

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

Vliv nepřesnosti vzorkovací periody na frekvenční analýzu

EFFECT OF SAMPLING PERIOD ERROR ON FREQUENCY ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Daniel Pietrowicz

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	**Daniel Pietrowicz**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	**Ing. Daniel Zuth, Ph.D.**
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv nepřesnosti vzorkovací periody na frekvenční analýzu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude obsahovat několik simulačních experimentů, kde bude porovnáván vliv nepřesnosti vzorkovací periody na frekvenční analýzu. Experimenty budou vytvářeny v prostředí Matlab.

Cíle bakalářské práce:

Popište teorii měření v souvislosti s digitalizací signálu.
Popište princip frekvenční analýzy.
Popište možnosti frekvenční analýzy v prostředí Matlab.
Vytvořte simulační model, který generuje signál zatížený chybou.
Proveďte systematické porovnání vlivu nepřesnosti frekvenční periody na frekvenční analýzu.

Seznam doporučené literatury:

CHUDÝ, Vladimír, Rudolf PALENČÁR, Eva KUREKOVÁ a Martin HALAJ, 1999. Meranie technických veličín. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave. Edícia vysokoškolských učebníc.
ISBN 8022712752.

MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink. MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink MATLAB & Simulink [online]. Copyright © 1994 [cit. 25.10.2018]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/products/matlab.html

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
ředitel ústavu	děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce bude zaměřena na měření ve spojitosti s digitalizací analogového signálu a analýzy vlivu chyby vzorkovací periody. Stručného rozebrání principu frekvenční analýzy a popsání možností provedení tohoto postupu v prostředí Matlab. Následně vytvoření simulačního modelu spojitého signálu a jeho diskretizace zatížená vzorkovací chybou. Systematická komparace vlivu nepřesnosti frekvenční periody na navazující frekvenční analýzu.

ABSTRACT

This thesis will be focused on signal measurement in connection with digitization and analysis inaccuracy of sampling peroid effect. Brief narration of frequency analysis and description of Matlab and his capabilities with this issue. Then creation procedure for simulation model of analog signal and his fault digitization via sampling period. Systematic comparation of this effect on inaccuracy of sampling period on frequency analysis.

KLÍČOVÁ SLOVA

Analogový signál, digitalizace signálu, diskretizace, vzorkování, kvantování, frekvenční analýza, rychlá Fourierova transformace, Matlab

KEYWORDS

Analog signal, signal digitization, discretization, sampling, quantization, frequency analysis, Fast Fourier transform, Matlab

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PIETROWICZ, Daniel. *Vliv nepřesnosti vzorkovací periody na frekvenční analýzu.* Brno, 2019. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117086. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Daniel Zuth.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl vyjádřit vděk svému vedoucímu práce, Ing. Danielu Zuthovi, Ph.D., za ochotu a vstřícnost. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a blízkým za morální podporu.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Danila Zutha, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne ……

Daniel Pietrowicz

OBSAH

1 ÚVOD 15

2 DIGITALIZACE 17
2.1 Analogové a číslicové signály 17
2.2 Vzorkování 20
2.3 Kvantování 21

3 ČASOVĚ FREKVENČNÍ ANALÝZA SIGNÁLU 23
3.1 Fourierovy řady 23
3.2 Fourierova transformace (FT) 24
3.3 Diskrétní Fourierova transformace (DFT) 24
3.4 Rychlá Fourierova transformace (FFT) 25

4 PROSTŘEDÍ MATLAB 27
4.1 Frekvenční analýza v MatLabu 27

5 A/Č PŘEVODNÍKY 31
5.1 Dělení a parametry převodníků 31
5.2 Převodníky na trhu 31

6 MODEL 33
6.1 Nepřesnost vzorkovací periody 33
6.2 Nepřesnost v závislosti na frekvenci vzorkování 34
6.3 Nepřesnost v závislosti na frekvenci vstupního signálu 38
6.4 Procentuální nepřesnost v audiosignálu 44

7 ZÁVĚR 51

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 53

9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK 55

10 SEZNAM PŘÍLOH 57

1 ÚVOD

Konverze analogového signálu na digitální je dnes naprosto standartní věcí, ačkoliv si to běžní uživatelé počítačů či různé výpočetní techniky neuvědomují. Při telefonním hovoru převádíme spojitý zvuk na digitální, např. hlas, a pak jej přenášíme dál.

Během tohoto procesu je potřeba tří základních kroků. Jedná se o vzorkování, kvantování a následné kódování. Dva první kroky jsou přiblíženy níže v dokumentu.

Jakmile začneme převádět analogový signál, nejsme schopni jej zpětnou transformací zcela napodobit. Dochází k nevratné ztrátě dat. Avšak u zvuku, díky nedokonalosti lidského sluchu, při dostatečném rozlišení a počtu vzorků nejsme schopni rozeznat rozdíl.

K transformaci používáme takzvané analogové/číslicové převodníky. Jsou dimenzovány podle jejich využití. Zejména u telefonního hovoru se pohybujeme mezi 20 až 4000 Hz, protože není potřeba přenášet mnoho informací. Zatímco u nahrávání zvukových desek využíváme celé slyšitelné spektrum, které je přibližně od 20 do 20 000 Hz.

V této spojitosti navazuje vzorkovací frekvence. Existuje zažité pravidlo, které udává, že vzorkování by mělo mít minimálně dvojnásobnou frekvenci než snímaný signál. Tedy u hovoru bychom se pohybovali nad 8 000 Hz a při nahrávání hudby překročíme 40 000 Hz.

Existují různá pravidla pro digitalizaci. Výše zmíněné je připisováno panu Shannonovi. Nazývá se Shannonův teorém.

Problematiku tohoto oboru přiblíží simulace v prostředí Matlabu. Matlab je programovací jazyk uzpůsobený pro výpočetní úlohy, simulace, modelování a spousty dalších. Je schopen vygenerovat vstupní data, spojitý signál a převést je na diskrétní.

Dále v modelu bude i frekvenční analýza. V případě, že vygenerujeme harmonický signál o jisté periodě a frekvenci, frekvenční analýza vynesená do grafu nám ukáže rovnou čáru o stejné amplitudě a ve stejné frekvenci.

Cílem této práce je analyzovat velikost vlivu nepřesnosti vzorkovací periody. Ta může být způsobená hardwarovým nedostatkem převodníku, špatnou metodou měření a další.

Nepřesnost je definovaná jako procentuální hodnota samplovací periody, kterou přičteme nebo odečteme z této periody. Přičemž se odebraný vzorek ve špatném čase bude jevit jako hodnota, kterou převodník změřil ve správný okamžik. Dojde ke zkreslení, zakřivení vstupního signálu.

To má za následek jednak výše zmíněné zkreslení a zároveň zanesení sekundárních složek do vstupního signálu.

Velikost tohoto zatížení můžeme vyhodnotit z různých aspektů, vzorkování nebo samotný rozsah a pravděpodobnost výskytu nepřesnosti.

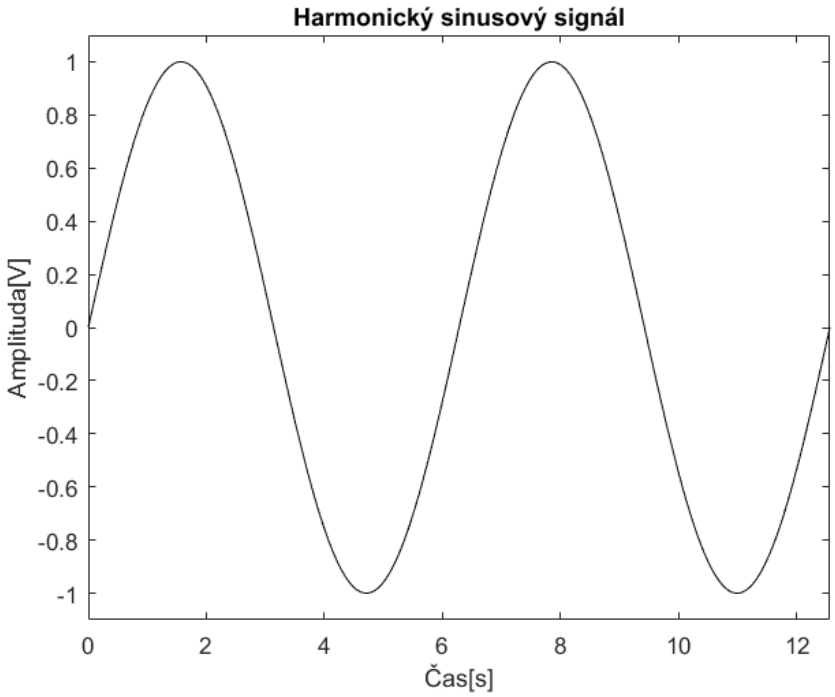
Při samotném vzorkování tento jev můžeme ovlivnit samplovací frekvencí nebo frekvencí a amplitudou samotného analogového signálu. Čím větší rozdíl mezi frekvencí vstupního signálu a vzorkováním, tím je menší rozsah změny amplitudy mezi vzorky. Tedy nepřesnost bude snížena. Amplituda má vliv z jiného hlediska, v ní je chyba relativní, procentuální. Bude se odvíjet od velikosti sledované veličiny. Procento bude stejné, ale velikost poroste zároveň s měřeným dějem.

Rozsah nepřesností je reálný od 1 do 99 % do plusu i mínusu a pravděpodobnost může být prakticky jakákoliv. Například může být zkreslen každý vzorek, nebo každý patnáctý. V modelu použitému v dokumentu je výskyt náhodný. I přes definovanou pravděpodobnost může dojít k selhání hned dvakrát po sobě nebo jednou za dvě periody.

2 DIGITALIZACE

2.1 Analogové a číslicové signály

Analogové signály můžeme rozlišit podle spousty různých kritérií. Hlavní rozdíl mezi analogovým a číslicovým signálem je ten, že analogový je spojitý v čase i amplitudě. Digitální tuto vlastnost nemá. U analogového nedokážeme detekovat chybu, rušení signálu ani jí následně opravit. [1]

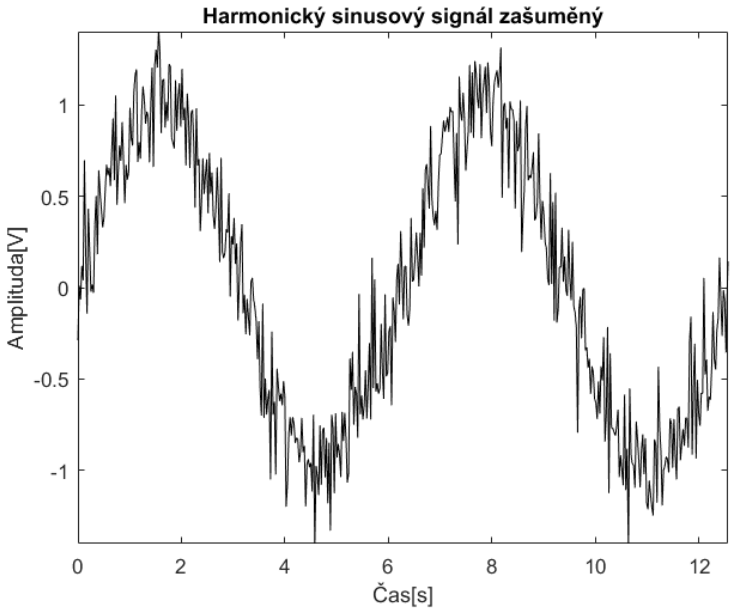


Obr. 2.1 Model harmonického signálu.

Na obrázku č. 2.1 je vidět sinusový harmonický signál. Jedná se pouze o model. Zvětšení grafu by ukázalo, že to jsou jen vygenerované body proložené přímkou. Pro potřeby této práce jsou tyto podmínky vyhovující.

Jako analogovou veličinu si můžeme představit například zvuk, vibrace, teplotu a jiné. Každá veličina má své specifické vlastnosti. Mezi základní dvě patří amplituda a frekvence. Amplituda popisuje velikost vzniklé veličiny a frekvence určuje kmitání. Například u zvuku nebo vibrací se pohybujeme ve vyšších frekvencích. Při vibracích můžeme sledovat chování mechanických částí. Zde by zdrojem kmitání mohl být elektromotor. Měření teploty je pomalejším příkladem, teplota se mění mnohonásobně pomaleji než otáčky motoru a jím způsobené vibrace.

Spojitý signál je obvykle zkreslen rušivým efektem okolního prostředí. Jedná se o nežádoucí vliv. Bohužel u analogového signálu nejsme schopni toto rušení eliminovat. Jedná se o jeden z důvodů převodu na digitální signál. U digitálního jsme schopni tyto vlivy potlačit.

