

LABORATORNÍ CVIČENÍ 08 - Využití ADC a DAC – převod signálu z analogového na digitální a zpět (B2B99EKP - Elektronika a komunikace prakticky)

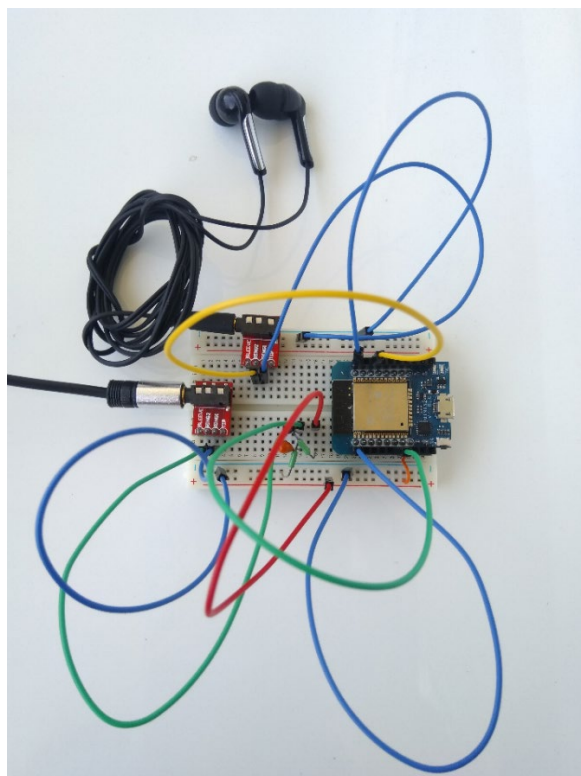
Obsah

Studenti se seznámí se složitějším využitím interních periférií AD a DA převodníku na kitu ESP32, respektive specifiky převodu analogového signálu na digitální a zpět. Poslechem si experimentálně ověří rozsah vnímaných frekvencí a teoretické zákony vzorkování signálu (vzorkovací teorém).

Bezpečnostní varování:

Z bezpečnostních důvodů při použití sluchátek k poslechu signálu využívejte vždy nejnižší použitelnou hlasitost. Tu nastavte i na začátku každého pokusu, a až postupně ji zvyšujte. Předejdete tak poškození sluchu (a nebude rušit své kolegy).

Na tuto úlohu je vhodné donést si vlastní sluchátka (hygienické doporučení).



Obr. 1 – Zapojení na nepájivém poli

Převod signálu z analogového na digitální (a opačně)

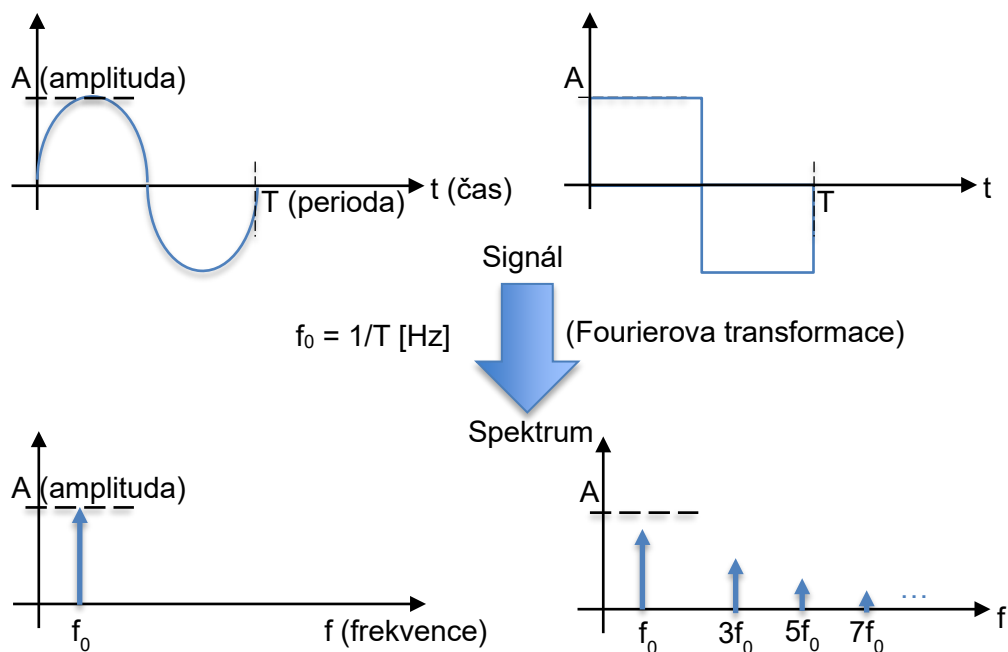
Každý signál může být převeden do své číslicové podoby, v ní dále zpracováván a převeden zpět, a to dokonale a beze ztráty informace jen za podmínky dodržení tzv. vzorkovacího teorému.

