

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Software pro zpracování a vyhodnocování
experimentálně naměřených dat

Ladislav Jedlička

Bakalářská práce

2012

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ladislav Jedlička**
Osobní číslo: **I08229**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Software pro zpracování a vyhodnocování experimentálně naměřených dat**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cíl práce:

Vytvoření uživatelsky přívětivé aplikace pro zpracování a vyhodnocování experimentálně naměřených dat (zohlednění vlivu šumu a driftu, filtrace) s možností rychlého zobrazování FFT, PSD a dalších charakteristik.

Teoretická část:

Stručná rešerše problematiky týkající se off-line zpracování naměřených dat, algoritmů FFT, výpočtu PSD, frekvenčních charakteristik apod.

Implementační část:

Pořízení dat pro další zpracování, měření na zvolené dynamické soustavě v laboratoři. Tvorba aplikace ve vývojovém prostředí LabVIEW. Realizace skriptů v Matlabu.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**


Seznam odborné literatury:

- [1] Tůma, J.: Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901936-1-7.
- [2] Stoica, P., Moses, R. L.: Introduction to Spectral Analysis. New York: Prentice-Hall, 1997.
- [3] Pechoušek, J.: Základy programování v prostředí LabVIEW. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2004. ISBN 80-244-0800-7.
- [4] National Instruments: Uživatelský manuál prostředí LabVIEW.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Kupka, Ph.D.**
Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: **12. prosince 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11. května 2012**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 30. března 2012

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 12. 08. 2012

Ladislav Jedlička

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Liboru Kupkovi, Ph.D. za odborné rady, připomínky a pomoc při vedení bakalářské práce.

Také bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za podporu při celém studiu a při psaní této práce.

Anotace

Teoretická část obsahuje rozebrání problematiky týkající se off-line zpracování naměřených dat, algoritmů FFT, PSD, frekvenčních charakteristik apod.

V praktické části je vytvořena aplikace v prostředí LabVIEW a skript v Matlabu pro zpracování a vyhodnocování naměřených dat s možností rychlého zobrazení FFT, PSD a dalších charakteristik.

Klíčová slova

FFT, frekvenční charakteristika, LabVIEW, Matlab, PSD

Title

Software for processing and evaluation of the experimentally measured data

Annotation

The theoretical part includes the dismantling of issues relating to off-line data processing, algorithms, FFT, PSD, frequency characteristics, etc.

In the practical part of the application created in LabVIEW and Matlab script for processing and evaluation of measured data with the ability to quickly display the FFT, PSD and other characteristics.

Keywords

FFT, frequency characteristic, LabVIEW, Matlab, PSD

Obsah

Seznam zkratk.....	9
Přehled symbolů a označení	9
Seznam obrázků.....	11
Úvod.....	12
1 FFT.....	13
1.1 Metoda vybraných vstupních posloupností v FFT pro $N=2^m$	13
1.2 Metoda vybraných obrazových posloupností v FFT pro $N=2^m$	16
1.3 Metoda se základem $N=r^m$	18
1.4 Metoda s obecným základem	18
1.5 FFT analyzátoři	20
2 Výkonová spektrální hustota.....	22
2.1 Welchova metoda	22
2.2 Bartlettova metoda.....	23
2.3 Měření výkonové spektrální hustoty	24
2.3.1 Periodogram.....	24
2.3.2 Stupnice pro výkonovou spektrální hustotu	24
3 Měření frekvenčních charakteristik	26
3.1 Dynamické systémy.....	28
3.2 Koherenční funkce.....	29
3.3 Algoritmus výpočtu frekvenčních charakteristik a koherence.....	30
4 LabVIEW	32
4.1 Co je to LabVIEW	32
4.2 Zpracování FFT a PSD v LabVIEW	32
5 Aplikace v LabVIEW	35
5.1 Postup měření dat	35
5.2 Blokový diagram a čelní panel aplikace.....	37
5.3 Výsledky.....	40
5.3.1 Výsledky pro zrychlení.....	41
5.3.2 Výsledky pro výchylku	43
6 Matlab.....	46
6.1 Program v Matlabu	46
6.2 Grafy.....	46
Závěr.....	48

Literatura.....	49
Přílohy	50

Seznam zkratk

DFT	Discrete Fourier Transformation (diskrétní Fourierova transformace)
FFT	Fast Fourier Transformation (rychlá Fourierova transformace)
LabVIEW	Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench (laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů)
LTI	Linear time-invariant (lineární a časově invariantní)
MATLAB	Matrix Laboratory (maticová laboratoř)
PSD	Power spectral density (výkonová spektrální hustota)
VI	Virtual Instrument (virtuální přístroj)

Přehled symbolů a označení

a	zrychlení;
f	frekvence;
$F(j\omega)$	frekvenční přenos;
G_K	sudá posloupnost;
$g(t)$	váhová funkce;
H_K	lichá posloupnost;
K	zesílení;
M	počet členů;
N	počet prvků;
p	počet posloupností;
PSD_k	průměrované hodnoty výkonové spektrální hustoty;
r	základ;
r	řád astatismu;
r_i	sudá posloupnost;
$R_{xx}(\tau)$	autokorelační funkce;
s	Laplacelův operátor;
s_i	lichá posloupnost;
$S_{xx}(\omega)$	výkonová spektrální hustota;
t	čas;
T	doba periody periodického signálu;
T_d	dopravní zpoždění

$U(s)$	Laplaceův obraz vstupní veličiny;
W	koeficient;
x_i	posloupnost;
X_k	posloupnost;
$X(\omega)$	Fourierova transformace signálu $x(t)$;
${}_m X_n$	posloupnost;
X^*	komplexně sdružená hodnota ke komplexnímu číslu X ;
$Y(s)$	Laplaceův obraz výstupní veličiny;
z	výchylka;
$Z_{TXX}(\omega)$	periodogram;
ξ	součinitel poměrného tlumení;
ω	úhlová frekvence;
$\gamma_{xy}(f)$	koherenční funkce;
τ	zpoždění;
τ	Diskrétní nebo spojitá veličina;