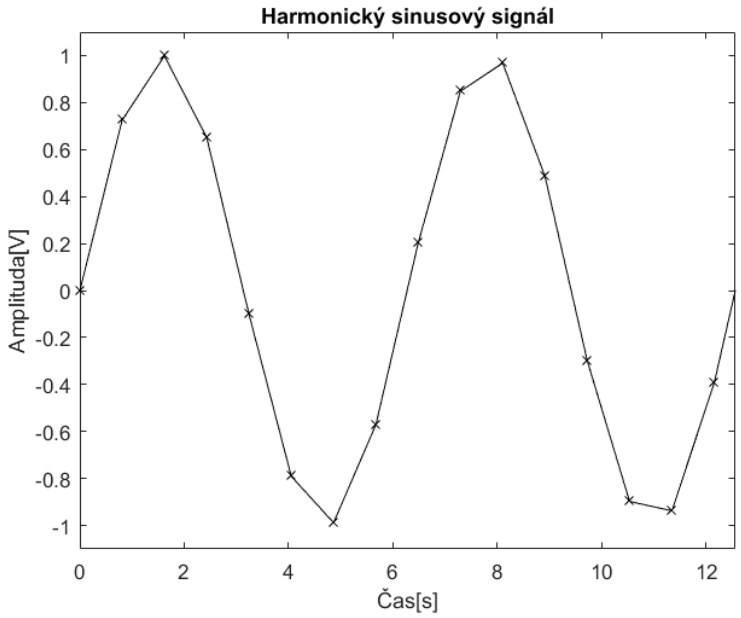


Obr. 2.2 Zašuměný signál.

Na obrázku č. 2.2 je zobrazen signál, který je zatížen rušivým vlivem okolí, rozdíl je znatelný. Tento efekt může být způsoben různými prvky. Například při nahrávání zvuku se může jednat o nežádoucí hluk v pozadí. Za pomocí digitalizace jej však můžeme významně potlačit.

Číslicový signál je těžší popsat ve stejných mezích jako analogový, jelikož se odvíjí podle fáze, ve které si jej odchytíme. V začátku snímání se jeví jako bod v daný naměřený okamžik. Při převodu zpět na analogový je také spojitý v čase i amplitudě. Ale signál již nebude hladký, nýbrž schodovitý. Má tu výhodu, že jsme schopni ho zasadit do jistých mezí, např ±1 V. Při reprodukování signálu nedochází ke zkreslení, zmenšení nebo zvětšení těchto hodnot. [1]

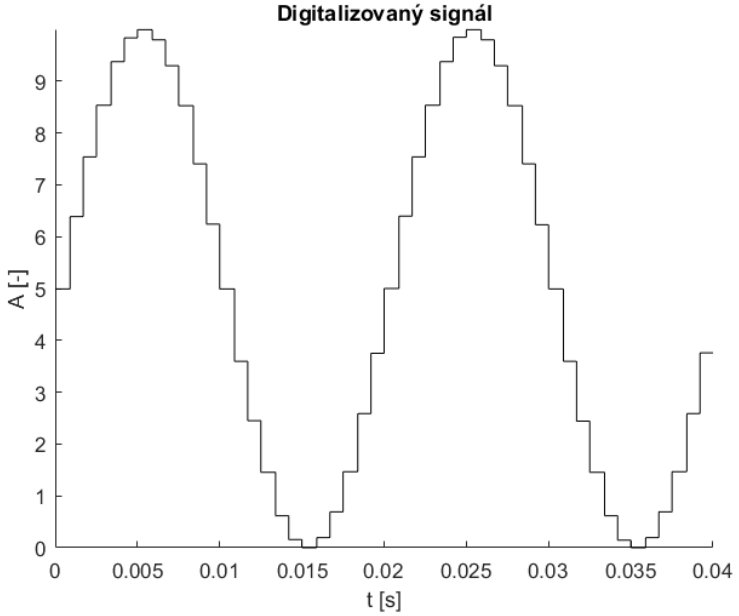
Během digitalizace se mění vstupní signál na elektrický. Mezi nejčastější elektrické signály patří napětí od 0 do 10 V, proud buď 0 až 20 mA, a nebo 4 až 20 mA. Frekvence se odvíjí od vstupního zdroje. [2]



Obr. 2.3 Model sinusového diskrétního signálu v prostředí Matlab.

Obrázek č. 2.3 obsahuje naměřené body z původního analogového modelu. Ztráta informace je tedy naprosto jednoznačná. Signál není spojitý v čase ani amplitudě. Těmto bodům bude dále přiřazena hodnota, ta se odvíjí dle dimenzování A/Č převodníku.

V tomto případě je frekvence vzorkování přibližně 8krát vyšší, než je frekvence vstupního signálu. Za jednu periodu vstupních dat je odebráno 8 hodnot.



Obr. 2.4 Model digitálního signálu

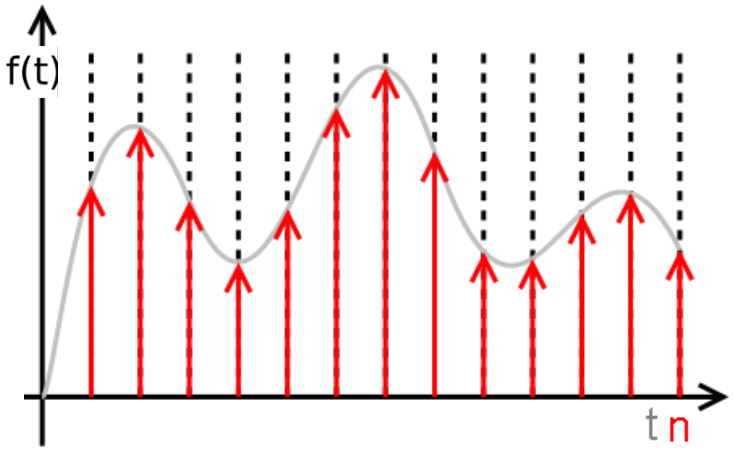
Na obrázku výše je znázorněn model převedeného signálu na digitální po úkonu vzorkování a kvantování ve výsledném tvaru.

2.2 Vzorkování

V první fázi digitalizace je zapotřebí vzorkování. To je definované jako naměření hodnoty snímaného signálu v předem určené časové periodě. Frekvence tohoto měření je dána sledovanou veličinou. Podle Shannonova teorému musí být minimálně dvakrát větší, než je frekvence pozorované veličiny. [1, 3]

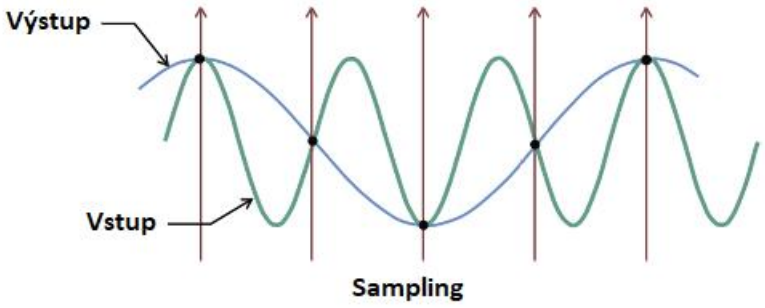
$$f_{vzorkování} > 2 * f_{veličiny} + rezerva \tag{2.1}$$

Jinými slovy se časová osa rozdělí na stejné časové intervaly a v každém z těchto intervalů změříme hodnotu. Tato část je právě ta, kde dochází ke ztrátě informace. To je způsobeno omezenou pamětí a rychlostí výpočetní techniky. [3]



Obr. 2.5 Vzorkování signálu. [4]

Pokud se během vzorkování nedodrží výše uvedený teorém, dojde k podvzorkování signálu. Tento jev se nazývá aliasing, česky falšování. Ze sledované veličiny se ztrácí informace o vyšších frekvencích a dochází ke zkreslení. [3]



Obr. 2.6 Následek podvorkování signálu. [4]

Mezi známé frekvence patří například 8kHz (Telefonní hovor, vysílačky…), 44,1kHz (Audio CD, MP3…).

2.3 Kvantování

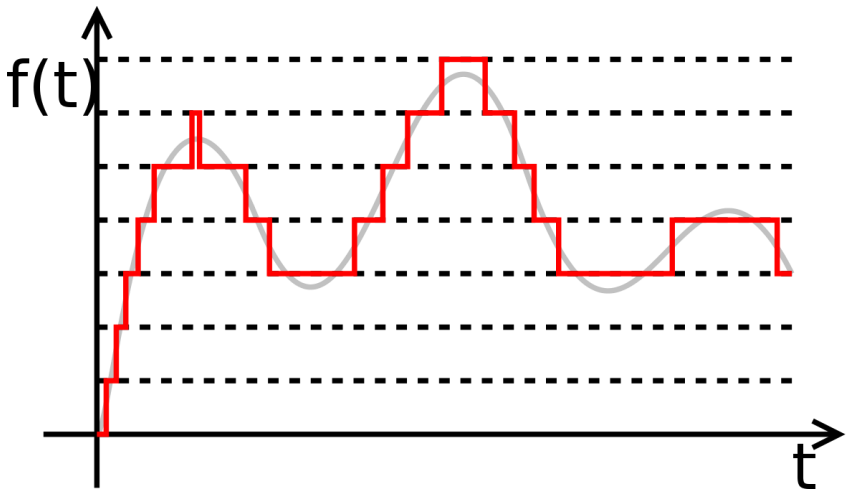
Kvantování přiřazuje definované úrovně již naměřeným vzorkům. Tedy je zaměřeno na svislou osu. Jelikož zařízení mají omezenou rozlišovací schopnost, počet úrovní závisí na počtu bitů daného převodníku. [6]

$$N = 2^n \tag{2.2}$$

N označuje počet úrovní a malé n počet bitů. Pro jednoduchost můžeme vzít v úvahu tříbitový převodník, což znamená 8 úrovní. V případě, že by sledovaná veličina nabývala hodnot 1 až 8 V, jedna úroveň by znamenala rozdíl 1 V.

Pokud hodnota leží mezi úrovněmi, přiřazujeme buď vyšší nebo nižší kvant. Nerozhodujeme, zda leží nad nebo pod polovinou intervalu, čili mezi kvanty.

Jeden vzorek je v tomto případě popsán třemi bity. V praxi se používají například 10, 12 a 16bitové převodníky, tudíž jeden vzorek je popsán 10 až 16 bity. Pro práci s pamětí je tedy potřeba ušetřit místo a zavést kódování. [6]



Obr. 2.7 Kvantování 3bit A/Č převodníku. [7]

3 ČASOVĚ FREKVENČNÍ ANALÝZA SIGNÁLU

Pro vyhodnocení vlivu nepřesnosti vzorkovací periody je nutno dále popsat frekvenční analýzu signálu. Abychom zjistili, jaké frekvenční složky obsahuje sledovaný signál, musíme provést transformaci.

Vypočteme odhad frekvenčního modulového a fázového spektra. Pro tyto výpočty můžeme použít například Spojitou vlnkovou nebo rychlou Fourierovou transformaci.

Frekvenční analýza se provádí, jelikož v časovém rozložení se vlivy rušení mohou vzájemně překrývat se sledovanou veličinou. Ve frekvenčním spektru už jsme schopni odlišit různé složky.

3.1 Fourierovy řady

Potřebujeme zkoumat, případně aproximovat chování poměrně složité periodické funkce. Tato funkce nemusí být nutně spojitá, může mít nespojitou derivaci a může mít nespecifické chování. Proto používáme transformaci těchto funkcí do řad, které se chovají určitě. [8,9]

Rozvoj Fourierových řad je rozvoj signálu do trigonometrických funkcí neboli sinů a kosinů, na takovém intervalu, který pokryje právě jednu periodu mateřské funkce. [8,9]

Na intervalu <-π; +π> lze symbolicky zapsat:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty}(a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)) \tag{3.1}$$

Kde a_0, a_k, b_k jsou Fourierovy koeficienty popsané vztahy:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x)\, dx \tag{3.2}$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos(kx)\, dx \tag{3.3}$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \sin(kx)\, dx \tag{3.4}$$

.

3.2 Fourierova transformace (FT)

Jedná se o integrální transformaci mezi časově a frekvenčně závislým vyjádřením harmonických signálů. Můžeme převádět jak spojité, tak diskrétní signály. [8,9]

Obecně můžeme popsat integrální rovnicí:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)\, e^{-i\omega t}\, dt \tag{3.5}$$

ω je označení úhlové rychlosti a má vztah $\omega = 2 * \pi * f$, kde f je frekvence, převrácená hodnota periody, signálu.

Zpětná transformace pak má zápis:

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega)\, e^{i\omega t}\, d\omega \tag{3.6}$$

Kde originál $s(t)$ a obraz $S(\omega)$ ve Fourierově transformaci pak vyjádříme vztahem:

$$S(\omega) = \mathcal{F}[s(t)] \quad \text{a} \quad s(t) = \mathcal{F}^{-1}[S(\omega)] \tag{3.7, 3.8}$$

Mezi vlastnosti FT patří věta o linearitě, podobnosti a posunutí.

3.3 Diskrétní Fourierova transformace (DFT)

Pro DFT platí většina vlastností jako pro spojitou FT. Jedná se o nejpoužívanější transformaci digitálních signálů. [8,9]

DFT lze popsat rovnicí [11]:

$$\mathrm{D}\left(\frac{n}{NT}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} d(kT) * e^{-i2\pi k\frac{n}{N}} \tag{3.9}$$

Kde D je obraz a d originál signálu. N je počet vzorků a T vzorkovací perioda. Zpětná transformace [11]:

$$\mathrm{d}(kT) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} D\left(\frac{n}{NT}\right) * e^{+i2\pi k\frac{n}{N}} \tag{3.10}$$

DFT je velmi náročný algoritmus, vyžaduje $(N-1)^2$ komplexních součinů a $N(N-1)$ komplexních součtů [11].

3.4 Rychlá Fourierova transformace (FFT)

Kvůli dlouhým výpočtům diskrétní FT vznikl algoritmus rychlé FT. Tento postup využívá vlastnosti diskrétních exponenciálních funkcí a snižuje tak časovou náročnost kalkulace.