$$f_{sample} \geq 2 \cdot f_{max}$$

Tj. vzorkovací frekvence AD převodníku f_{sample} musí být nejméně dvojnásobná než nejvyšší frekvence v signálu obsažená f_{max} .

Abychom určili f_{max} , musíme znát alespoň přibližnou frekvenční reprezentaci signálu, jeho tzv. spektrum. To získáme tzv. Fourierovou transformací, která nám signál rozloží do jednotlivých tzv. harmonických signálů, řady sinusovek a kosinusovek s různou frekvencí.

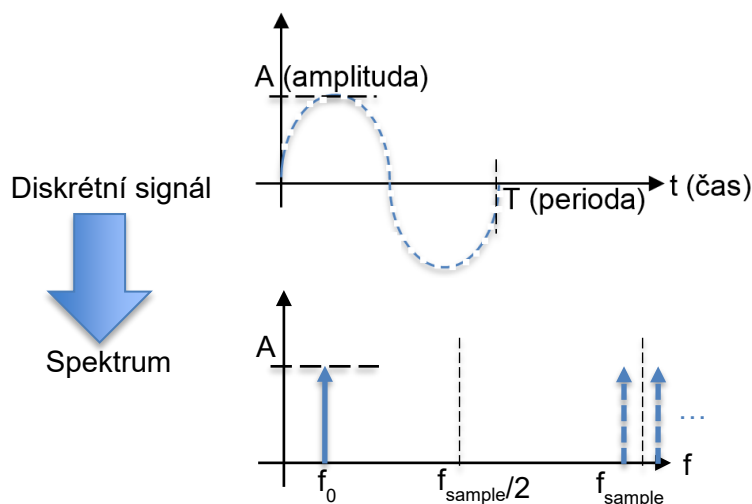
Pro naše dnešní experimenty si ukažme dva asi nejjednodušší příklady, se kterými budeme pracovat. Sinusovým, tzv. harmonickým signálem, a obdélníkovým signálem. Signály jsou na Obr.2 níže spolu se svými spektry.



Obr. 2 – Signál a jeho spektrum

Spektrální analýza je zde vysvětlena velmi zjednodušeně, pro účely dnešních experimentů. Detaily budou vysvětleny v dalších odborných předmětech. Zjednodušeně, sinusový - harmonický signál můžeme (je-li jeho frekvence v akustickém pásmu, tj. cca 20 Hz až 20 kHz, a je-li přiveden do reproduktoru, sluchátek) slyšet jako jeden tón. Každý další složitější signál, např. výše obdélníkový, je složeninou jejich většího množství. I toto si dnes experimentálně vyzkoušíme.

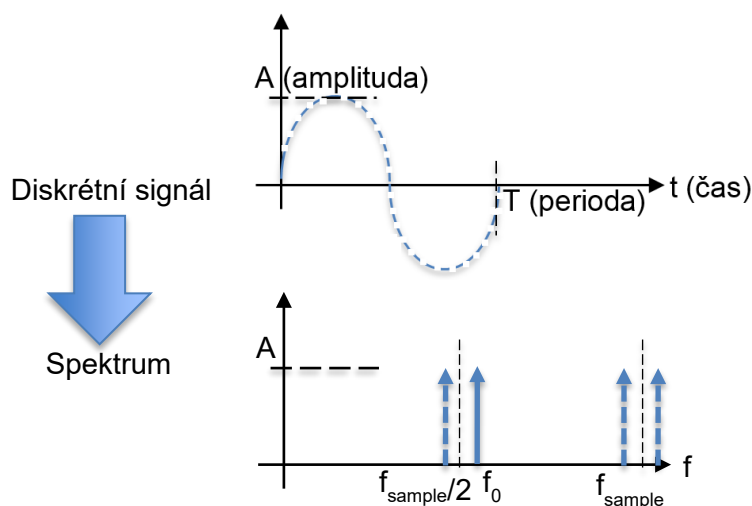
Nyní analogový (spojitý) signál navzorkujeme (diskretizujeme), tj. odebereme v pravidelných intervalech jen jeho vzorky. Spektrum takového diskrétního signálu se stane periodické s periodou poloviny vzorkovací frekvence f_{sample} , viz Obr. 3. Diskrétní signál tyto kopie původního spektra (čárkovaně), symetricky umístěné kolem $f_{sample}/2$, skutečně obsahuje!