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Grafické znázornění výpočtu X_K z G_K a H_K pomocí signálového grafu [2]	14
Obrázek 2 – První krok ve výpočtu DFT pro $N=8$ [2].....	14
Obrázek 3 – Druhý krok ve výpočtu DFT pro $N=8$ [2].....	15
Obrázek 4 – Celý postup výpočtu DFT pro $N=8$ [2].....	15
Obrázek 5 – Znázornění výpočtu r_i a s_i pomocí signálového grafu [2]	16
Obrázek 6 – První krok ve výpočtu DFT pro $N=8$ [2].....	17
Obrázek 7 – Druhý krok ve výpočtu DFT pro $N=8$ [2].....	17
Obrázek 8 – Celý postup výpočtu DFT pro $N=8$ [2].....	18
Obrázek 9 – Postup výpočtu pro $N=6$, $p=2$ a $M=3$ [2].....	19
Obrázek 10 – Postup výpočtu pro $N=6$, $p=3$, $M=2$ [2].....	20
Obrázek 11 – Blokové schéma Welchovy metody [3].....	22
Obrázek 12 – Blokové schéma Bartlettovy metody[3].....	23
Obrázek 13 – Obrazový přenos [6].....	26
Obrázek 14 – Hodograf [5].....	27
Obrázek 15 – Příklad amplitudové frekvenční charakteristiky [5].....	27
Obrázek 16 – Příklad fázové frekvenční charakteristiky [5].....	28
Obrázek 17 – Blokový diagram dvoukanálového FFT analyzátoru [1]	31
Obrázek 18 – Nabídka FFT a PSD v prostředí LabVIEW.....	32
Obrázek 19 – Vstupy a výstupy FFT v LabView.....	33
Obrázek 20 – Vstupy a výstupy PSD v LabView.....	33
Obrázek 21 – Model pružícího podstavce sedadla s nůžkovým mechanismem s vlnovcovou pneumatickou pružinou [12].....	35
Obrázek 22 – Schéma modelu pružícího podstavce sedadla s nůžkovým mechanismem s vlnovcovou pneumatickou pružinou [12].....	36
Obrázek 23 – Polopružný disk pro měření zrychlení na sedadle: 1 – disk, 2 – kovová deska pro upevnění snímače, 3 – dutina pro snímač [12].....	37
Obrázek 24 – Kompletní blokový diagram.....	39
Obrázek 25 – Nastavovací část čelního panelu.....	40
Obrázek 26 – Celkový vzhled čelního panelu.....	40
Obrázek 27 – Průběhy pro zrychlení s vypnutými filtry.....	41
Obrázek 28 – Přenos zrychlení s vypnutými filtry.....	42
Obrázek 29 – PSD a_2 pro všechny typy filtru.....	42
Obrázek 30 – FFT rozsah pro základní provedení filtru.....	43
Obrázek 31 – Průběhy pro výchylku s vypnutými filtry.....	43
Obrázek 32 – Přenos výchylky s vypnutými filtry.....	44
Obrázek 33 – Přenos výchylky pro obdélníkové okno.....	44
Obrázek 34 – Průběhy výchylky při různých okenních funkcích.....	45

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá zpracováním a vyhodnocováním experimentálně naměřených dat. Z pořízených dat je cílem získat FFT, PSD a další charakteristiky. Mým cílem je vytvořit aplikaci ve vývojovém prostředí LabVIEW a skript v Matlabu, kterými dokážeme tyto charakteristiky rychle zobrazovat.

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část a obě části se mezi sebou prolínají.

V první kapitole teoretické části je vysvětlen pojem FFT a jsou ukázány základní metody – metoda vybraných vstupních posloupností a metoda vybraných obrazových posloupností. Obě tyto metody výpočtu jsou pro čtenáře zobrazeny i s grafickým znázorněním. Kromě těchto základních metod jsou stručněji vysvětleny i méně používané metody k výpočtu FFT. V této kapitole je čtenáři přiblížen i FFT analyzátor.

Druhá kapitola se věnuje výkonové spektrální analýze, kde jsou vysvětleny Welchova a Bartlettova metoda, díky nimž jsme schopni odhadnout velikost výkonové spektrální hustoty, a také se v této kapitole podíváme na měření výkonové spektrální hustoty.

V následující kapitole je probrána problematika měření frekvenčních charakteristik. V kapitole se čtenář dozví, jak se frekvenční charakteristiky dělí a jak se vyjádří pro dynamické systémy.

V poslední kapitole teoretické části je uživateli představeno vývojové prostředí LabVIEW a ukázáno, jak se v něm řeší zpracování FFT a PSD. Čtenář se v této kapitole dozví, jak prvky pro FFT a PSD, zapojovat ve vývojovém prostředí LabVIEW.

V praktické části je vytvořena aplikace ve vývojovém prostředí LabVIEW a skript v Matlabu a čtenáři jsou ukázány výsledky, které v těchto dvou programech byly dosaženy.

1 FFT

Je rychlý algoritmus pro výpočet diskrétní Fourierovy transformace (DFT). Základem algoritmu FFT je volba zvláštní délky záznamu, a to $N=2^m$, kde m je přirozené číslo. Díky této volbě dostáváme délky záznamu např. $N=128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192$, které jsou dosti blízké k dekadické řadě. Později byl vynalezen postup rychlého výpočtu transformace DFT pro $N=r^m$ nebo $N=r_1 r_2 \dots r_m$, kde bylo r nebo r_1, r_2 voleno různé od dvojky. V prostředí Matlab a u FFT analyzátoru je používaná délka záznamu, kde je mocnina dvě. [1]

1.1 Metoda vybraných vstupních posloupností v FFT pro $N=2^m$

Algoritmus výpočtu objevili Cooley a Tukey a je nazýván „algoritmem decimování v čase“ nebo „algoritmem DIT“. Na začátku výpočtu rozdělíme posloupnost X_k , která má N členů, na dvě posloupnosti, které budou mít $N/2$ prvků, dostaneme posloupnost sudých a lichých čísel – postup se nazývá rychlá Fourierova transformace se základem 2.

Obraz posloupnosti sudých čísel zapíšeme:

$$D_{N/2} \{ X_{2v} \} = G_K \quad \text{kde } k=0,1,\dots,N/2-1 \quad (1-1)$$

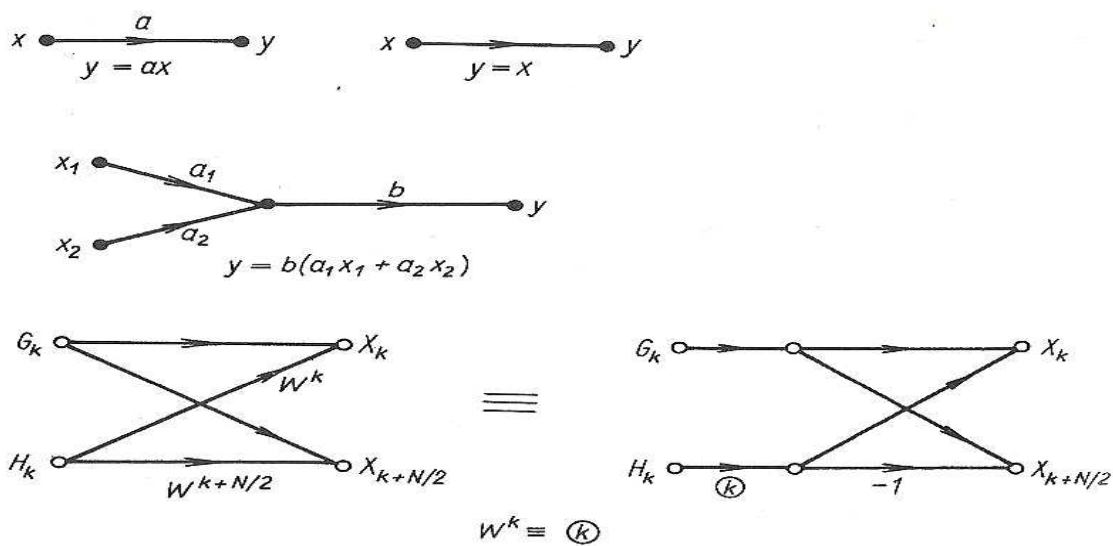
Obraz posloupnosti lichých čísel zapíšeme:

$$D_{N/2} \{ X_{2v+1} \} = H_K \quad \text{kde } k=0,1,\dots,N/2-1 \quad (1-2)$$

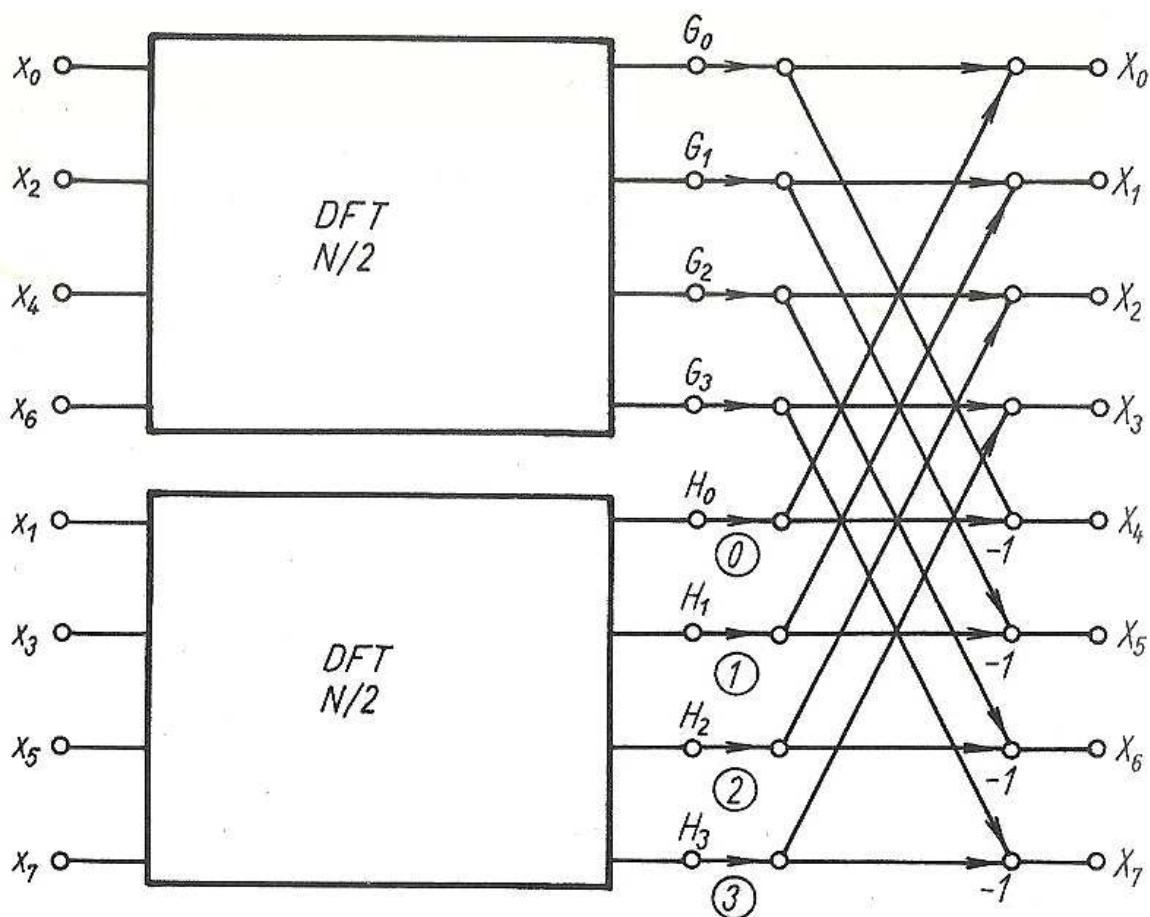
Když máme takto vyjádřené posloupnosti sudých a lichých čísel, tak můžeme vyjádřit posloupnost X_k vzorcem

$$X_K = G_K + e^{-jk2\pi/N} H_K \quad \text{kde } k=0,1,\dots,N-1; N \text{ počet prvků} \quad (1-3)$$

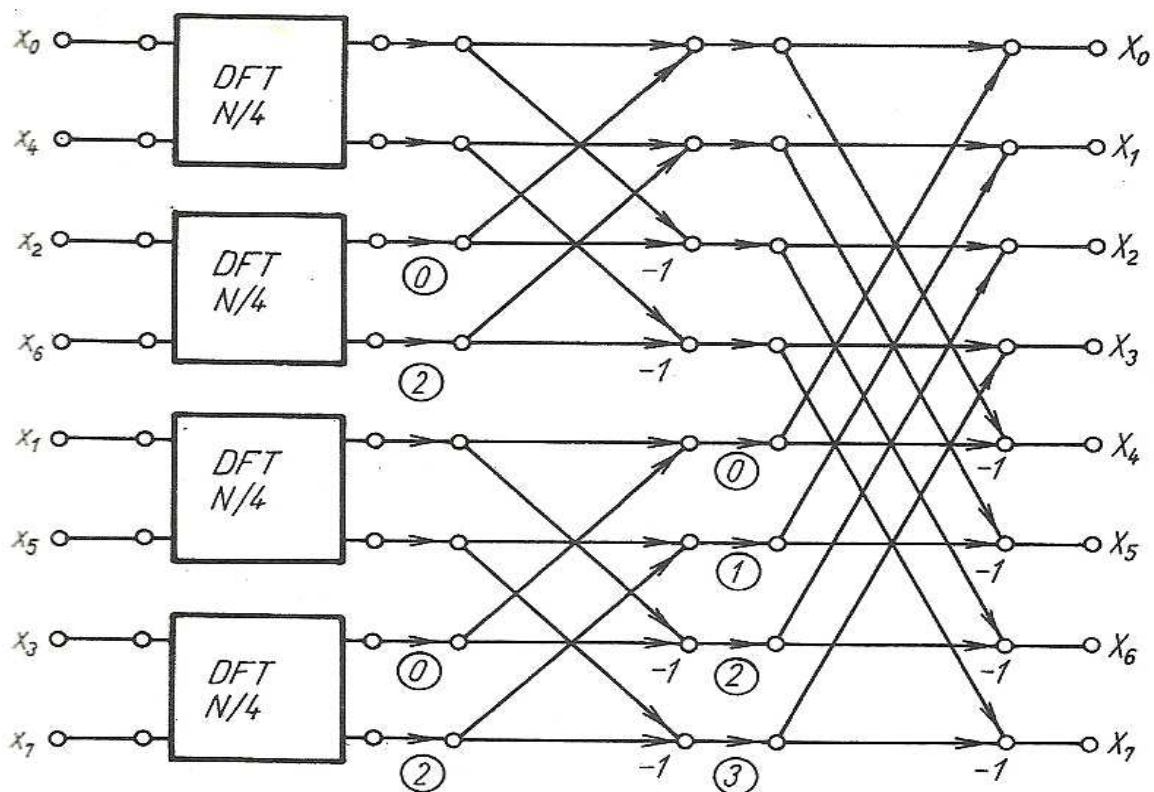
Výpočet posloupnosti X_k z posloupnosti G_k a H_k můžeme znázornit graficky pomocí signálového grafu. Při sestavování signálového grafu se musíme řídit pravidly, které jsou zobrazeny na obrázku 1. Tento obrázek vyjadřuje výpočet diskrétní Fourierovy transformace pro $N=2$ a nazývá se „motýlek“. Celý postup výpočtu pro $N=8$ je znázorněn na obrázku 2. V dalším kroku výpočtu musíme provést diskrétní Fourierovu transformaci z posloupnosti sudých a lichých čísel. To můžeme provést stejným způsobem, ale místo N dáme $N/2$. Výsledek je uveden na obrázku 3. V posledním kroku musíme provést čtyři transformace pro $N=2$, které vyjadřuje přímo „motýlek“. Shrnutí celého postupu je vidět na obrázku 4. $N=2^m$ vstupní posloupnost musí být v bitově invertovaném pořadí indexů. Bitově invertované pořadí vznikne, když indexy vyjádříme v binárním čísle, a poté je čteme odzadu. Tento způsob transformace je nazýván bitovou inverzí.



