šedé (viz obrázek), který nasadíme na rotující systém jako je dětská káča nebo sklíčidlo akumulátorové vrtačky. K osvětlenému rotujícímu kotoučku přiblížíme fototranzistor a snímaný signál již můžeme po event. zesílení využít. Pro tvorbu kotoučku vytvořil první z autorů (J. K.) vlastní program *Grey Disc Generator*, viz níže.

Jak kvalitní signál tímto způsobem získáme? Můžeme jej sledovat například klasickým osciloskopem, nebo přivést do linkového vstupu zvukové karty počítače a dále analyzovat.

Zjistíme tak, že generátor, který jsme touto jednoduchou metodou vytvořili, má mnoho různých chyb – které je ale velmi zajímavé rozebírat a diskutovat se žáky a studenty.

Především se jedná o problémy s přenosem úrovní šedi z počítače na papírový kotouček. V optimálním případě by tento přenos byl lineární; výsledky ale ukazují, že realita má do tohoto ideálu značně daleko. Netriviální je též přenos z rotujícího kotoučku na elektrický signál (fototranzistor zdaleka nesehmá osvětlení bodově a tedy poněkud vyhlazuje průběh signálu) a výsledek ovlivňují i následující procesy na vstupu zvukové karty a při digitalizaci.

Zatímco charakteristika fototranzistoru (převod osvětlení na napětí respektive proud) je víceméně dobře definována a popsána v katalogu, věrnost tisku šedých kotoučků je velmi nespolehlivá. Máme v zásadě dvě možnosti – buď se musíme smířit s tím, že náš generátor není dokonalý, nebo jej okalibrujeme s použitím jednoduchého multimetru, kotoučku s pilovým kmitem a úhloměru (a vytvoříme tak vlastně ICC profil našeho zařízení). S pomocí získaných dat bychom pak mohli vytvořit „lepší“ kotouček.

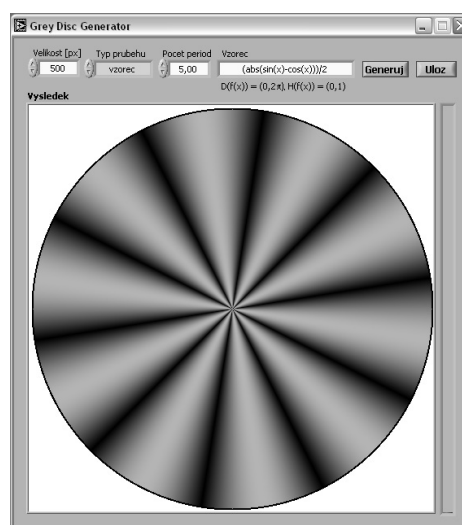
Pokud pracujeme se zvukovou kartou, jsme omezeni jejími charakteristikami, a to jak elektronikou (kondenzátor na vstupu apod.), tak vzorkovací frekvencí. Je třeba brát v úvahu, že citlivost neprofesionální zvukové karty obvykle rychle klesá při frekvencích pod 50 Hz a nad 16-18 kHz. Pokud pracujeme s obdélníkovými kmity, narazíme také na problémy s nabíjením kondenzátoru na vstupu zvukové karty a to někdy i při frekvencích kolem 100 Hz.

Grey Disc Generator

Grey Disc Generator je jednoduchý program určený pro optický generátor funkcí. Program vygeneruje kotouček – bitmapu ve stupních šedé s definovaným rozložením intenzity jako funkce úhlu.

Program umožňuje nastavit fyzickou velikost obrázku v pixelech, počet period, a u obdélníkového průběhu též střidu, tj. poměr šířky „černého pulzu“ k celé šířce periody.

V programu jsou předdefinovány průběhy sinus, obdélník, trojúhelník a pila. Pokud je třeba jiná funkce než předdefinované typy, je možno programu zadat vlastní vzorec (prakticky libovolnou funkci složenou z elementárních funkcí a operátorů).