Obr. 3 – Diskrétní signál a jeho spektrum

Proto, když jej pak chceme převést zpět na původní spojitý signál, pomocí DA převodníku, je nutné na jeho výstup připojit filtr (někdy nazývaný jako „rekonstrukční“, interpolační), který tyto složky (větší než $f_{\text{sample}}/2$) odstraní. Na výstupu DA převodníku, například do sluchátek, pak dostaneme zcela totožný signál, jako byl navzorkován AD převodníkem.

Na Obr. 4 je příklad co se stane, když vzorkovací podmínku porušíme už při vzorkování AD převodníkem. Tj. frekvence signálu (nebo jakákoliv frekvenční složka složitějšího signálu) bude vyšší než $f_{\text{sample}}/2$. Po jeho obnovení DA převodníkem, ve skutečnosti neobnovíme původní signál, ale jeho kopii s frekvencí $f_0 - f_{\text{sample}}/2$!



Obr. 4 – Diskrétní signál a jeho spektrum při porušení vzorkovací podmínky

Tento jev, nazývaný [aliasing](#), je v mnoha odvětvích široce známý, pozorovatelný, ba i uplatnitelný fyzikální jev. Jedná se o stejný jev jako je jev stroboskopický (rotační těleso pod blikajícím osvětlením se jeví rotující jinou rychlostí než je skutečná). Ve fotografii a filmu je známý jako moaré, tj. barevné a prostorové zkreslení obrazu velmi jemných struktur, menších než je prostorové rozlišení snímáče. V našem případě si aliasing experimentálně ukážeme tak, že uslyšíme tón o jiné frekvenci, než je originální.

Porušení vzorkovacího teorému se tak zpravidla vždy chceme vyhnout. Proto před AD převodník přidáváme tzv. antialiasingový filtr, který potlačí frekvence vyšší než je polovina vzorkovací frekvence.

V technické praxi ale i porušení vzorkovacího teorému dokážeme využít. Jelikož se signál i na mnoho násobně vyšší frekvenci periodicky překlopí, a to i do prvního pásma 0 až $f_{\text{sample}}/2$, lze tímto způsobem, za dodržení dalších přísných požadavků, digitalizovat i vysokofrekvenční signály. V pozdějších etapách studia, navazujících předmětech, se s tímto seznámíte jako se vzorkováním tzv. pásmových signálů.