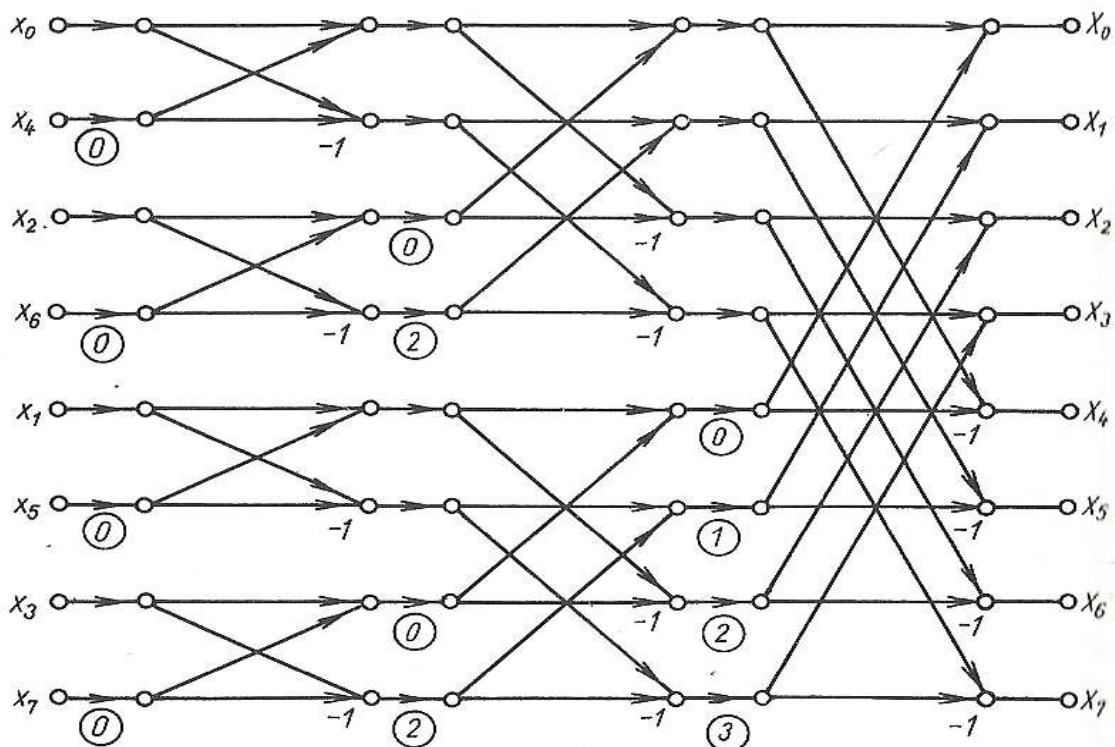
Obrázek 1 – Grafické znázornění výpočtu X_k z G_k a H_k pomocí signálového grafu [2]



Obrázek 2 – První krok ve výpočtu DFT pro $N=8$ [2]



Obrázek 3 – Druhý krok ve výpočtu DFT pro N=8 [2]



Obrázek 4 – Celý postup výpočtu DFT pro N=8 [2]

V této kapitole jsem čerpal z [2].

1.2 Metoda vybraných obrazových posloupností v FFT pro $N=2^m$

Neexistuje pouze algoritmus založený na principu decimování v čase, ale existuje i algoritmus, který je založený na principu „decimování ve frekvenci“, tj. v obraze. Tomuto algoritmu se říká „algoritmus DIF“. Metoda spočívá v samotném výpočtu sudých a lichých posloupností.

Pro sudé členy obrazu $k=2\mu$, $\mu=0,1,\dots,N/2-1$, dostaneme výraz

$$X_{2\mu} = D_{N/2} \{ x_i + x_{i+N/2} \}; \quad x_i \text{ posloupnost} \quad (1-4)$$

Pro liché členy dostaneme výraz

$$X_{2\mu+1} = D_{N/2} \{ (x_i - x_{i+N/2}) e^{-j2\pi/N} \} \quad (1-5)$$

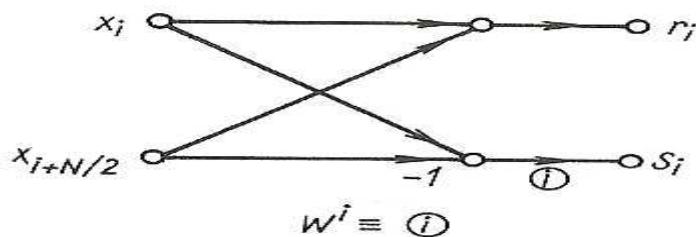
Zavedou-li se pomocné posloupnosti

$$x_i + x_{i+N/2} = r_i \quad \text{a} \quad (x_i - x_{i+N/2}) W^i = s_i, \quad \text{kde } i=0,1,\dots,N/2-1; \quad (1-6)$$