Celou posloupnost vzorků signálu rozdělí na dvě stejně dlouhé části a na každé provede DFT. Redukujeme celkovou náročnost provedení na $\frac{N^2}{2}$ komplexních součinů [10].

Rozdělení části je dle sudosti a lichosti vzorků a výpočtu DFT. Sudé definujeme jako [10]:

$$u(n) = x(2n) \tag{3.11}$$

A liché jsou definovány [10]:

$$u(n) = x(2n+1) \tag{3.12}$$

4 PROSTŘEDÍ MATLAB

Jedná se o interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk. Je vyvíjen společnosti MathWorks.

Umožňuje spousty funkcí spojených s matematickými výpočty. Práce s maticemi, vektory, vykreslování 2D i 3D grafů a mnoho dalších. Je využíván zejména vědci a vývojáři.

Název vznikl zkrácením MATrix LABoratory, v překladu maticová laboratoř, protože jsou klíčovou datovou strukturou právě matice.

4.1 Frekvenční analýza v MatLabu

V tomto prostředí máme více možností, jakým způsobem analýzu provedeme. Nápověda nám ukáže nejkratší algoritmus analýzy, tedy využití přímo funkce z knihoven.

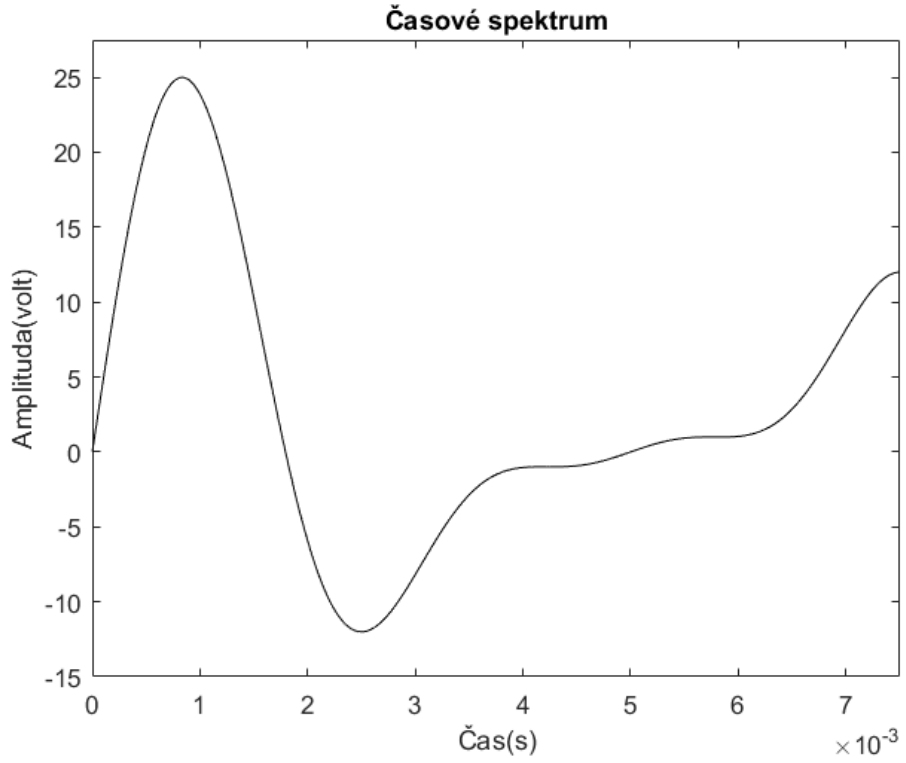
Mimo nápovědu již existuje velké množství hotových algoritmů přímo na oficiálních stránkách MathWorksu. Jeden z těchto algoritmů vypadá takto:

```
:1    clc
:2    clear all
:3    close all
:4    % FFT bez vestavěné funkce
;5    mm=[];
:6    A=10;
:7    fs=1000;
:8    Ts=1/fs;
:9    t=(1:1000)*Ts;
:10   y=10*sin(2*pi*200*t)+5*sin(2*pi*400*t)+12*sin(2*pi*300*t);
:11   N=length(t);
:12   for(k=1:N)
:13         for(n=1:N)
:14         y1(n)=y(n).*exp(-j*2*pi*((-N/2)+n-1)*((-N/2)+k-1)/N);
:15         end
:16         mm=[mm sum(y1)];
:17   end
:18   f=fs.*(-N/2:N/2-1)/N;
:19   figure(1)
:20   plot(f,2*abs(mm)/N);
:21   title('Frekvenční spektrum pro funkci y(t)');
:22   xlabel('Frekvence(Hz)');
:23   ylabel('Amplituda(volt)');                    [12]
```

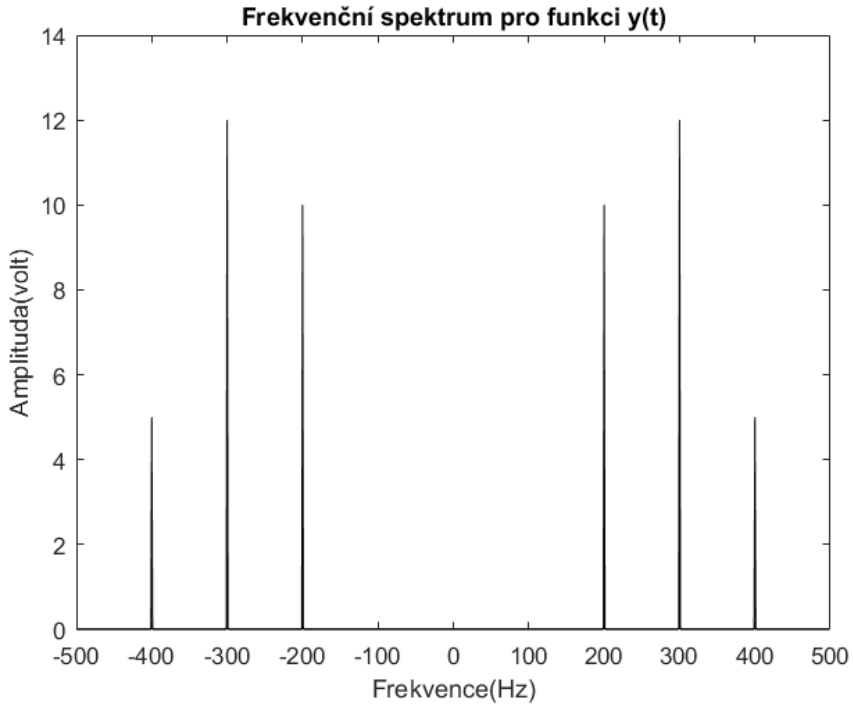
Výše uvedený skript vytváří spojitou harmonickou funkci, provádí FFT a vykresluje následně do grafu. Řádky 1 až 3 jsou pouze pro smazání předešlých operací a zavření všech otevřených podoken MatLabu. 4. řádek slouží jako komentář, ten můžeme rozeznat podle počátečního znaku ‚%'. Řádek 5 a 9 jsou pro deklaraci a inicializaci vektorových proměnných. Mezi nimi jsou vloženy parametry pro samplovací signál. Řádek 10 obsahuje funkci:

$$y(t) = 10 * sin(2 * \pi * 200 * t) + 5 * sin(2 * \pi * 400 * t) + 12 * sin(2 * \pi * 300 * t) \quad (4.1)$$

Funkce má v sobě tři sinusové harmonické vlny, každá o své vlastní frekvenci a amplitudě. Na řádcích 12 až 17 jsou dva cykly *for*. Ty slouží pro výpočet FFT dané funkce. Zbytek skriptu je pak pro vykreslení frekvenčního spektra do grafu s doplněním popisku os a samotného názvu.



Obr. 4.1 Harmonická funkce y(t)



Obr. 4.2 Harmonická funkce y(t) v f-spektru

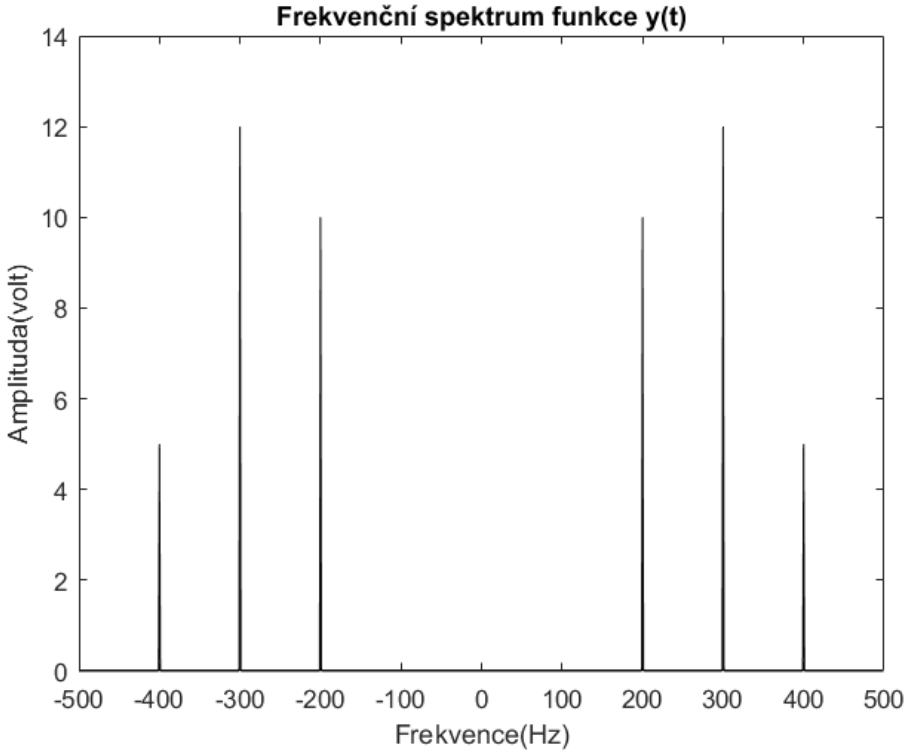
Další možnost podobné analýzy je s pomocí již vestavěné funkce *fft()*. Opět je zapotřebí vytvořit vstupní funkci, nastavit parametry vzorkování a provést FFT. Skript může vypadat takto:

```
:1    clc
:2    clear all
:3    close all
:4    % FFT za pomocí vestavěné funkce
:5    mm=[];
:6    A=10;
:7    fs=1000;
:8    Ts=1/fs;
:9    t=(1:1000)*Ts;
:10   y=10*sin(2*pi*200*t)+5*sin(2*pi*400*t)+12*sin(2*pi*300*t);
:11   N=length(t);
:12         yy=fft(y);
:13         yyy=fftshift(yy);
:14   f=fs.*(-N/2:N/2-1)/N;
:15   figure(2)
:16   plot(f,(2*abs(yyy)/N),'k-');
:17   title('Frekvenční spektrum funkce y(t)');
:18   xlabel('Frekvence(Hz)');
:19   ylabel('Amplituda(volt)');
```

[12]

Tato verze má o pár řádků méně. Rozdíl oproti předchozímu skriptu začíná na řádku 12. Místo dvou vnořených cyklů *for* se nachází podprogram *fft()* se vstupním parametrem funkce *y*. *fftshift()* je další zabudovaný podprogram. Má za účel vložit nulu spektra do středu vektoru *yy*.

Výsledek tohoto provedení je totožný s předchozím. Vstupní funkce i její frekvenční analýza je stejná.



Obr. 4.3 Harmonická funkce y(t) v f-spektru

Jelikož v žádné z těchto verzí analýz nebereme v potaz rušení signálu ani jiné poruchové vlivy, do frekvenčního spektra nám vstupují pouze tři harmonické funkce a výsledkem jsou tři čáry o velikosti amplitud, obrázky 4.2 a 4.3.

5 A/Č PŘEVODNÍKY

Tato kapitola je věnována výrobcům a samotným A/Č převodníkům. Mezi výrobce patří například firma National Instruments (NI) nebo Advantech.

Převodníky slouží pro převod analogového signálu na digitální s definovaným rozlišením a vzorkovacím kmitočtem.

5.1 Dělení a parametry převodníků

Můžeme dělit například podle vnitřní logiky a principu převodu. Existují paralelní, s postupnou aproximací, integrační a sigma delta převodníky.

Parametry těchto součástek mohou být statické, či dynamické. Statické vlastnosti popisuje jejich převodní charakteristika a jsou kmitočtově nezávislé. Dynamické parametry vyjadřují vlastnosti a chování právě v kmitočtové oblasti.

5.2 Převodníky na trhu

Firmy a převodníky uvedené v této podkapitole jsou pouze reprezentativní, výrobců je na trhu mnoho.

Společnost NI vyrábí různé nástroje pro měřící techniku. Mezi levnější spadá multifunkční karta USB-6000. Tato karta má 8 analogových vstupů, vzorkovací kmitočet až 10 kHz a rozlišení 12 bitů. Cena je 3 990 Kč.[13]



Obrázek 5.1 NI USB-6000 [14]

Dražší verze této karty je USB-6003, která má kmitočet až 100 kHz a rozlišení 16 bitů. Cena je téměř čtyřnásobná. Už z názvu vyplývá, že tento převodník můžeme připojit k PC pomocí USB připojení. Pomocí softwaru vložíme požadovanou funkci nebo nastavíme její konfiguraci. Obě tyto karty jsou řazeny jako externí. [15]

Mezi další vlastnosti těchto převodníků patří nepřesnost analogového vstupu, verze USB-6000 má ± 26 mV, u dražší je ± 6 mV, dále počet digitálních vstupů a výstupů.