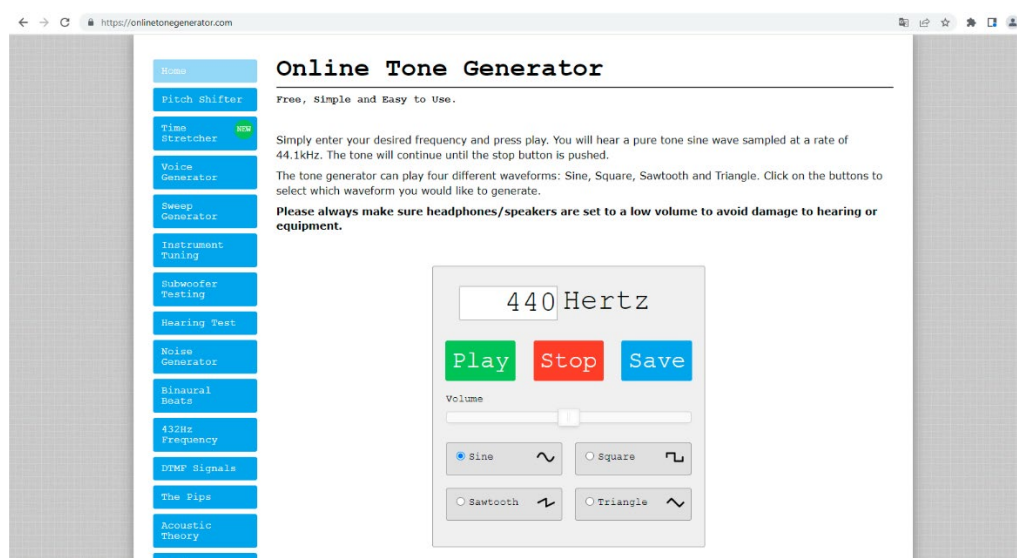
Pozorný čtenář si jistě všimne, že doposud nebylo v textu nic řečeno o kvantování. Tj. diskretizaci signálu v amplitudě. Tj. do omezeného počtu úrovní, zpravidla daného rozlišením AD, DA převodníku. Vliv kvantování si v našich experimentech také vyzkoušíme. Předchozí principy ale tedy na kvantování, zdali bude vůbec provedeno, nezávisí. Ne každý diskrétní signál tedy musí být kvantován. Obvykle, pro číslicové zpracování formou nějakého (binárního) kódu v mikro počítači, je to ale pravidlem.

Úkol 1 – Harmonický a neharmonický signál - poslech

Otevřeme si následující webovou stránku: <https://onlinetonegenerator.com/>.

Připojíme sluchátka, nastavujeme různé frekvence (např. 50 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 3 kHz, 10 kHz, 20 kHz, ...). Poslechem porovnáme jak zní čistý harmonický („Sine“) a naproti tomu obdélníkový („Square“) signál.

Tento signál, výstup zvukové karty, použijeme pro následující experimenty.



Obr. 5 – Generování signálu

Poznámka:

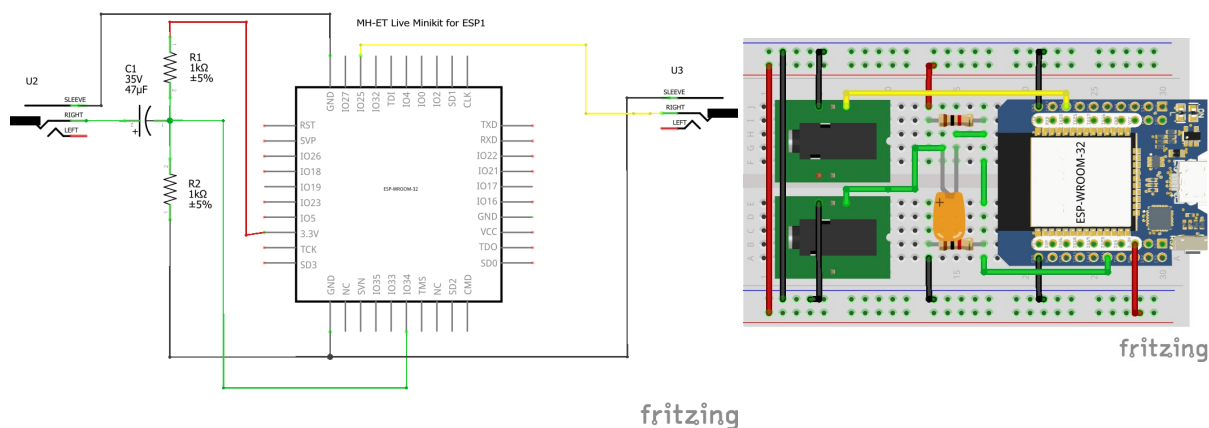
Při změně frekvencí v širokém rozsahu si můžete povšimnout, jak se zvuky na začátku a na konci rozsahu ozývají slaběji než ty v rozsahu cca od 300 Hz do cca 3 kHz. Je to dáno jak vlastnostmi HW, reproduktor, sluchátka mají omezenou frekvenční charakteristiku. (Chovají se sami jako filtr). Za druhé, i lidské ucho se chová jako filtr. Nejlépe slyší frekvence právě ve výše uvedeném pásmu. V této frekvenční oblasti se nachází většina řečového signálu. V technické praxi proto např. telefonní pásmo původní analogové telefonie bylo omezeno právě do asi 3 kHz, výstražné a varovné tóny mají často frekvenci právě mezi 1 a 3 kHz. Pro představu, vzorkovací kmitočet na CD je 44,1 kHz.