Obr. 8. Program *Grey Disc Generator*

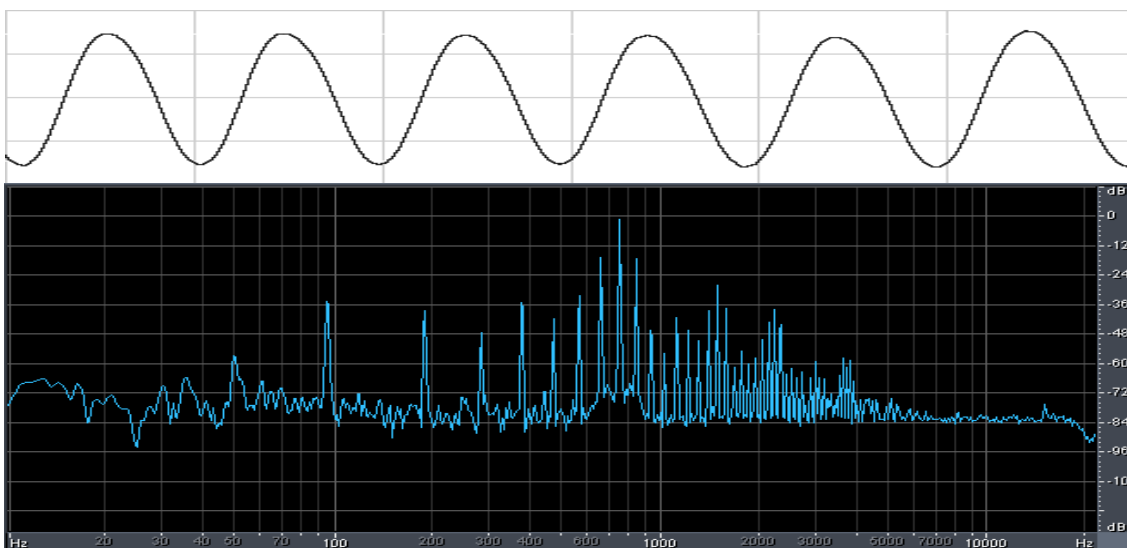
Vygenerované signály

Jaké signály tedy náš „mechanicko-optický generátor“ vytváří? Jeho schopnosti ilustruje několik následujících obrázků. Všechna měření byla provedena na notebooku s low-endovou integrovanou zvukovou kartou, obrazovky pochází ze software Adobe Audition. Kotoučky byly nasazeny na ruční akumulátorovou vrtačku a otáčely se přibližně s frekvencí 100 Hz.



Obr. 9. Vygenerovaný „sinusový“ signál

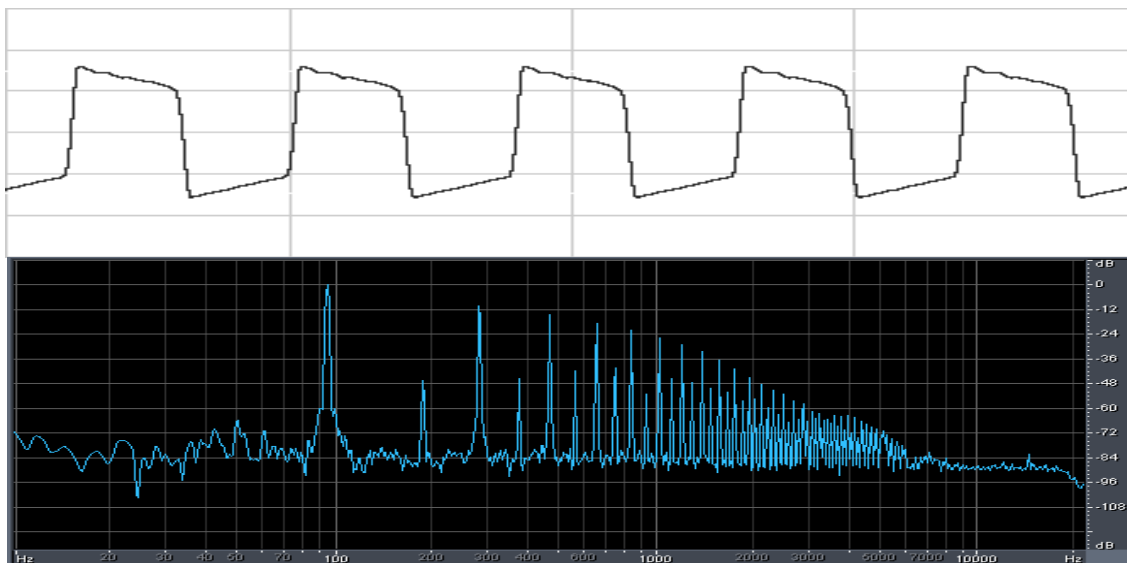
Na obrázku 9 je vidět průběh signálu naměřeného s použitím kotoučku se sinovým průběhem intenzity šedé. Nesymetrie mezi horní a dolní půlvlnou je způsobena kombinací nelinearity přenosu šedé na papír (ve světlech neumí tiskárna dobře rozlišovat a tak je dlouhou dobu papír zcela bez tisku) a vlastností vstupního kondenzátoru zvukové karty. Delší doba bez změny signálu způsobí, že se kondenzátor začne vybíjet a vytvoří tak pokles viditelný v horní půlvlně. Tento jev jsme eliminovali použitím kotoučku, kde bylo osm period se shodným sinusovým průběhem, výsledek ilustruje obr. 10.