Na obrázku 5.2 je uveden jeden z lepších převodníků firmy Advantech. Jedná se o model PCIE-1840. Tento typ umí samplovat až kmitočtem 125 mHz, má 16 bitů a cenově se pohybuje kolem 130 000 Kč. Zde se jedná o kartu interní a je ji potřeba připojit k základní desce PC. [16]



Obrázek 5.2 Advantech PCIE-1800 [17]

Jako další je uveden příklad desek s mikrokontrolery. Mezi starší modely patří ATmega8 nebo ATmega168. Dnes jsou desky osazovány typem ATmega328P. Mají zabudovaný převodník. Ten je dimenzovaný na 10 bitů a nejrychlejší kmitočet je 76,9 kHz. Při nejlepším rozlišení dosahuje frekvence 15 kHz. [18]



Obrázek 5.3 Arduino Uno Rev 3 [19]

Cena této desky je přibližně 500 Kč. Chip je ATmega328P. Mikrořadiče ATmegaX jsou vyráběny firmou Atmel. [18]

Pro komparaci jsou tyto převodníky zasazeny do tabulky.

Výrobce	NI	Advantech	Arduino
Model	USB-6003	PCIE-1840	Uno Rev 3
Rozlišení [bit]	16	16	10
Kmitočet [kHz]	100	125 000	76,9
Cena [Kč]	14 990	130 000	500

Tab. 5.1 Srovnání převodníků [15, 16, 18]

Parametry jsou velmi rozdílné, tomu odpovídá i cena. Převodník vybíráme podle potřeby.

Hlavním kritériem výběru je měřená veličina. Pro měření teploty není zapotřebí velká rychlost, ani přesnost. Zde jsou změny pomalé. Při sledování otáček motoru, hluku nebo vibrací je zapotřebí rychlost i přesnost.

6 MODEL

V této kapitole budou provedeny experimenty k uvedené problematice a stručně popsány důležité části skriptu modelu.

V experimentech bude hrát hlavní roli nepřesnost vzorkovací periody, ta bude vyjádřena v procentech.

6.1 Nepřesnost vzorkovací periody

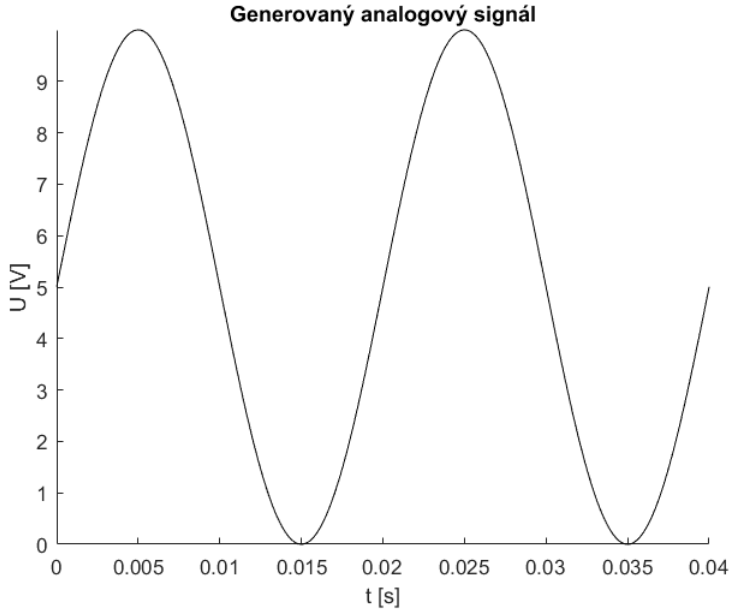
Chybu můžeme vzít v rozsahu 0 až 99 %. Pokud bychom překročili mez 100 %, v praxi by to znamenalo naměřit hodnotu vzorku za další již změřenou hodnotou, AČ převodník by se vracel v čase.

$$Tse = Ts \pm Ts * (0.01 \text{ až } 0.99) \tag{6.1}$$

V rovnici č. 6.1 je Ts velikost vzorkovací periody. Tse je pak velikost s chybou.

Výskyt chyby je generován náhodně, mohou se vyskytnou například dvě jdoucí po sobě nebo s rozdílem několika period.

V modelu je generován signál o frekvenci 50 Hz a hodnotě od 0 do 10 V.



Obr. 6.1 Generovaný analogový signál (10 V a 50 Hz)

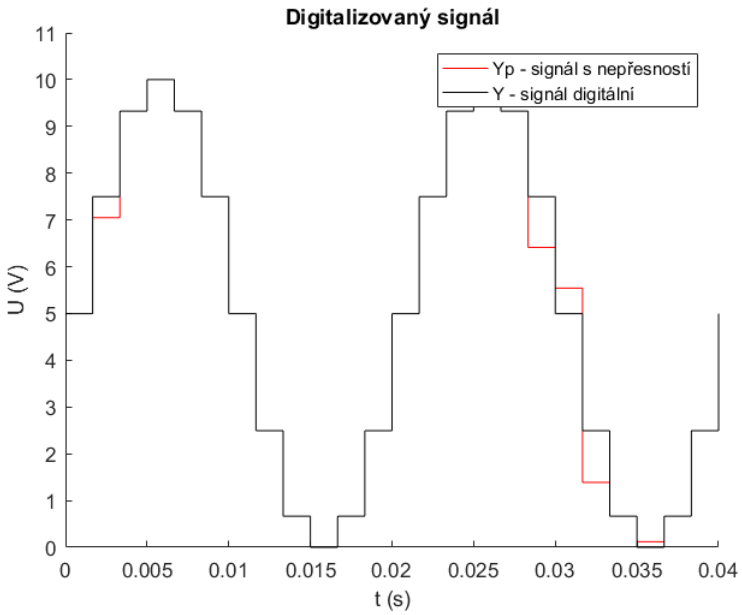
Na obrázku č. 6.1 je zobrazen vstupní signál pro následující experiment zaměřený na frekvenci vzorkování.

6.2 Nepřesnost v závislosti na frekvenci vzorkování

V tomto experimentu bude nepřesnost periody generována náhodně, v rozsahu od 1 do 75 %, plus i mínus. Generovaný signál je definovaný výše, amplituda 10 V o frekvenci 50 Hz.

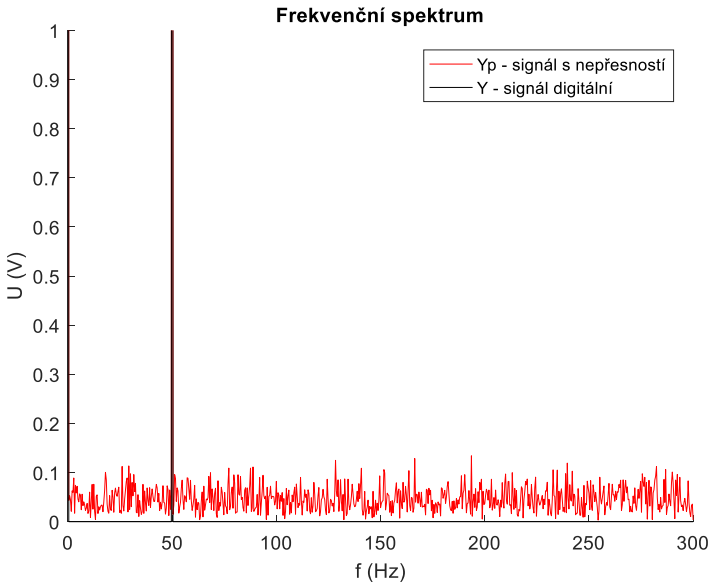
Signál bude vzorkován ve třech frekvencích (600, 1200 a 1800 Hz) a převodník je namodelovaný na 10 bitů.

Při frekvenci 600 Hz má signál tuto podobu v časovém spektru:



Obr. 6.2 Signál vzorkovaný frekvencí 600 Hz.

A tuto ve frekvenčním spektru:



Obr. 6.3 Signál ve frekvenčním spektru (600 Hz)

Původní signál je znázorněn černou a ovlivnění je znázorněno červenou barvou. Experiment je proveden 10krát a výsledky jsou následující:

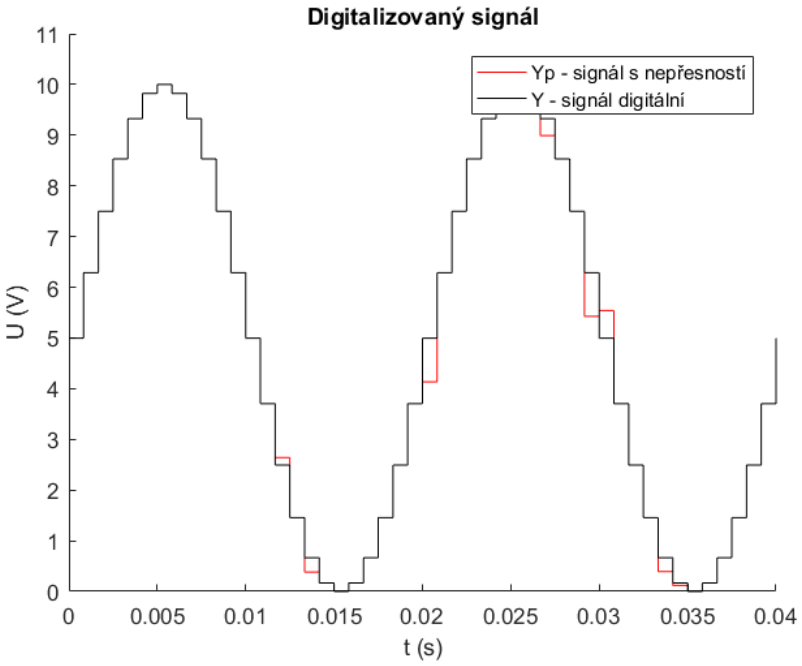
n	Yp	|Yp – Y|	Ys	Yavg	Ymod
1	10,01	0,020	0,157	0,055	0,036
2	9,935	0,055	0,234	0,056	0,067
3	9,954	0,036	0,165	0,050	0,019
4	10,018	0,028	0,156	0,050	0,035
5	9,941	0,049	0,130	0,054	0,028
6	9,943	0,047	0,134	0,044	0,053
7	9,941	0,049	0,161	0,051	0,065
8	9,923	0,067	0,156	0,052	0,050
9	9,961	0,029	0,170	0,056	0,043
10	9,9028	0,087	0,157	0,055	0,039

Tab. 6.1 Hodnoty při samplovací frekvenci 600 Hz [V].

Yp je amplituda zatíženého signálu, Y je hodnota digitálního nezatíženého, Ys je hodnota nejvyšší, Yavg je průměrná hodnota a Ymod a modus vedlejších složek.

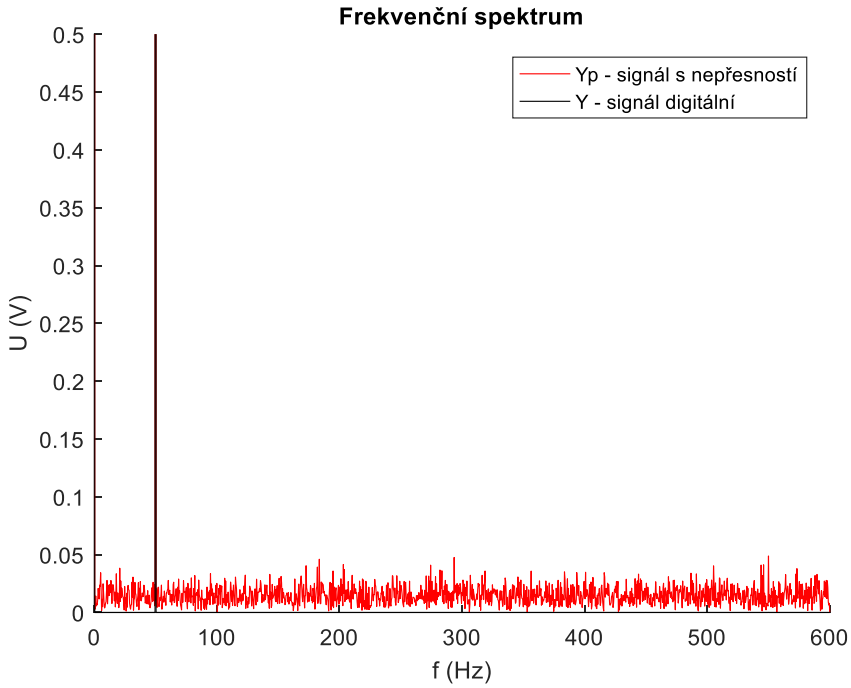
Největší rozdíl hlavních složek je přibližně 90 mV, průměrná hodnota sekundárních se pohybuje okolo 50 mV a nejčetnější je v rozpětí 30 až 70 mV.

Při samplovací frekvenci 1200 Hz signál vypadá takto:



Obr. 6.4 Signál vzorkovaný frekvencí 1200 Hz.

Na frekvenčním spektru:



Obr. 6.5 Signál ve frekvenčním spektru (1200 Hz)

Při dvojnásobné hodnotě vzorkování se velikosti sekundárních složek zmenšily. Zde je osa y grafu upravena pro lepší názornost od 0 do 0,5 V.