Úkol:

- 1) Předpokládáme rozsah řečového signálu omezený do 3 kHz. Jaký minimální vzorkovací kmitočet AD převodníku musí být použit? Doplňte: Hz
- 2) Je-li vzorkovací kmitočet DA převodníku CD přehrávače 44,1 kHz, jaká je maximální frekvence která by se měla v originálním zvukovém signálu objevit? Doplňte: Hz

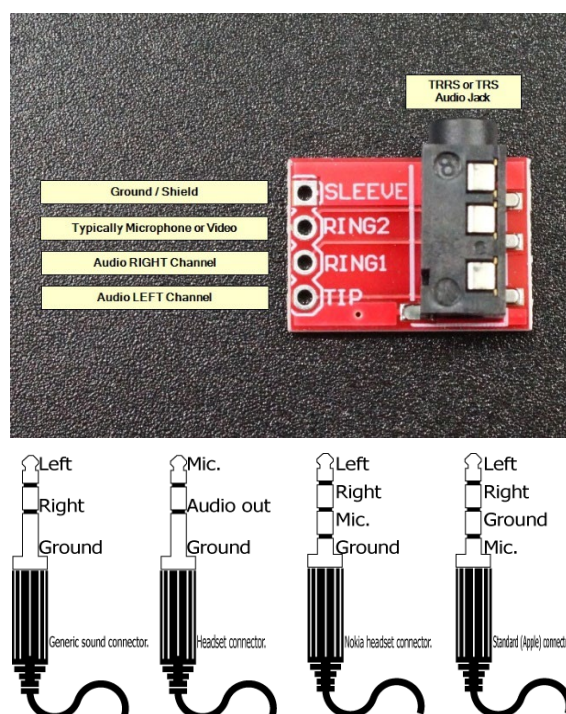
Úkol 2 – Zapojení AD a DA převodníku s ESP32 – připojení zvukové karty PC a sluchátek

Kit ESP32 zapojíme podle schématu na obrázku 6.



Obr. 6 – Zapojení

Vstupní jack konektor (zdířka) U2 spojíme propojovacím jack kabelem (kolík-kolík) se zvukovou kartou PC. Do výstupního jack konektoru (zdířka) U3 připojíme sluchátka. Náš modul jack konektoru (zdířky) je zapojen podle Obr. 7, kde je též naznačeno i zapojení nejčastěji používaných sluchátek (různých výrobců – s/bez mikrofonu, tlačítka) na 3 a 4 pinové jack kolíky.



Obr. 7 – Modul jack konektoru (zdířky) / zapojení různých jack konektorů (kolík) [zdroj / zdroj]

Poznámka ke vstupnímu obvodu C1, R1, R2:

Napětí ze zvukové karty může nabývat proti společné zemi (GND) symetricky kladných i záporných hodnot až do amplitudy 1 V (tedy rozkmit až 2 V). Náš interní AD převodník ESP32 ale umí pracovat pouze s kladným napětím (v rozsahu 0 až U_{ref} , resp. 3.3 V). Vstupní obvod tvořený C1, R1 a R2 tak kondenzátorem C1 nejdříve obvody stejnosměrně oddělí (kondenzátor nepropouští stejnosměrnou složku). A následně děličem R1, R2 signálu přidá umělý napěťový posuv (offset) do jedné poloviny U_{ref} , tedy 1.5 V. Rozkmit signálu na vstupu převodníku tak bude 0,5 V ($1,5 \text{ V} - 1 \text{ V}$) až 2,5 V ($1,5 \text{ V} + 1 \text{ V}$).