Obr. 10. Signál z kotoučku s osmi siny a jeho frekvenční spektrum

Průběh vypadá již mnohem „sinusověji“, platíme za to ale nepřesností frekvence. Na spektru signálu vidíme jasnou základní frekvenci asi 800 Hz, ale kolem ní jsou další frekvence dané tím, že kotouček není usazen zcela přesně na ose vrtačky a její otáčky nejsou dokonale stabilní, takže ne všechny periody mají přesně stejnou dobu trvání. Na druhou stranu, pokud nám nevadí zkreslení kolem deseti procent, lze tento signál již použít jako sinusový docela dobře.

Je zajímavé všimnout si, jak je ve spektru signálu dobře vidět frekvence otáček vrtačky (necelých 100 Hz). Podobně lze určit frekvenci otáček i bez kotoučku – fototranzistor stačí přiblížit ke sklíčidlu vrtačky.

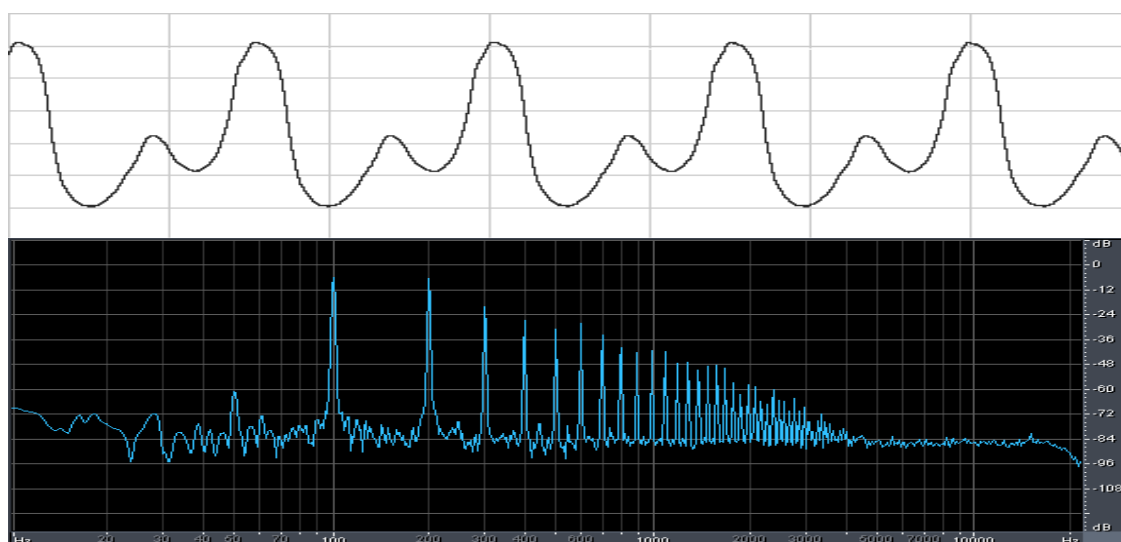


Obr. 11. Signál z kotoučku s jednou začerněnou polovinou

Obdélníkové průběhy (generované rotujícím kotoučkem se střídajícími se plochami černé a bílé) jsou opět zkresleny kondenzátorem na zvukové kartě. Místo rovných horních a dolních stran obdélníků vidíme klesající napětí.