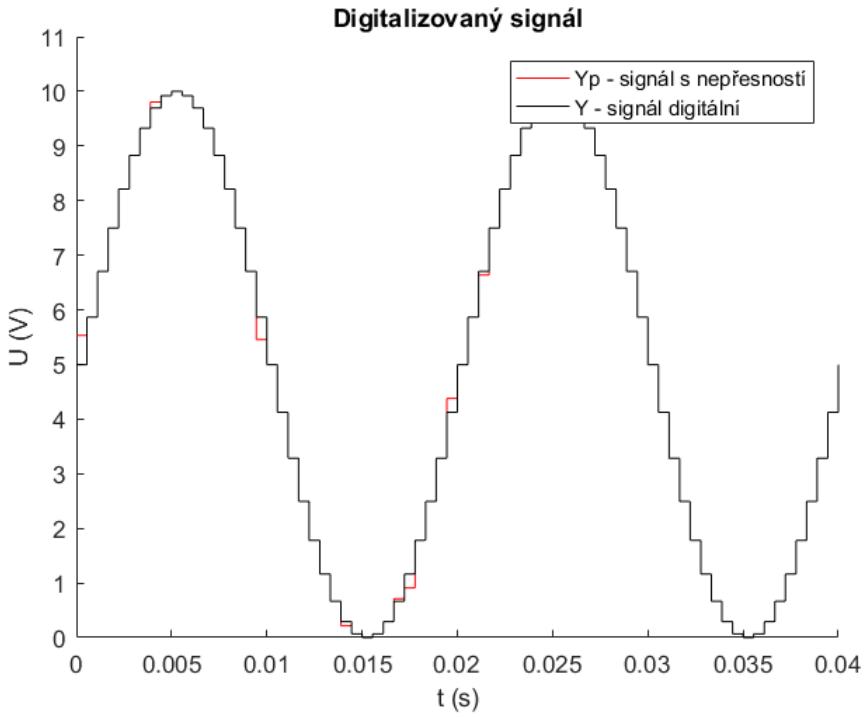
Konkrétní hodnoty jsou zaneseny níže do tabulky:

n	Yp	|Yp – Y|	Ys	Yavg	Ymod
1	9,971	0,0192	0,059	0,021	0,016
2	9,976	0,0142	0,068	0,020	0,012
3	9,978	0,0122	0,066	0,019	0,010
4	9,976	0,0142	0,078	0,020	0,020
5	9,972	0,0182	0,063	0,019	0,015
6	9,991	0,0008	0,064	0,020	0,010
7	9,988	0,0022	0,072	0,017	0,015
8	9,980	0,0102	0,061	0,020	0,011
9	9,977	0,0132	0,056	0,020	0,019
10	9,983	0,0072	0,073	0,019	0,017

Tab. 6.2 Hodnoty při samplovací frekvenci 1200 Hz [V]

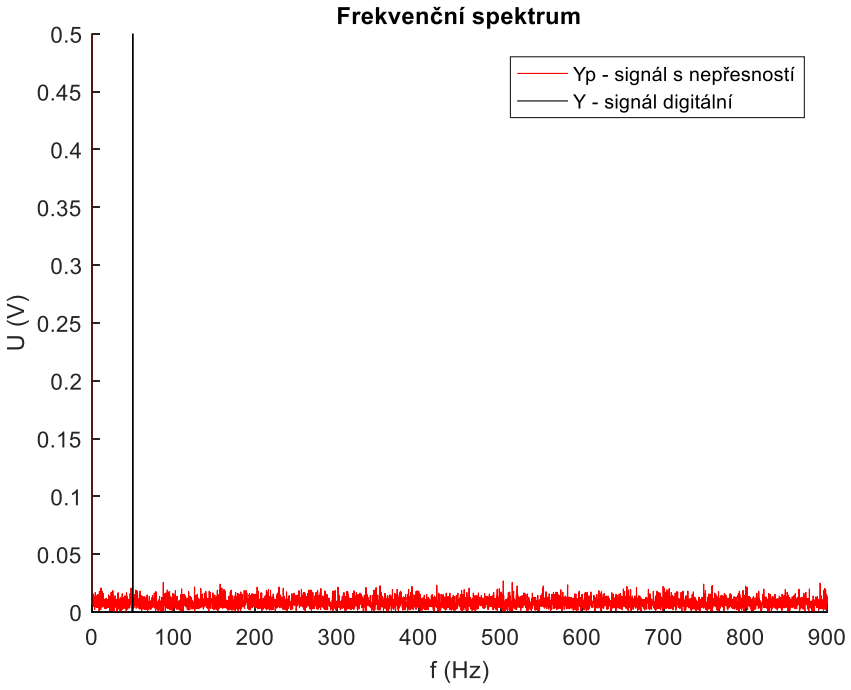
Z dat můžeme jednoznačně určit, že velikost sekundárních složek klesá s vyšší vzorkovací frekvencí.

V následujícím experimentu je použita vzorkovací frekvence 1800 Hz.
Časové spektrum:



Obr. 6.6 Signál vzorkovaný frekvencí 1800 Hz.

Frekvenční spektrum:



Obr. 6.7 Signál ve frekvenčním spektru (1800 Hz)

Hodnoty ze simulace měření vypadají takto:

n	Yp	|Yp – Y|	Ys	Yavg	Ymod
1	9,988	0,002	0,036	0,011	0,009
2	9,988	0,002	0,041	0,011	0,009
3	9,980	0,010	0,043	0,011	0,009
4	9,988	0,002	0,059	0,011	0,007
5	9,979	0,011	0,041	0,010	0,009
6	9,991	0,001	0,042	0,011	0,005
7	9,986	0,004	0,043	0,011	0,010
8	9,991	0,001	0,049	0,011	0,007
9	9,990	0,000	0,046	0,011	0,007
10	9,981	0,009	0,041	0,011	0,011

Tab. 6.3 Hodnoty při samplovací frekvenci 1800 Hz [V]

V tomto experimentu se tvrzení dokazuje. S vyšší vzorkovací frekvencí jsou hodnoty vedlejších složek nižší.

V následující tabulce jsou hodnoty ze všech tří experimentů. Z deseti hodnot je udělán jeden průměr.

f [HZ]	Yp [V]	|Yp – Y| [V]	Ys [V]	Yavg [V]	Ymod [V]
600	9,953	0,047	0,162	0,052	0,044
1200	9,979	0,011	0,066	0,020	0,028
1800	9,986	0,004	0,044	0,011	0,008

Tab. 6.4 Souhrnná data z experimentu.

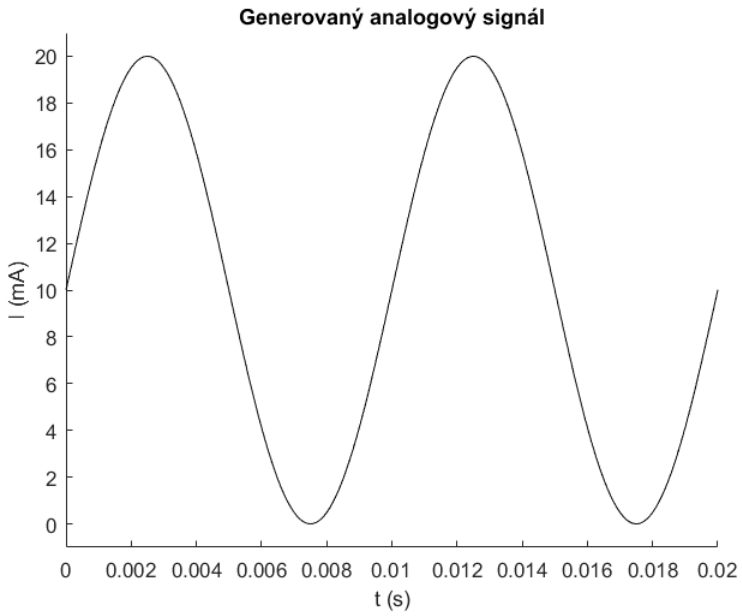
Rozdíly primárních a sekundárních složek jednoznačně závisí na vzorkovací frekvenci. Důvod klesání hodnot s vyšší frekvencí je s největší pravděpodobností to, že prostor mezi periodami je menší. Čím kratší perioda, tím menší je rozsah rozdílu změřené amplitudy.

6.3 Nepřesnost v závislosti na frekvenci vstupního signálu

Simulovaný AČ převodník je dimenzovaný na frekvenci 2000 Hz a bude opět 10bitový. Generovaný vstupní signál má amplitudu 20 mA, ale různé frekvence, konkrétně 100, 250 a 500 Hz.

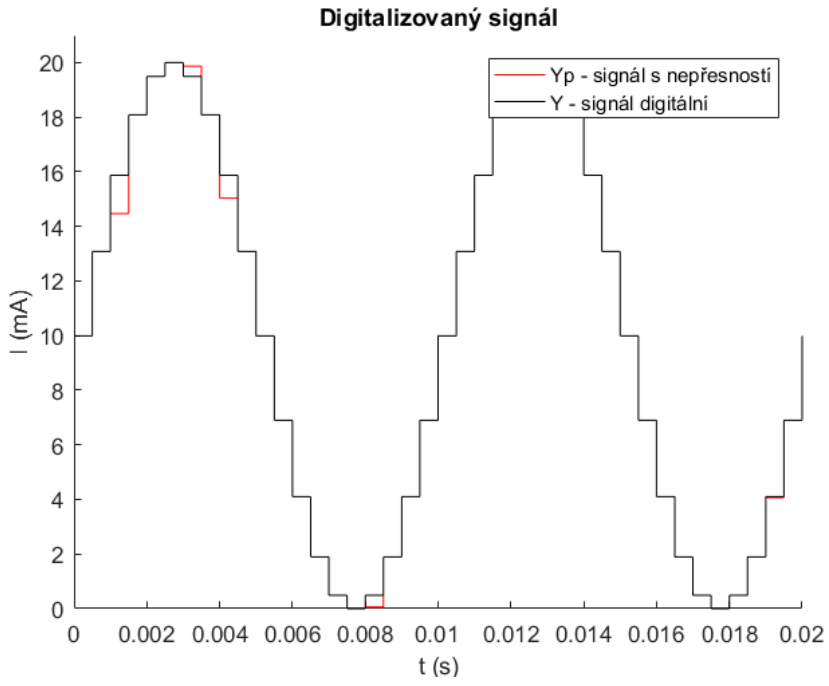
Nepřesnost periody bude zachována z předchozích experimentů v rozsahu od 1 do 75 % s náhodným výskytem.

Vstupní vygenerovaný signál:



Obr. 6.8 Generovaný analogový signál (20 mA a 100 Hz)

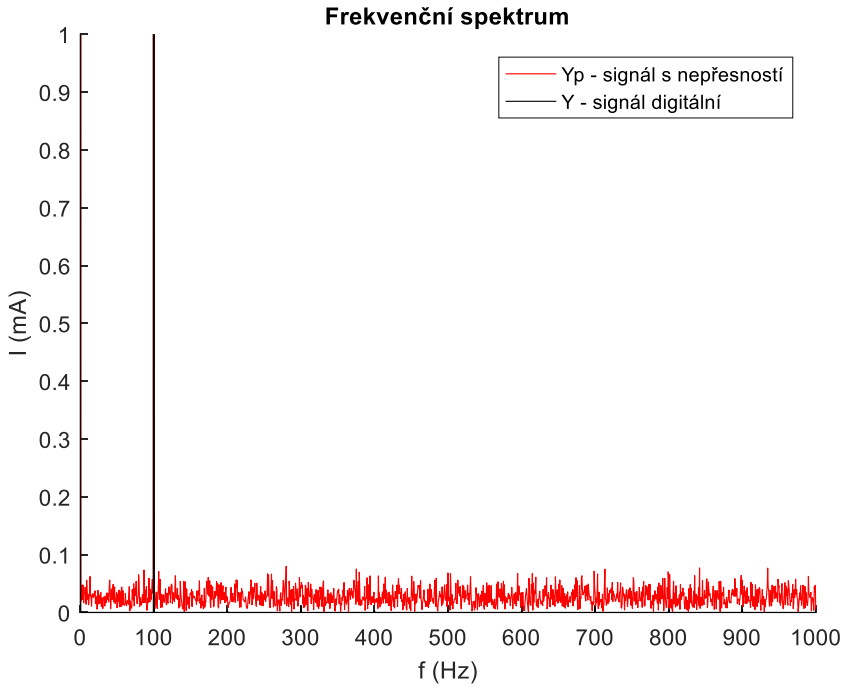
Po převedení na digitální:



Obr. 6.9 Digitalizovaný vstupní signál o frekvenci 100 Hz

Zpracovaný signál má hodnotu od 0 do 20 mA. Frekvence signálu je 100 Hz. Signál je zpracován uvedeným převodníkem. Černou čarou je signál bez vlivu nepřesnosti a červenou barvou jsou znázorněny nepřesnosti.

Detail frekvenční analýzy:



Obr. 6.10 Signál ve frekvenčním spektru o f 100 Hz.