Úkol 3 – Využití ADC a DAC – převod signálu z analogového na digitální a zpět

Pro ESP32 nyní napíšeme velice jednoduchý program, který vždy pouze přečte hodnotu z AD převodníku (funkce: `value = analogRead(analogPin)`) a obratem ji zapíše do DA převodníku (funkce: `dacWrite(analogPin, value)`). V programu je dále třeba se vyrovnat s tím, že AD převodník je 12 bitový, zatímco DA převodník „jen“ 8 bitový. K úpravě počtu bitů se používá funkce `analogReadResolution(bitResolution)`, ale úplně stejného výsledku dosáhneme bitovým posuvem vpravo o 4 bity (`data >> 4`). Tímto způsobem si též nasimulujeme různé bitové rozlišení vzorkování AD převodníku.

Vzorový kód:

```
#include <Arduino.h>

#define ADC0 34
#define DAC0 25

int data = 0;

void setup() {

    pinMode(ADC0, INPUT);
    pinMode(DAC0, OUTPUT);

}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {

    data = analogRead(ADC0);
    analogReadResolution(8);
    dacWrite(DAC0, (data >> 0));

}
```

Tento program slouží jen jako jednoduchá ukázka řetězce přenosu analogový-digitální-digitální-analogový signál. Přípravek také postrádá vstupní antialiasingový a výstupní rekonstrukční filtr. To ale v našem dalším experimentu s výhodou využijeme pro ukázkou důsledků porušení vzorkovacího teoremu. Zejména však skutečná vzorkovací frekvence AD a DA převodníku zde není úplně přesně určena, může drobně fluktuovat. Převodníky zde běží řízeny programovou obsluhou s maximální možnou frekvencí danou, závislou na běhu programu. Toto řešení je pedagogicky názorné a jednoduché. V reálné praxi je však třeba, aby převodníky běžely kontinuálně, nezávisle na programové obsluze, různé délce výkonu různých instrukcí. (Poznámka: S využitím značně složitější programové obsluhy a složitějších interních periférií, např. DMA (přímý přístup do paměti) a časovačů, toho lze i s použitím ESP32 dosáhnout.)

Úkol:

Do přípravku nahrajeme obslužný program (např. výše). Přípravek připojíme k výstupu ze zvukové karty PC (často zelený jack), připojíme sluchátka. Přípravek vyzkoušíme poslechem nějaké hudby. Na začátku nastavíme ovladač hlasitosti na minimum a jako příklad použijeme nejlépe monofonní nahrávku, např. [zde](#).

- 1) Vyzkoušíme snižovat bitové rozlišení AD převodníku funkcí `analogReadResolution`, nebo bitovým posuvem (`>>`), např. pro hodnoty 8, 6, 4 a 2 bity. Sledujeme zhoršující se kvalitu zvuku (může být třeba měnit nastavení hlasitosti). Můžeme též vyzkoušet nastavit rozlišení 10 a 12 bitů (Otázka: Jak se 12 bitů ne-vejde do 8?)
- 2) Přibližně určíme dosaženou vzorkovací frekvenci. A to tak, že do přípravku pustíme harmonické („Sine“) signály z „Tone generátoru“ (viz úkol 1) v rozsahu 100 Hz až např. 10 kHz, např. po 100 Hz. (Přibližně víme, že vzorkovací frekvence AD převodníku zde je nižší než 10 kHz, a DA převodník je skoro řádově rychlejší.) Sledujeme, při jaké vstupní frekvenci nastane překročení $f_{\text{sample}}/2$. To se projeví tím, že dosud stoupající frekvence se začne snižovat, tj. slyšíme její aliasovaný obraz, nikoli ji samotnou. Přibližná vzorkovací frekvence je asi: kHz

Úkol 4 – Využití ADC a DAC – ověření vzorkovacího teorému

V tomto úkolu si vzorkovací frekvenci cíleně (s větší přesností než bylo možno v předchozím případě) omezíme na 1 kHz. Budeme tak lépe sledovat projevy vzorkovacího teorému.

Vzorkovací kmitočet cíleně omezíme tak, že do hlavní smyčky vložíme 1ms zpoždění (`delay(1)`). (Ani toto řešení není zcela přesné a pro nasazení v technické praxi dostatečné. Ale při předpokladu, že vzorkovací frekvence je dominantně omezená AD převodníkem a 1ms je dostatečně delší než samotný $1/f_{\text{sample}}$, je toto pro nás již dostatečné.)