S přemýšlivějšími studenty lze situaci rozebrat a pokles napětí jednoduše pochopit: Kondenzátor je v sérii se signálem (zřejmě na vstupu zvukové karty). Přivedeme-li na vstup konstantní napětí (např. v době, kdy je osvětlení fototranzistoru konstantní), teče kondenzátorem proud, kondenzátor se proto nabíjí, napětí na něm stoupá – a na vstup dalších zesilovacích stupňů ve zvukové kartě tedy „zbývá“ stále méně a méně.

Na frekvenčním spektru se toto zkreslení signálu projeví tak, že vidíme i přítomnost sudých násobků základní frekvence, které by skutečně obdélníkové kmity neobsahovaly.



Obr. 12. Signál $\sin(x) + \sin(2x)$.

Podobně bychom mohli pokračovat pilovými nebo trojúhelníkovými kmity. Na závěr, jako ilustraci možnosti programu generovat i libovolné průběhy uvádíme funkci

$\sin(x) + \sin(2x)$ – viz obr. 12. Stejně jako v minulých případech je patrné, že průběhy nejsou dokonalé, nicméně ze spektra je můžeme odečíst, že v signálu se nachází skutečně první dvě harmonické frekvence se stejnou amplitudou. Odstup dalších frekvencí je přitom 15 dB a více.

5 Závěr

Všechna popsaná měření jsou samozřejmě přibližná. Jejich účelem je názorně přiblížit některé pojmy a jevy spojené s přenosem signálů a jejich generováním.

Všechna měření by též šla rozšířit. U optického telefonu a podobných analogových přenosových kanálů bychom například mohli měřit zkreslení. (Harmonické zkreslení lze pomocí zobrazení spektra měřit velice jednoduše.) Při měření útlumu „světlovodu“ lze užít modulovaný signál a měřit i s pomocí počítačů. U „optomechanického“ generátoru signálů lze sestavit „profil“ našeho zařízení a korigovat stupně šedi tištěné na kotoučky tak, aby výsledné signály byly výrazně bližší např. požadované sinusovce. Některým z těchto problémů se hodláme časem věnovat v budoucích příspěvcích.

Literatura

- [1] DVOŘÁK, L.: *Pár věcí z tábora II, tentokrát o světle*. In: Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky, Příbram, srpen 1999. Ed. K.Rauner. ZČU Plzeň 1999, s. 35-38.
- [2] DVOŘÁK, L., KOUPIL, J.: *Netradiční komunikační technologie – a jak je jednoduše měřit*. In: Sborník z konference DIDFYZ 2004, Račkova dolina, SR, říjen 2004, v tisku.
- [3] *Salter's Horners Advanced Physics A2. Student Book*. Heinemann, Oxford 2001.
- [4] SWINBANK, E.: *Some Ideas from Salter's Horners Advanced Physics Course*. In: Dílny Heuréky 2003-2004. Sborník ze seminářů projektu Heuréka, Náchod 2003, 2004, v tisku.
- [5] AGILENT TECHNOLOGIES: *High-Performance IR Emitter and IR PIN Photodiode in Subminiature SMT Package* [on-line]. [cit. 28. 2. 2005] Technical datasheet. Dostupné na Internetu
<<http://literature.agilent.com/litweb/pdf/5988-5284EN.pdf>>

Autoři

Mgr. Jan Koupil
Univerzita Karlova v Praze – Matematicko-fyzikální fakulta
jan.koupil@mff.cuni.cz

Doc. RNDr. Leoš Dvořák, CSc.
Univerzita Karlova v Praze – Matematicko-fyzikální fakulta
leos.dvorak@mff.cuni.cz