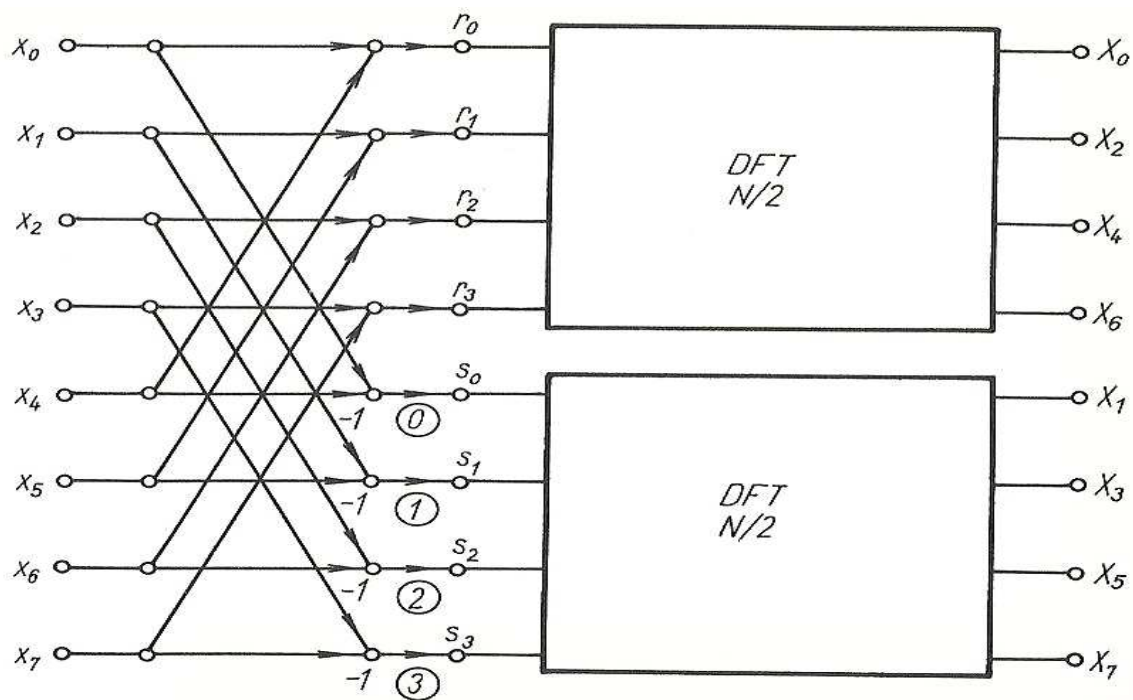
Potom se můžou obrazy posloupností vyjádřit

$$\begin{aligned} X_{2\mu} &= D_{N/2} \{ r_i \}, \\ X_{2\mu+1} &= D_{N/2} \{ s_i \}. \end{aligned} \quad (1-7)$$

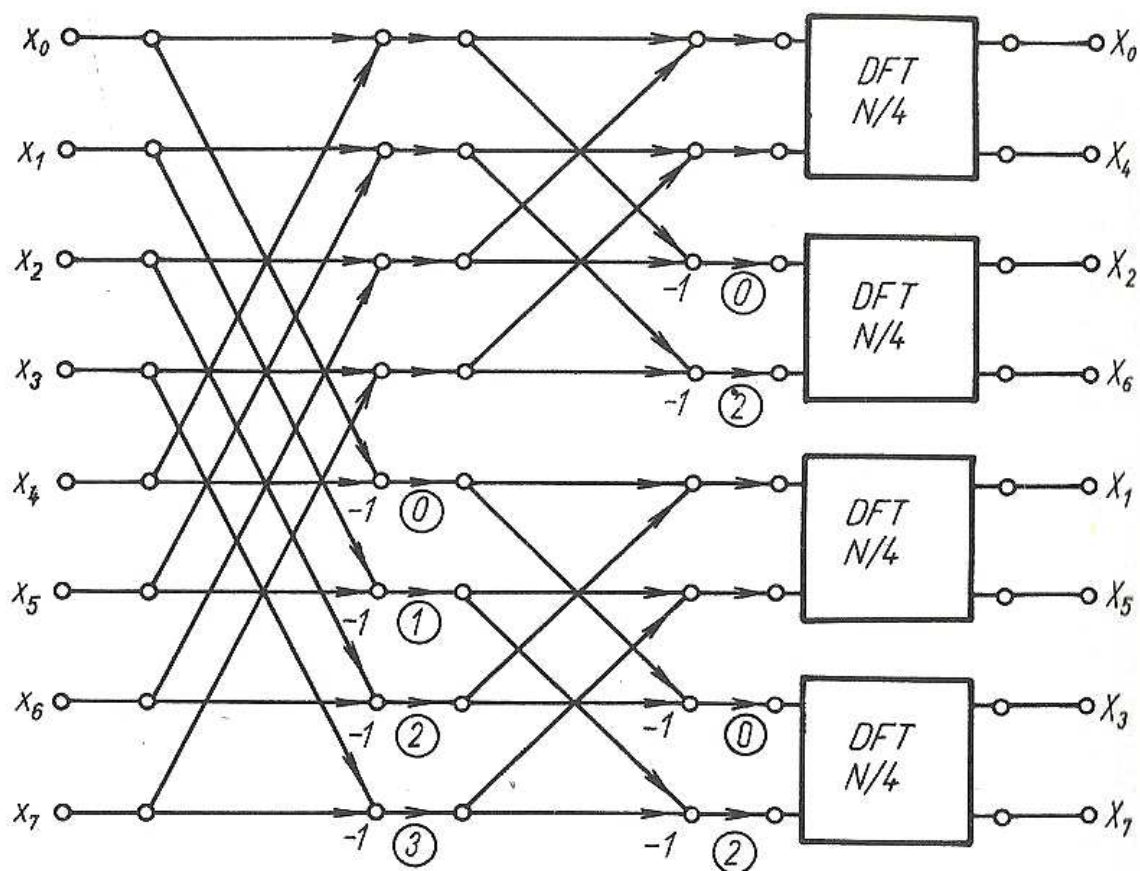
Výpočet r_i a s_i lze znázornit graficky ve tvaru „motýlku“, jak je na obrázku 5. Ze vztahů (1-7) je jasné, že místo výpočtu transformace z posloupností N hodnot se nyní bude počítat transformace r_i a s_i poloviční délky. Výpočet všech X_K je vidět na obrázku 6 pro $N=8$, když budeme stejný postup opakovat pro výpočet transformace z $N/2=4$ hodnot, tak se dostaneme k obrázku 7. Dalším opakováním postupu pro $N/4=2$ bychom se dostali k obrázku 8. V tomto případě je bitově invertovaná obrazová posloupnost a algoritmus probíhá bez přemísťování. Algoritmy založené na vybraných vstupních posloupnostech a vybraných výstupních posloupnostech jsou navzájem inverzní. Inverze znamená, že graf pro algoritmus založený na vybraných obrazových posloupnostech dostaneme z grafu algoritmu, který je založen na vybraných vstupních posloupnostech (a naopak), tím, že změníme směr šipek a graf čteme zprava doleva, koeficienty W ponecháme.