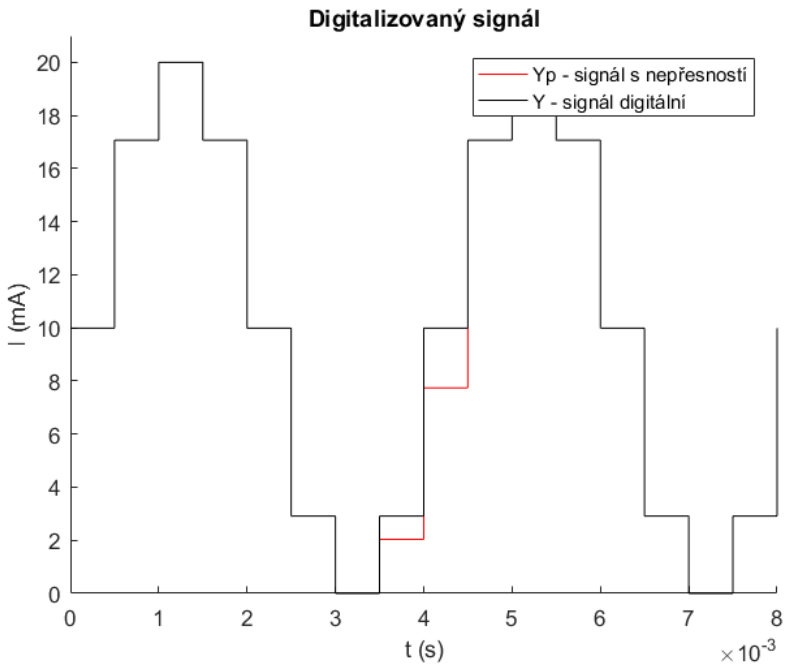
Hodnoty hlavní a vedlejších složek jsou:

n	Yp	|Yp – Y|	Ys	Yavg	Ymod
1	19,970	0,030	0,075	0,021	0,026
2	19,949	0,051	0,053	0,018	0,018
3	19,981	0,019	0,025	0,020	0,022
4	19,981	0,019	0,075	0,020	0,024
5	19,990	0,010	0,057	0,020	0,033
6	19,951	0,049	0,058	0,020	0,032
7	19,970	0,030	0,079	0,018	0,026
8	19,944	0,056	0,067	0,021	0,024
9	19,993	0,007	0,027	0,019	0,031
10	19,947	0,053	0,028	0,019	0,024

Tab. 6.5 Hodnoty pro signál 20 mA, 100 Hz [mA]

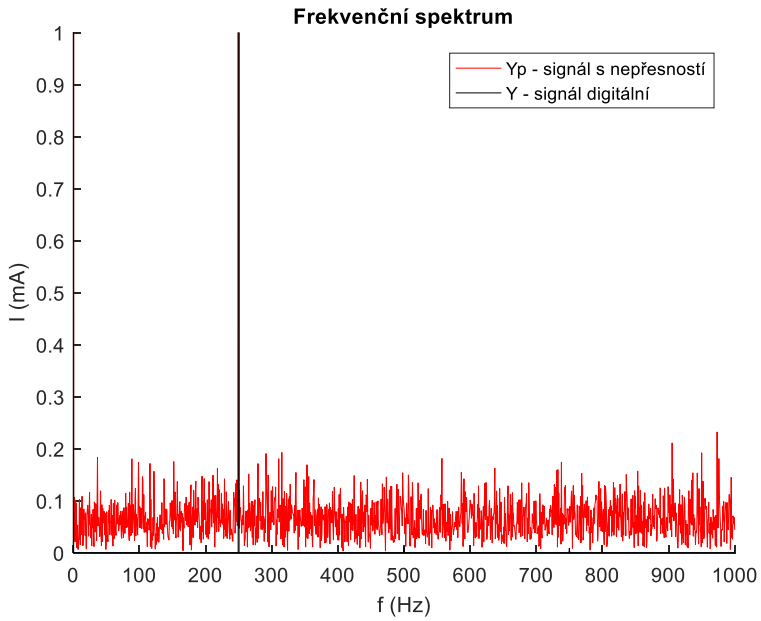
Hlavní složka nikdy nepřesáhla svou maximální hodnotu. Maximální rozdíl je pak kolem 0,06 mA. Amplituda vedlejší složky je nejvýše 0,08 mA. Průměrná hodnota je přibližně 0,02 mA a nejčetnější výskyt je v rozmezí od 0,02 do 0,03 mA.

Do dalšího experimentu vstupuje frekvence 250 Hz. Signál má tuto digitální podobu:



Obr. 6.11 Digitalizovaný vstupní signál o frekvenci 250 Hz

Po provedení FFT:



Obr. 6.12 Signál ve frekvenčním spektru o f 250 Hz

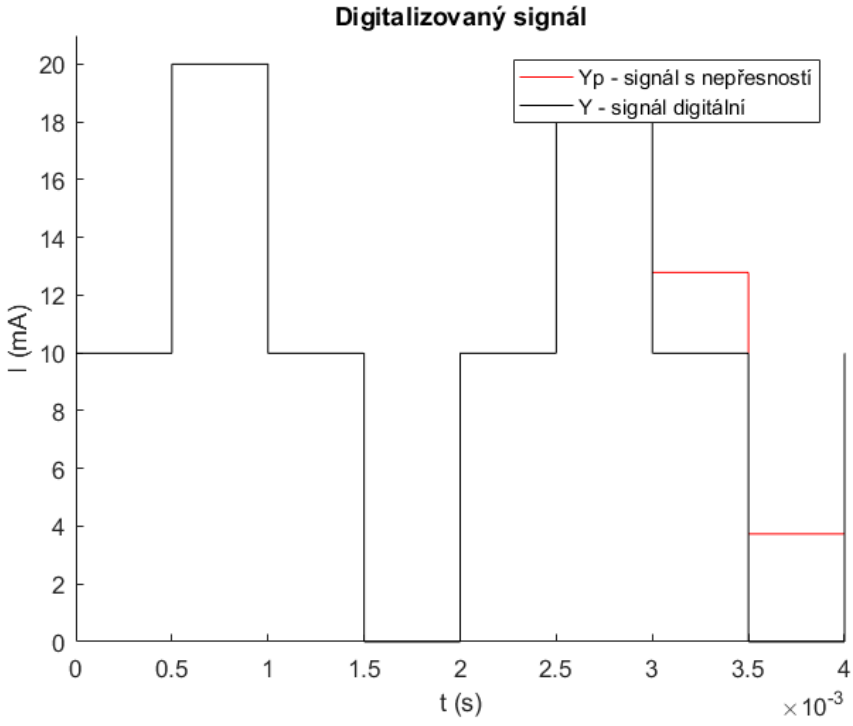
Zkreslení signálu:

n	Yp	|Yp – Y|	Ys	Yavg	Ymod
1	19,886	0,114	0,275	0,050	0,058
2	19,899	0,101	0,283	0,053	0,05
3	19,847	0,153	0,267	0,050	0,074
4	19,870	0,130	0,216	0,047	0,109
5	19,867	0,133	0,257	0,051	0,034
6	19,895	0,105	0,207	0,047	0,09
7	19,779	0,221	0,277	0,050	0,068
8	19,896	0,104	0,277	0,048	0,066
9	19,760	0,240	0,290	0,048	0,046
10	19,858	0,142	0,210	0,046	0,056

Tab. 6.6 Hodnoty pro signál 20 mA, 250 Hz [mA]

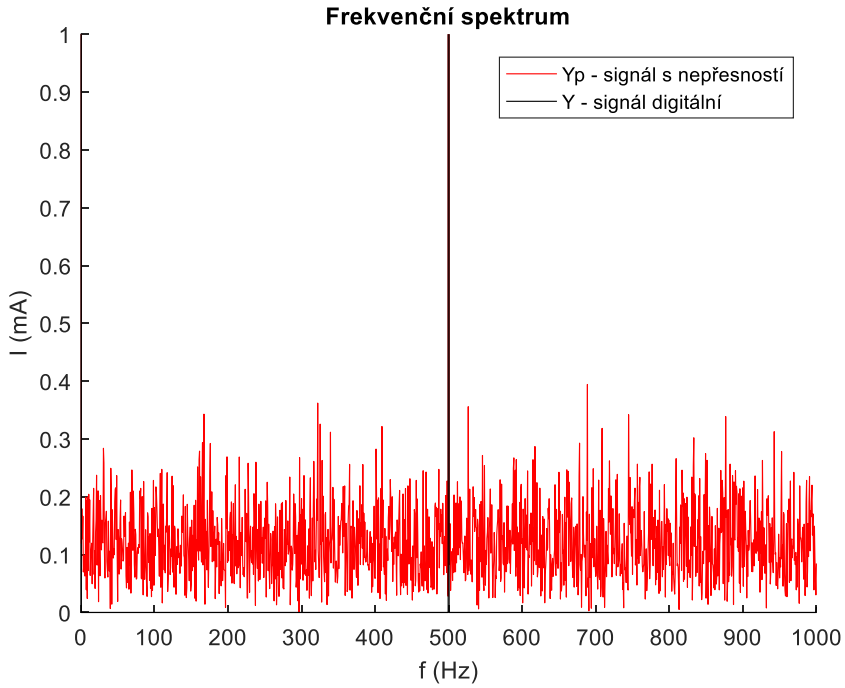
Oproti předchozímu experimentu se rozdíl, průměrná a nejčetnější hodnota zvedla zároveň s frekvencí signálu. Hlavní složka se liší až o 1 % své původní velikosti. Průměrné amplitudy vedlejších mají 0,25 % hodnoty signálu.

Pokračujeme s frekvencí analogového signálu 500 Hz. Simulace digitalizace:



Obr. 6.13 Digitalizovaný vstupní signál o frekvenci 500 Hz

Rychlá Fourierova transformace tohoto signálu:



Obr. 6.14 Signál ve frekvenčním spektru o f 500 Hz

Z grafu digitálního signálu je zřetelné, že nepřesnost má velký vliv na měření. Navzorkované hodnoty jsou 0, 10 a 20 mA. Simulovaná nepřesnost periody je až 75 %.

Amplitudy složek:

n	Yp	|Yp – Y|	Ys	Yavg	Ymod
1	19,453	0,547	0,496	0,104	0,126
2	19,372	0,628	0,415	0,109	0,130
3	19,443	0,557	0,425	0,110	0,157
4	19,492	0,508	0,429	0,112	0,136
5	19,408	0,592	0,495	0,112	0,122
6	19,354	0,646	0,466	0,107	0,187
7	19,445	0,555	0,439	0,101	0,116
8	19,315	0,685	0,416	0,118	0,169
9	19,317	0,683	0,485	0,111	0,068
10	19,571	0,429	0,416	0,117	0,112

Tab. 6.7 Hodnoty pro signál 20 mA, 500 Hz [mA]

Hlavní složka může být snížena až o 3,5 % své hodnoty. S vyšší frekvencí se zvýšili i hodnoty sekundárních složek.

fs [Hz]	Yp [mA]	|Yp - Y |[mA]	Ys [mA]	Yavg [mA]	Ymod [mA]
100	19,968	0,032	0,154	0,020	0,026
250	19,856	0,144	0,266	0,049	0,065
500	19,417	0,583	0,428	0,110	0,132

Tab. 6.8 Shrnutí všech tří experimentů

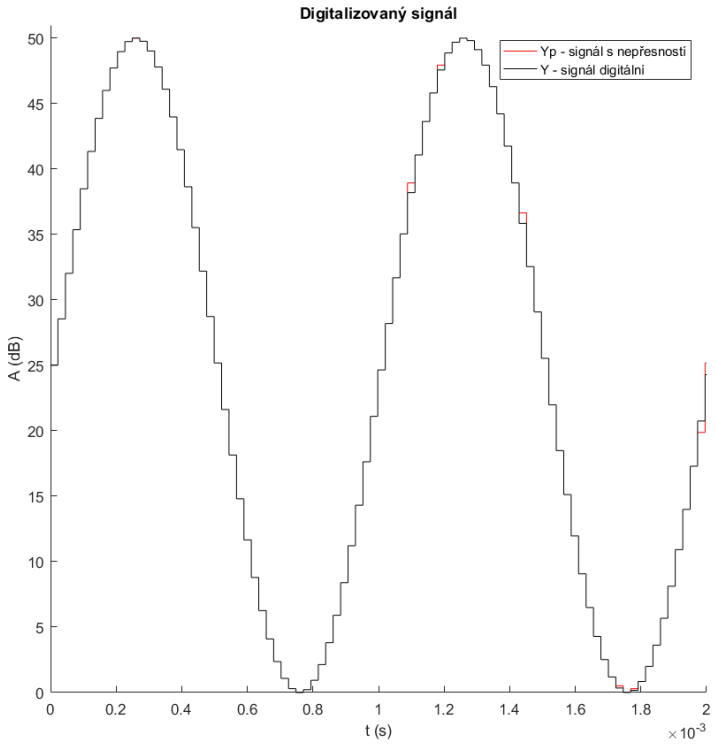
V tabulce 6.8 je průměr hodnot z předchozích experimentů pro každý sloupec pro danou frekvenci. Z těchto údajů je jednoznačné, že s rostoucí frekvenci snímaného signálu roste vliv nepřesnosti periody.

6.4 Procentuální nepřesnost v audiosignálu

Vstupem je zvukový signál o frekvenci 1 kHz a amplitudě 50 dB. Převodník je nastaven na 44,1 kHz a je 16bitový.