Vzorový kód:

```
#include <Arduino.h>

#define ADC0 34
#define DAC0 25

int data = 0;

void setup() {

    pinMode(ADC0, INPUT);
    pinMode(DAC0, OUTPUT);

}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {

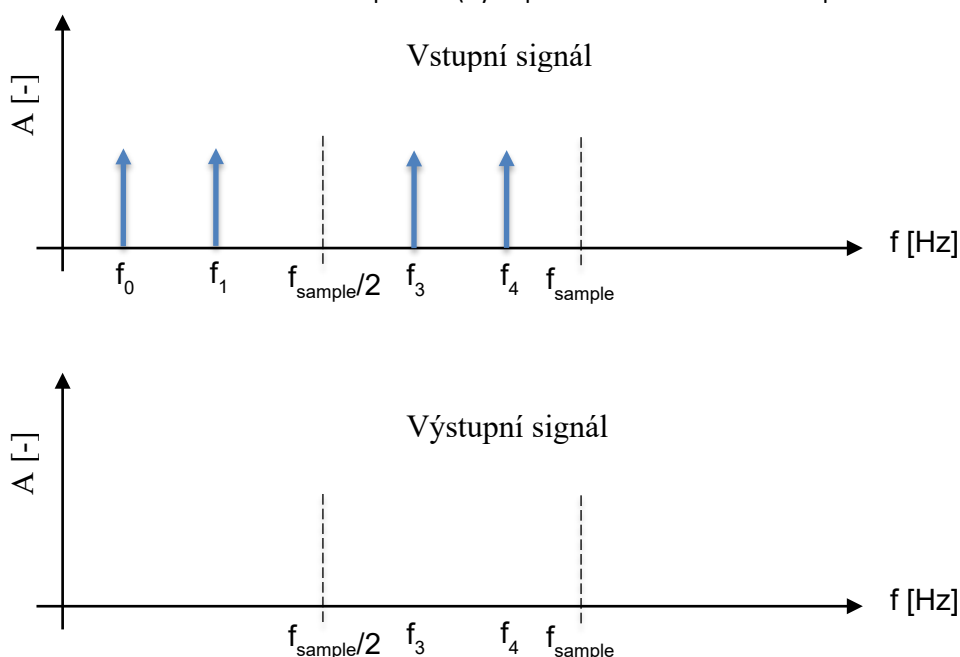
    data = analogRead(ADC0);
    analogReadResolution(8);
    dacWrite(DAC0, (data >> 0));
    delay(1);
}
```

Tónovým generátorem do přípravku použijeme harmonický signál o frekvenci 100 Hz až cca 2 kHz, a poslechem sledujeme, jak se mění tóny s frekvencí vyšší a nižší než je $f_{\text{sample}}/2$. Pro porovnání k jaké změně dochází si lze do druhého sluchátka pustit původní signál, propojením signálů „tip“ na modulech jack zdířek. Výsledky, alespoň pro dva tóny s frekvencí pod a nad $f_{\text{sample}}/2$ si zaznamenejte do tabulky, obrázku spekter (z obrázku též snadněji určíte frekvenci aliasovaného tónu).

Tabulka výsledků:

$f_{\text{sample}} = \dots\dots\dots$ Hz		
Pokus č.	Vstupní frekvence	Frekvence na výstupu
f_1		
f_2		
f_3		
f_4		

Frekvence naznačte do obrázku spektra. (Výstupní frekvence zaznačte do spodního obrázku)



Aliasing lze samozřejmě otestovat i výše než nad f_{sample} . Můžeme pozorovat, jak i pro mnohem vyšší frekvence jsou tyto signály periodicky překládány zpět do prvního (základního) pásma. Tímto si prakticky ověříme, že spektrum diskrétního (navzorkovaného) signálu je do nekonečna periodické.

Na úplný závěr si například lze s takto omezeným vzorkovacím kmitočtem poslechnout původní zvukovou nahrávku, příp. i jemně změnit f_{sample} na 2 kHz (`delayMicroseconds(500)`).

Závěr

V průběhu cvičení se studenti seznámili s principem převodu analogového signálu do digitálního a zpět, seznámili se s frekvenční reprezentací signálů, vyzkoušeli si vliv omezeného kvantování (rozlišení) AD převodníku a prakticky si vyzkoušeli vzorkovací teorém.