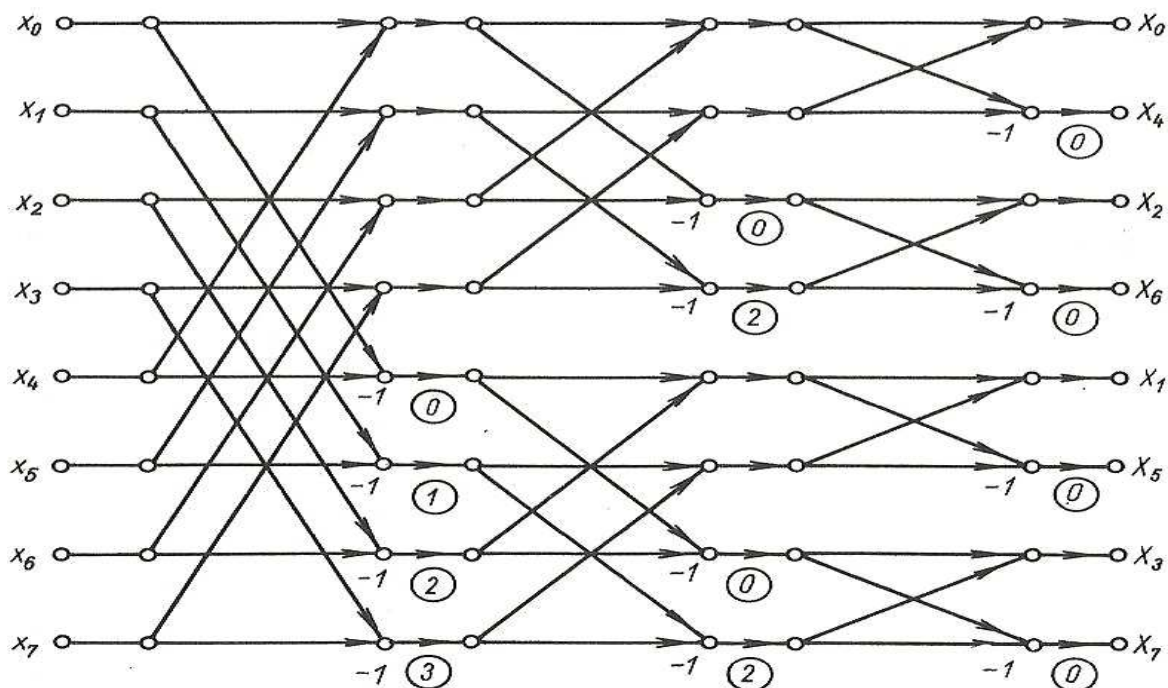
Obrázek 5 – Znázornění výpočtu r_i a s_i pomocí signálového grafu [2]



Obrázek 6 – První krok ve výpočtu DFT pro N=8 [2]



Obrázek 7 – Druhý krok ve výpočtu DFT pro N=8 [2]



Obrázek 8 – Celý postup výpočtu DFT pro N=8 [2]

V této kapitole jsem čerpal z [2].

1.3 Metoda se základem $N = r^m$

Celý postup z předešlých algoritmů je možné zobecnit na libovolný základ a můžeme tak dostat algoritmy pro $N = r^m$. Pro základy $r=4$ a $r=8$ byly publikovány programy, ale nedostalo se jim většího rozšíření. Hlavní význam této metody je v oblasti stavby jednoúčelových počítačů pro výpočet rychlé Fourierovy transformace.

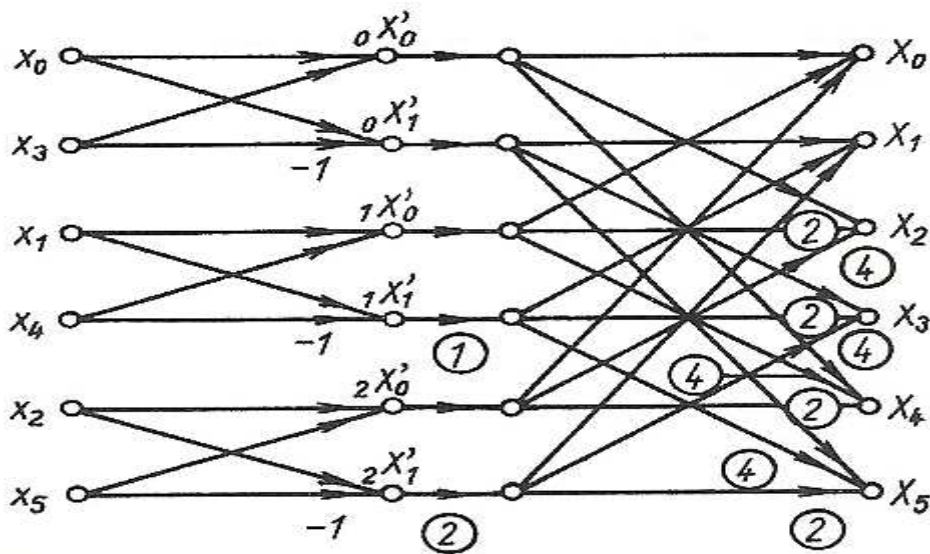
V této kapitole jsem čerpal z [2].

1.4 Metoda s obecným základem

Cooley a Tukey formulovali i algoritmus pro $N = r_1 \cdot r_2 \dots r_m$. Uvedeme si postup pro $N = 3 \cdot 2$. Posloupnost x_i lze rozdělit na posloupnost sudých členů x_0, x_2, x_4 a posloupnost lichých členů x_1, x_3, x_5 . Vytvoříme z posloupnosti o $N=6$ členech $p=2$ posloupnosti o $M=3$ členech tak, že bereme každý p -tý počínaje nultým a každý p -tý počínaje prvním. Dostaneme vztah

$$X_{3\mu+n} = \sum_{m=0}^1 e^{-jmn2\pi/6} \left(\sum_{\nu=0}^2 x_{2\nu+m} e^{-j\nu2\pi/3} \right) e^{-j\mu2\pi/2} \quad (1-8)$$

Nejprve provedeme vnitřní součet - transformaci pro $N=3$ a $m=0$, představující transformaci ze sudých členů, a potom pro $m=1$, představující transformaci z lichých



Obrázek 10 – Postup výpočtu pro $N=6$, $p=3$, $M=2$ [2]

V této kapitole jsem čerpal z [2].