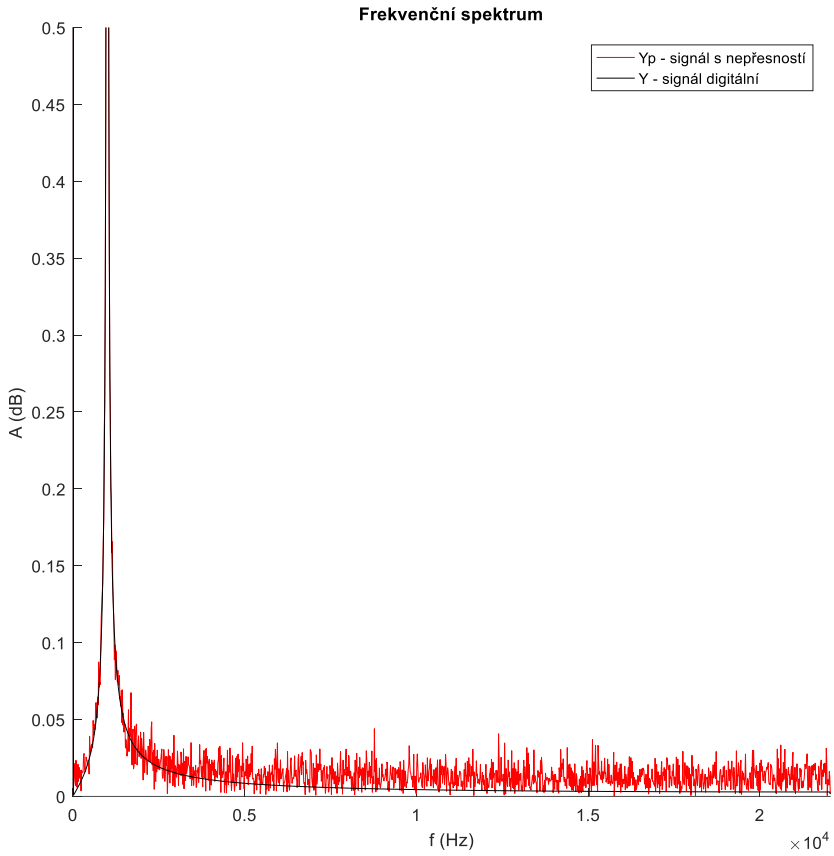
Model zatížíme dvěma pravděpodobnostmi výskytu, 10 % a 50 %. Pro ně budou nepřesnosti periody rovny 25 % nebo 75 %.

Digitalizovaný audiosignál s nepřesností (10 a 25 %):



Obr. 6.15 Audiosignál o f 1 kHz (10 a 25 %)

Po provedení frekvenční analýzy:



Obr. 6.16 FFT audiosignálu (10 a 25 %)

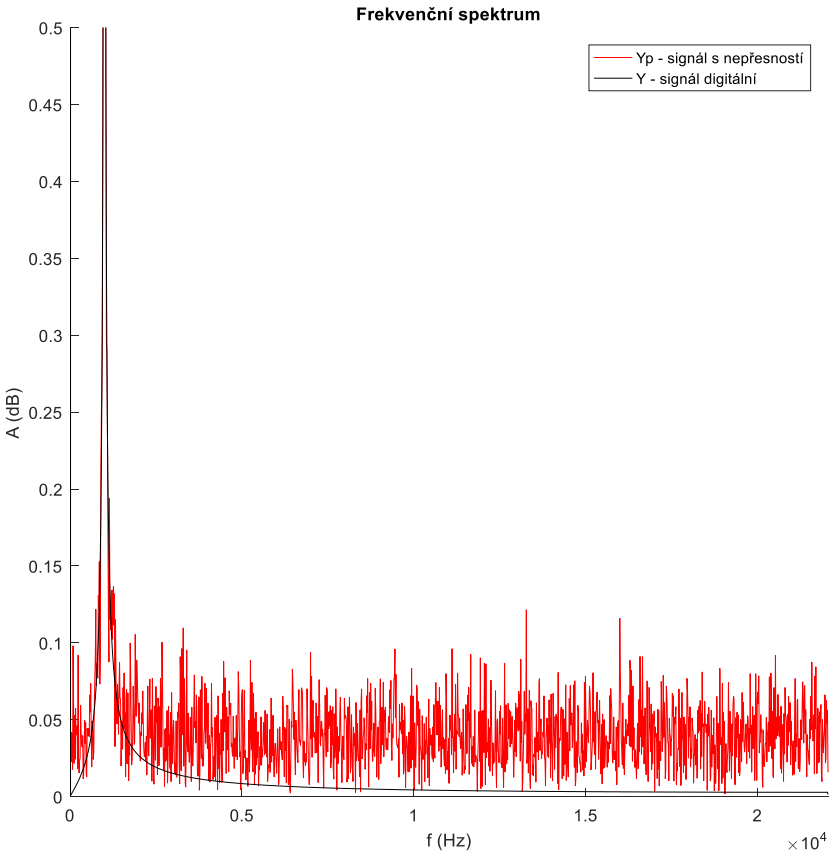
Na ose Y je vyneseno 1 % z celkové hodnoty vstupního signálu.
Tabulka hodnot zkreslení:

n	Yp	|Yp – Y|	Ys	Yavg	Ymod
1	49,991	0,009	0,067	0,054	0,008
2	49,996	0,004	0,071	0,055	0,011
3	49,999	0,001	0,061	0,054	0,012
4	49,998	0,002	0,068	0,055	0,012
5	49,994	0,006	0,070	0,055	0,012
6	49,992	0,008	0,063	0,054	0,011
7	49,992	0,008	0,071	0,055	0,009
8	50,002	0,002	0,072	0,055	0,009
9	49,997	0,003	0,069	0,054	0,010
10	50,003	0,003	0,062	0,055	0,011

Tab. 6.9 Audiosignál 10 a 25 % [dB]

Hlavní složka je převážně snížena tímto zatížením. Amplituda vedlejší složky je lehce nad 0,13 % hodnoty hlavní složky, průměr je okolo 0,11 %.

Pro nepřesnost s výskytem 10 % a nepřesností 75 % odpovídá tento graf:



Obr. 6.17 FFT audiosignálu (10 a 75 %)

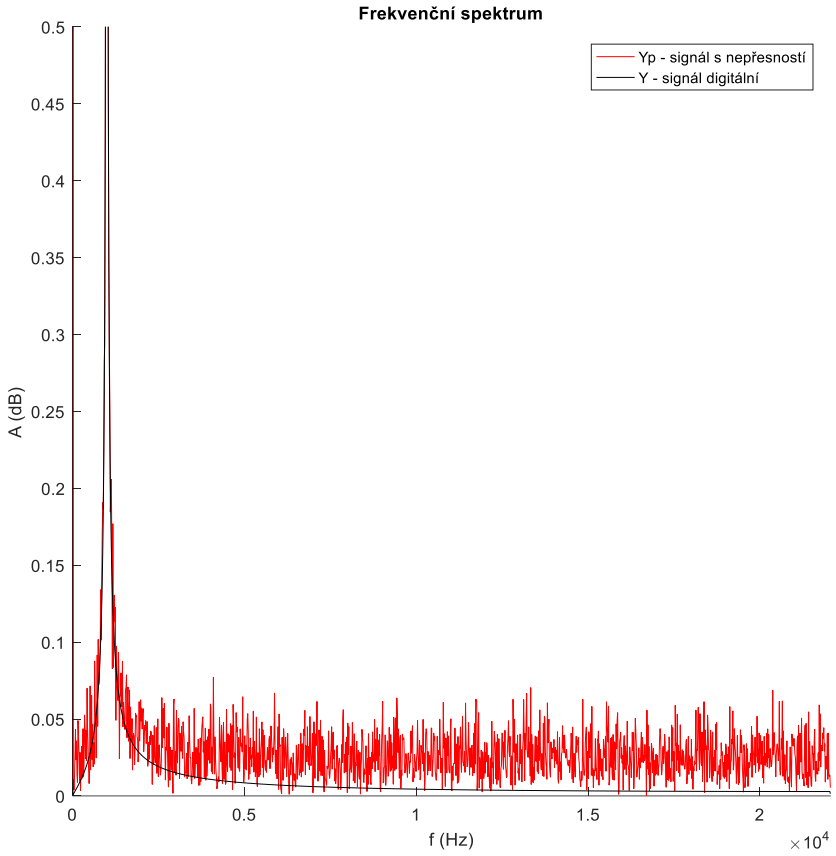
Hodnoty primární a vedlejších složek:

n	Yp	|Yp – Y|	Ys	Yavg	Ymod
1	49,990	0,010	0,121	0,079	0,029
2	49,987	0,013	0,126	0,077	0,025
3	49,966	0,034	0,130	0,079	0,035
4	49,992	0,008	0,103	0,076	0,028
5	49,990	0,010	0,102	0,077	0,038
6	49,985	0,015	0,116	0,077	0,026
7	49,982	0,018	0,116	0,078	0,027
8	49,995	0,005	0,157	0,079	0,034
9	50,015	0,015	0,126	0,078	0,020
10	49,966	0,034	0,116	0,077	0,023

Tab. 6.10 Audiosignál 10 a 75 % [dB]

Snížení hlavní složky je stále zanedbatelné, cca 0,07 %. Vzniklá amplituda sekundární složky je rovna až 0,24 % hodnoty hlavní složky a průměr dalších složek roven 0,16 %.

V dalším experimentu je výskyt zvýšen na 50 % a nepřesnost nastavena na 25 %. Frekvenční analýza:



Obr. 6.18 Audiosignál o f 1 kHz (50 a 25 %)

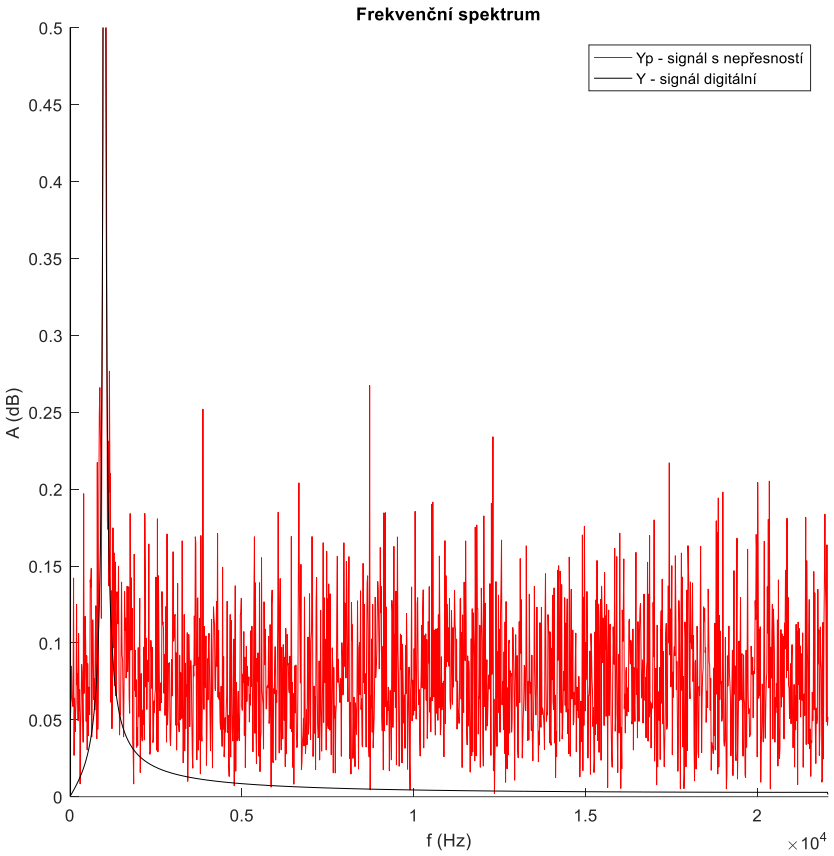
Přísluší mu tyto hodnoty:

n	Yp	|Yp – Y|	Ys	Yavg	Ymod
1	49,978	0,022	0,102	0,067	0,013
2	50,003	0,003	0,088	0,066	0,020
3	49,993	0,007	0,082	0,067	0,022
4	49,987	0,013	0,099	0,067	0,022
5	49,998	0,002	0,078	0,066	0,021
6	49,997	0,003	0,084	0,066	0,029
7	49,967	0,033	0,092	0,066	0,018
8	50,007	0,007	0,097	0,067	0,026
9	49,962	0,038	0,090	0,066	0,020
10	49,978	0,022	0,083	0,066	0,020

Tab. 6.11 Audiosignál 50 a 25 % [dB]

Při větším výskytu chyby nám vzrostly i hodnoty vedlejších a rozdíly hlavních složek. Amplituda vedlejších složek je nyní 0,18 % a průměr 0,13 % z velikosti primární složky.

Poslední experiment bude mít výskyt 50 % a nepřesnost 75 %.



Obr. 6.19 Audiosignál o f 1 kHz (50 a 75 %)

Už z grafu je zřetelné, že vyšší výskyt a procento chyby bude mít velký dopad na měření.

Hodnoty:

n	Yp	|Yp – Y|	Ys	Yavg	Ymod
1	49,867	0,133	0,267	0,117	0,066
2	49,885	0,115	0,246	0,116	0,036
3	49,902	0,098	0,233	0,116	0,084
4	49,818	0,182	0,241	0,117	0,077
5	49,857	0,143	0,262	0,115	0,063
6	49,970	0,030	0,248	0,116	0,070
7	49,843	0,157	0,246	0,115	0,045
8	49,865	0,135	0,237	0,115	0,086
9	49,881	0,119	0,217	0,115	0,056
10	49,942	0,058	0,231	0,115	0,087

Tab. 6.12 Audiosignál 50 a 75 % [dB]

Amplituda vedlejších složek je 0,5 % z hlavní složky. Průměr má polovinu této hodnoty. Z toho vyplývá, že vliv nepřesnosti roste zároveň s velikostí a výskytem chyby.