1.5 FFT analyzátořy

Prostředky pro frekvenční analýzu signálu na principu užití Fourierovy transformace s použitím algoritmů FFT jsou stále dostupnější a běžnější. Je možné je rozdělit do dvou skupin

- FFT analyzátoř s potřebnou úpravou vstupních signálů, tj. filtrace, A/D převod a jeho řízení
- Software s FFT, který předpokládá záznam dat např. kartou A/D převodníku

FFT analyzátořy jsou vyráběny řadou firem, ale pro mechanické systémy jsou nejvhodnější analyzátořy vyráběné firmou Brüel&Kjaer. Hlavní výhoda je v univerzálnosti a přizpůsobení snímačům pro hluk a vibrace. Počet měřících kanálů u typu BK 355 je až 16. Převodník je čtrnáctibitový, proto maximální dynamický rozsah měření je 80dB. Je možné navolit počet spektrálních čar od 50, 100, a v násobcích dvěma až do 800. Ve speciálním modu, *TIME CAPTURE*, lze vyhodnotit spektrum při měření jednoho kanálu do 25600 složek a při měření dvoukanálovém do 12800 složek. Užitečné vlastnosti analyzátořu jsou ve variabilitě vstupů. Díky tomu je analyzátoř zatím nepřekonatelný běžnými kartami A/D převodníků. Data lze ukládat na disketu nebo přes sběrnici IEEE 488 posílat do počítače.

Uplatnění FFT analyzátořů při měření a zpracování signálů z mechanických systémů lze rozdělit do dvou skupin. Do první skupiny jsou zařazeny univerzální postupy:

- Univerzální měření časových průběhů signálu a jejich spekter

- Měření frekvenčních charakteristik nebo přenosových funkcí
- Frekvenční hluková a vibrační diagnostika

Druhou skupinou jsou postupy, při kterých se měří hromadně křížová spektra a frekvenční přenosy:

- Měření intenzity zvuku a strukturální intenzity
- Měření provozních tvarů kmitů
- Měření modálních vlastností mechanických struktur
- Transformaci zvukových polí

V uvedených metodách je důležité mít zjištěné vlastnosti signálu, jako je časový průběh a spektrum. Metody mají společné výchozí nastavení analyzátoru nebo volbu parametru programu počítače, který vyhodnocuje spektrum signálu nebo frekvenční charakteristiku dynamické soustavy.

Do softwarových prostředků lze zařadit *TOOLBOX SIGNAL* programového systému MATLAB nebo tabulkový kalkulátor EXCEL. Při používání MATLABu musíme pořídit vstupní data, které reprezentují ve zvoleném frekvenčním rozsahu skutečné signály.

V této kapitole jsem čerpal z [1].

2 Výkonová spektrální hustota

Výkonovou spektrální hustotu lze definovat pomocí autokorelační funkce, kde využijeme Wiener-Chinčinových vztahů. Výkonová spektrální hustota $S_{xx}(\omega)$ a autokorelační funkce $R_{xx}(\tau)$ jsou dány vzorci:

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau \quad (2-1)$$

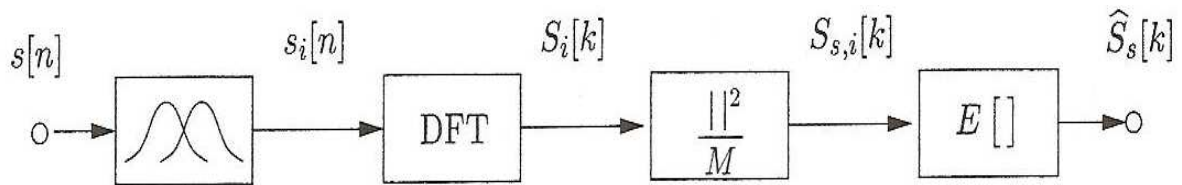
$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(\omega) \exp(j\omega\tau) d\omega \quad (2-2)$$

Výkonová spektrální hustota je spektrum. Stejně jako autokorelační funkce, tak i výkonová spektrální hustota, je funkcí sudou, proto platí $S_{xx}(\omega) = S_{xx}(-\omega)$.

V této kapitole jsem čerpal z [1].

2.1 Welchova metoda

Jedním ze způsobů, jak odhadnout spektrální výkonovou hustotu, je pomocí Welchovy metody. Metoda vychází z definice spektrální výkonové hustoty náhodného signálu, ale průměruje spektra získaná časovou segmentací analyzovaného signálu.



Obrázek 11 – Blokové schéma Welchovy metody [3]

Postup Welchovy metody

Parametry:

- signál $s[n]$ délky N ,
- řád DFT – M ,
- Hammingovo okno,
- krok segmentace m

1. Výběr váhovacího okna

$$w[n] = 0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi n}{M}, \text{ pro } n=0, \dots, M-1 \quad (2-3)$$

2. Výpočet počtu oken v signálu délky N

$$L = \text{celá část} \left(\frac{N - M}{m} + 1 \right) \quad (2-4)$$

3. Výpočet krátkodobého DFT spektra

$$S_i[k] = \text{DFT} \{ s_{i,w}[n] \} = \sum_{n=0}^M s[i \cdot m + n] \cdot w[n] e^{-j2nk\pi/M}, \text{ pro } i=0,1,\dots,L-1 \quad (2-5)$$

4. Průměrování krátkodobých výkonových spekter

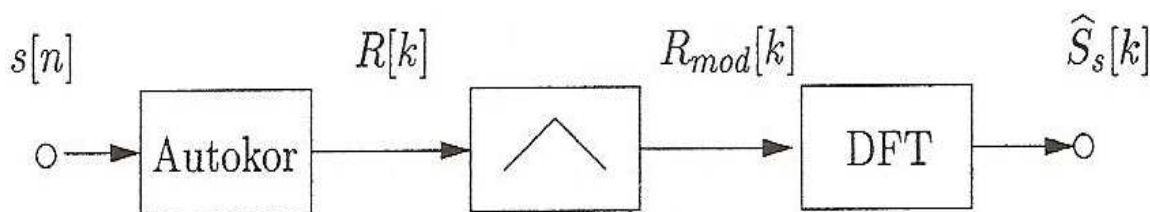
$$\hat{S}_s[k] = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} \frac{|S_i[k]|^2}{M} \quad (2-6)$$

U této metody je možné zvolit libovolné váhovací okno, ale nejčastěji se používá okno Hannovo nebo Hammingovo. Abychom dosáhli určitého stupně vyhlazení, tak potřebujeme mít k dispozici delší úsek analyzovaného signálu, ve kterém provádíme segmentaci.

V Matlabu je Welchova metoda zastoupena příkazem *psd* nebo je možné použít příkaz *spectrum*. V této kapitole jsem čerpal z [3].

2.2 Bartlettova metoda

Odhad Bartlettovou metodou je založen na přímé aplikaci Wienerova – Chinčinoва teorému pro diskrétní signály. Vyhlazení odhadu poté spočívá ve zkracování délky autokorelační funkce.



Obrázek 12 – Blokové schéma Bartlettovy metody [3]

Zkracování autokorelační funkce je váhování autokorelace zvoleným oknem. Pro váhování je nutné použít trojúhelníkové okno (Bartlettovo okno – proto Bartlettova metoda), které jediné má všechny hodnoty spektra kladné. Při použití jiného okna by záporné složky spekter způsobily zobrazení nežádoucích záporných složek v odhadu spektrální výkonové hustoty.