Vyhodnocení této závislosti:

P(chyba) [%]	Nepřesnost [%]	Yp [dB]	|Yp – Y| [dB]	Ys [dB]	Yavg [dB]	Ymod [dB]
10	**25**	49,996	0,005	0,067	0,055	0,011
10	**75**	49,987	0,016	0,121	0,078	0,029
50	**25**	49,987	0,015	0,090	0,066	0,021
50	**75**	49,883	0,117	0,243	0,116	0,067

Tab. 6.13 Nepřesnost a výskyt

Z průměrných hodnot všech čtyř experimentů plyne, že vzestupná nepřesnost a výskyt chyb mají významný vliv na výsledek měření. Vliv těchto dvou vlastností se sčítá.

7 ZÁVĚR

Výše uvedené experimenty byly zaměřeny na vyhodnocení vlivu nepřesnosti vzorkovací periody na měření různých technický veličin. Tento vliv byl naměřen v závislosti na frekvenci vzorkování, frekvenci vstupního signálu a samotné nepřesnosti, jejím výskytu a rozptylu.

Model a výsledky experimentů byly prováděny za pomocí rychlé Fourierově transformaci, zabudované funkce fft(), v programu MatLab.

První experiment vyhodnocuje závislost na frekvenci vzorkování.

f [HZ]	Yp [%]	|Yp – Y| [%]	Ys [%]	Yavg [%]	Ymod [%]
600	99,63	0,47	1,62	0,52	0,44
1200	99,89	0,11	0,66	0,20	0,28
1800	99,96	0,04	0,44	0,11	0,08

Tab. 7.1 Závislost na vzorkování [%]

První sloupec nese hodnotu samplovací frekvence. Z tohoto můžeme vyvodit, že vzorkování má na nepřesnost velký vliv. Vstupním signálem byl signál v podobně napětí od 0 do 10 V o frekvenci 50 Hz. Nejnižší frekvence, kterou byl vzorkován je 600 Hz.

Zbylé sloupce se týkají zkreslení amplitud hlavní složky a nových vzniklých sekundárních složek, průměrů a nejčetnější hodnoty.

Při šestinásobku doporučené frekvence, tedy dvanáctinásobku oscilace vstupního signálu, je snížení amplitudy hlavní složky až o 0,5 %. Vedlejší složky mají tuto hodnotu jak v průměru, tak může být i nejčetnější amplitudou. Největší složka je však až 1,6 %.

Nejlépe je na tom samozřejmě frekvence vyšší, 1800 Hz. Hlavní složka je ovlivněna zanedbatelně, vzniklé složky jsou v hodnotách 0,1 %. Amplituda je jen 0,5 %.

Další měření bylo založené na změně vstupního signálu.

Fs [HZ]	Yp [%]	|Yp – Y| [%]	Ys [%]	Yavg [%]	Ymod [%]
100	99,84	0,16	0,77	0,10	0,13
250	99,28	0,72	1,83	0,25	0,33
500	97,09	2,92	3,64	0,55	0,66

Tab. 7.2 Závislost na vstupním signálu [%]

Zde byl převodník pevně nastaven na frekvenci 2000 Hz. V praxi by se mohlo jednat například o měření vibrací. Kdy se jejich rezonance může měnit vlivem zatížení mechanických části a podobně.

S rostoucí oscilací vstupu roste i nežádoucí vliv nepřesnosti. V tomto případě jsme se dostali k čtyřnásobku doporučenému poměru vstupní a vzorkovací frekvence. Z toho plyne i vyšší vliv.

Hodnota hlavní složky klesla až o 3 %. Největší sekundární složka má přes 3,5 % hodnoty nezkreslené složky. Pokud při měření bude docházet k zvyšování frekvencí

sledovaných veličin, bude růst i nepřesnost. U těchto dvou modelů byla použita stejná pravděpodobnost (20 %) a rozsah chyby (1 až 75 %).

Poslední experiment obsahuje pevně definovaný signál a AD převodník. Jedná se o audiosignál o frekvenci 1 kHz a Audio CD standart samplování 44,1 kHz. Amplituda je 50 dB.

P(chyba) [%]	Nepřesnost [%]	Yp [%]	|Yp - Y| [%]	Ys [%]	Yavg [%]	Ymod [%]
10	**25**	99,99	0,01	0,13	0,11	0,02
10	**75**	99,97	0,03	0,24	0,16	0,06
50	**25**	99,97	0,03	0,18	0,13	0,04
50	**75**	99,77	0,23	0,49	0,23	0,13

Tab. 7.3 Závislost na nepřesnosti [%]

Zde docházelo ke změnám pravděpodobnosti a nepřesnosti. Díky velkému převzorkování se vliv významně neprojevil. Ale mezi nejlepším a nejhorším stavem je poměr změny hlavní složky až 23násobný. Pokud by bylo toto nastavení použité pro méně odolné konfigurace, například jako u předešlých experimentů, měření by bylo velice nepřesné.

Tyto závislosti by mohly být ovlivněny důsledkem staří hardwaru, nevhodného vedení nebo jiných nedokonalostí A/Č převodníku.

Experimenty prokázaly vliv nepřesnosti vzorkovací periody na měření a je nutno tento jev brát v potaz. Může výrazně ovlivnit nejistotu a samotné měření. Nežádoucí vliv se nejvíce projeví ve vibroakustice, jinými slovy při měření hluku a vibrací. Vlivem nepřesnosti vzorkovací periody může dojít k nevhodné diagnostice. Z výsledků bude nejasné rozpoznání závady nebo jiných poruch.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] Peterka, Jiří, 1995. CHIPweek [online]. 26. 10. 1998, č 39, s.29-30 [cit. 14. 3. 2019]. ISSN 1211-1007. Dostupné z http://www.earchiv.cz/a98/a844k180.php3

[2] MARTINEK, R. Senzory v průmyslové praxi. Vydání 1. 200 stran vydal / výrobce BEN - technická literatura, 2004, ISBN / EAN 80-7300-114-4 / 9788073001148

[3] Súkupová, Lucie. Technické aspekty zobrazování. In: *Sukupova.cz* [online]. 26. 10. 2015 [cit. 14. 3. 2019] Dostupné z: http://www.sukupova.cz/vzorkovani-signalu-a-aliasing/

[4] AUTOR NEUVEDEN. In: *edit.it* [online]. [cit. 14.3.2019]. Dostupný na: https://editit.wordpress.com/2016/05/06/1007/#jp-carousel-1011

[5] Bushberg JT, Seibert JA, Leidholdt EM, Boone JM. *The essential physics of medical imaging*. 3rd edition. Lippincott Williams & Wilkins, 2011, Philadelphia

[6] Reichl, Jaroslav. Encyklopedie Fyziky. In: *fyzika.jreichl.com* [online]. 27. 12. 2011 [cit. 14. 3. 2019] Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1357-kvantovani-signalu

[7] AUTOR NEUVEDEN. In: *edit.it* [online]. [cit. 14.3.2019]. Dostupný na: https://editit.wordpress.com/2016/05/06/1007/#jp-carousel-1012

[8] Šlechta, Miroslav. Astronomický ústav In: *asu.cas.cz* [online]. 9. 9. 2002 [cit. 22. 3. 2019] Dostupný na: http://stelweb.asu.cas.cz/~slechta/fourier/fourier.html

[9] Svoboda, Zdeněk. Ústav Matematiky In: *umat.feec.vutbr.cz* [online]. [cit. 3. 4. 2019] Dostupný na: http://www.umat.feec.vutbr.cz/~svobodaz/JMA2/fourier.pdf

[10] Skapa, Jan. *Zpracování číslicových signálů.* In: *vut-vsb.cz* [online]. [cit. 3. 4. 2019] Dostupný na: http://vut-vsb.cz/home/get-file?file=459&amp%3Bportal=Portal2

[11] Uhlíř, Jan; Sovka, Pavel. *Číslicové zpracování signálu.* Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02613-2.

[12] Raza, Salim. MATLAB & Simulink [online]. Copyright © 1994 [cit. 9. 4. 2019]. Dostupné z: https://uk.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/44792-matlab-code-for-fast-fourier-tranform-fft

[13] National Instruments. USB-6000 [online]. 2014. [cit. 14. 5. 2019]. Dostupné z: http://www.ni.com/pdf/manuals/374113c.pdf

[14] National Instruments. USB-6000 [online]. 2014. [cit. 14. 5. 2019]. Dostupný z: http://www.ni.com/cs-cz/support/model.usb-6000.html

[15] National Instruments. USB-6003 [online]. 2014. [cit. 14. 5. 2019]. Dostupné z: http://www.ni.com/pdf/manuals/374372a.pdf

[16] Advantech. PCIE-1840 [online]. 2019. [cit. 14. 5. 2019]. Dostupné z: https://advdownload.blob.core.windows.net/productfile/PIS/PCIE-1840/Product%20-%20Datasheet/PCIE-184020180910101845.pdf

[17] Advantech. PCIE-1840 [online]. 2019. [cit. 14. 5. 2019]. Dostupný z: https://advdownload.blob.core.windows.net/productfile/PIS/PCIE-1840/Product%20-%20Photo(B)/PCIE-1840_120151127091824.jpg

[18] Arduino. Uno Rev 3 [online]. 2019. [cit. 14. 5. 2019]. Dostupné z: https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3

[19] Arduino. Uno Rev 3 [online]. 2019. [cit. 14. 5. 2019]. Dostupný z: https://store-cdn.arduino.cc/uni/catalog/product/cache/1/image/1000x750/f8876a31b63532bbba4e781c30024a0a/a/0/a000066_iso_3.jpg

9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

Seznam obrázků:

Obr. 2.1 Model harmonického signálu. 17
Obr. 2.2 Zašuměný signál. 18
Obr. 2.3 Model sinusového diskrétního signálu v prostředí Matlab. 19
Obr. 2.4 Model digitálního signálu 19
Obr. 2.5 Vzorkování signálu. [4] 20
Obr. 2.6 Následek podvorkování signálu. [4] 20
Obr. 2.7 Kvantování 3bit A/Č převodníku. [7] 21
Obr. 4.1 Harmonická funkce y(t) 28
Obr. 4.2 Harmonická funkce y(t) v f-spektru 29
Obr. 4.3 Harmonická funkce y(t) v f-spektru 30
Obr. 6.1 Generovaný analogový signál (10 V a 50 Hz) 33
Obr. 6.2 Signál vzorkovaný frekvencí 600 Hz 34
Obr. 6.3 Signál ve frekvenčním spektru (600 Hz) 34
Obr. 6.4 Signál vzorkovaný frekvencí 1200 Hz 35
Obr. 6.5 Signál ve frekvenčním spektru (1200 Hz) 36
Obr. 6.6 Signál vzorkovaný frekvencí 1800 Hz 37
Obr. 6.7 Signál ve frekvenčním spektru (1800 Hz) 37
Obr. 6.8 Generovaný analogový signál (20 mA a 100 Hz) 39
Obr. 6.9 Digitalizovaný vstupní signál o frekvenci 100 Hz 39
Obr. 6.10 Signál ve frekvenčním spektru o f 100 Hz. 40
Obr. 6.11 Digitalizovaný vstupní signál o frekvenci 250 Hz 41
Obr. 6.12 Signál ve frekvenčním spektru o f 250 Hz 41
Obr. 6.13 Digitalizovaný vstupní signál o frekvenci 500 Hz 42
Obr. 6.14 Signál ve frekvenčním spektru o f 500 Hz 43
Obr. 6.15 Audiosignál o f 1 kHz (10 a 25 %) 44
Obr. 6.16 FFT audiosignálu (10 a 25 %) 45
Obr. 6.17 FFT audiosignálu (10 a 75 %) 46
Obr. 6.18 Audiosignál o f 1 kHz (50 a 25 %) 47
Obr. 6.19 Audiosignál o f 1 kHz (50 a 75 %) 48

Seznam tabulek:

Tab. 5.1 Srovnání převodníků [15, 16, 18].....32
Tab. 6.1 Hodnoty při samplovací frekvenci 600 Hz [V].....35
Tab. 6.2 Hodnoty při samplovací frekvenci 1200 Hz [V].....36
Tab. 6.3 Hodnoty při samplovací frekvenci 1800 Hz [V].....38
Tab. 6.4 Souhrnná data z experimentu.....38
Tab. 6.5 Hodnoty pro signál 20 mA, 100 Hz [mA].....40
Tab. 6.6 Hodnoty pro signál 20 mA, 250 Hz [mA].....42
Tab. 6.7 Hodnoty pro signál 20 mA, 500 Hz [mA].....43
Tab. 6.8 Shrnutí všech tří experimentů.....44
Tab. 6.9 Audiosignál 10 a 25 % [dB].....45
Tab. 6.10 Audiosignál 10 a 75 % [dB].....46
Tab. 6.11 Audiosignál 50 a 25 % [dB].....47
Tab. 6.12 Audiosignál 50 a 75 % [dB].....48
Tab. 6.13 Nepřesnost a výskyt.....49
Tab. 7.1 Závislost na vzorkování [%].....51
Tab. 7.2 Závislost na vstupním signálu [%].....51
Tab. 7.3 Závislost na nepřesnosti [%].....52

10 SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A: CD

1. Text práce ve formátu PDF
2. Zdrojový kód v podobě skriptu pro program MatLab
3. Audiosignál vygenerovaný bez vlivu nepřesnosti
4. Audiosignál vygenerovaný s vlivem nepřesnost