Bartlettova metoda je citlivá na odhad autokorelačních koeficientů, díky tomu se výsledky pro jednotlivá okna mohou hodně lišit, a proto se v některých případech setkáváme s průměrováním autokorelačních koeficientů po segmentech.

V této kapitole jsem čerpal z [3].

2.3 Měření výkonové spektrální hustoty

2.3.1 Periodogram

Pro definici periodogramu je výchozí Fourierova transformace, $X(\omega)$, signálu, $x(t)$.

$$Z_{TXX}(\omega) = \frac{1}{T} X(\omega) X^*(\omega) = \frac{1}{T} |X(\omega)|^2 = \frac{1}{T} X(-\omega)^* X(-\omega) = Z_{TXX}(-\omega) \quad (2-7)$$

Periodogram slouží jako základ k odhadování výkonových spektrálních hustot. Periodogram je reálnou funkcí úhlové frekvence [rad/s] nebo frekvence [Hz] v rozsahu od $-\infty$ do $+\infty$. Periodogram neobsahuje informaci o vzájemné fázi harmonických složek. Výkonová spektrální hustota, kterou odvodíme od periodogramu obsahuje složky s kladnou a zápornou frekvencí – oboustranné spektrum. Když chceme informaci o vzájemné fázi harmonických složek, použijeme vzorec

$$Z_{TXY}(\omega) = \frac{1}{T} X(\omega) Y^*(\omega) = \frac{1}{T} X^*(-\omega) Y(-\omega) = \frac{1}{T} (X(-\omega) Y^*(-\omega))^* = Z_{TXY}^*(-\omega) \quad (2-8)$$

V této kapitole jsem čerpal z [1].

2.3.2 Stupnice pro výkonovou spektrální hustotu

Pro vzorkované periodické signály je základem definice výkonové spektrální hustoty (power spectral density – PSD) rovněž periodogram (3-1). Místo $X(\omega)$ je potřeba použít výrazu $\Delta t X_k$, tj. násobení koeficientu X_k vzorkovací periodou, Δt . Z toho dostáváme vzorec pro $k=0$ a $k>0$

$$PSD_k = \frac{1}{T} |\Delta t X_0|^2 \text{ pro } k=0$$

$$PSD_k = \frac{2}{T} |\Delta t X_k|^2 \text{ pro } k=1,2,\dots,N/2-1 \quad (2-9)$$

Pomocí tohoto vzorce pro výkonovou spektrální hustotu dostaneme stejný výsledek jako při použití FFT analyzátorů Brüel&Kjaer, rozdíl je pouze v měřítku Fourierova spektra. Odlišná definice pro $k=0$ a $k>0$ odráží přechod z oboustranného spektra k jednostrannému spektru PSD_k jen pro nezáporné frekvence. Složky spektra $X(+\omega)$ a $X(-\omega)$, které přísluší DFT reálného signálu, jsou navzájem komplexně sdružené, díky tomu u oboustranného spektra je „výkon“ rozložen shodně pro složku se zápornou a kladnou frekvencí. U komplexního časového signálu nejsou složky s kladnými a zápornými frekvencemi navzájem komplexně sdruženy a výkon může být rozložen obecně nerovnoměrně mezi obě složky. Jednostranné spektrum nelze pro komplexní signál vytvořit. Pro obecně označené jednotky signálu se zkratkou [U] je fyzikální rozměr výkonové spektrální hustoty

$[U^2 / Hz]$. Tyto jednotky jsou vhodné pro náhodné signály. Na místo $[U]$ můžeme dosadit $[ms^{-2}]$, $[Pa]$, a pod..

V této kapitole jsem čerpal z [1].

3 Měření frekvenčních charakteristik

Frekvenční charakteristika je grafické znázornění frekvenčního přenosu $F(j\omega)$ v závislosti na frekvenci ω .

Frekvenční charakteristiky mohou popisovat:

- Jaké frekvence propustí filtr
- Jaké frekvenční pásmo je schopen zpracovat audio zesilovač
- Kolik snímků za sekundu a v jakém rozlišení může zobrazit analogový monitor (souvisí s frekvenčním rozsahem jeho zesilovače)

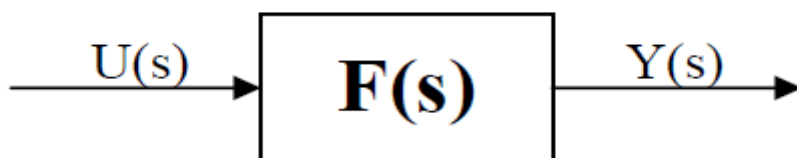
Frekvenční přenos $F(j\omega)$ je Fourierův obraz váhové funkce $g(t)$, tj. $F(j\omega) = F\{g(t)\}$ a získáme ho z obrazového přenosu $F(s)$ zavedením substituce $s = j\omega$.

$$F(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{s^r (a_n s^{n-r} + \dots + a_{r+1} s + a_r)} \quad (3-1)$$

$$F(j\omega) = \frac{b_m (j\omega)^m + \dots + b_1 j\omega + b_0}{(j\omega)^r (a_n (j\omega)^{n-r} + \dots + a_{r+1} j\omega + a_r)} \quad (3-2)$$

Z důvodu podmínek příčinné souvislosti je nutné, aby stupeň polynomu v čitateli byl nižší než stupeň polynomu ve jmenovateli ($m < n$).

Když nahradíme $s = j\omega$, tak dostaneme, že $F(s)$ je $F(j\omega)$



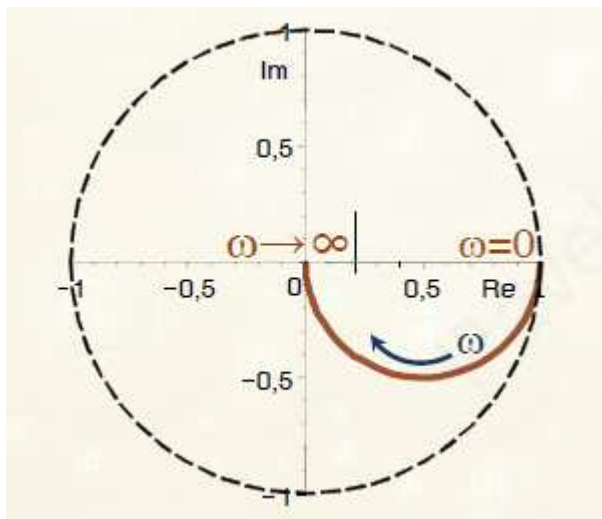
Obrázek 13 – Obrazový přenos [6]

Rozlišujeme:

- **Frekvenční charakteristiku v Gaussově rovině jako Hodograf (amplitudo-fázová charakteristika resp. Nyquistova charakteristika)**

Hodograf je křivka v komplexní rovině, kde bodům jsou přiřazeny frekvence. Vzdálenost vybraného bodu, který odpovídá určité frekvenci ω , od počátku určuje

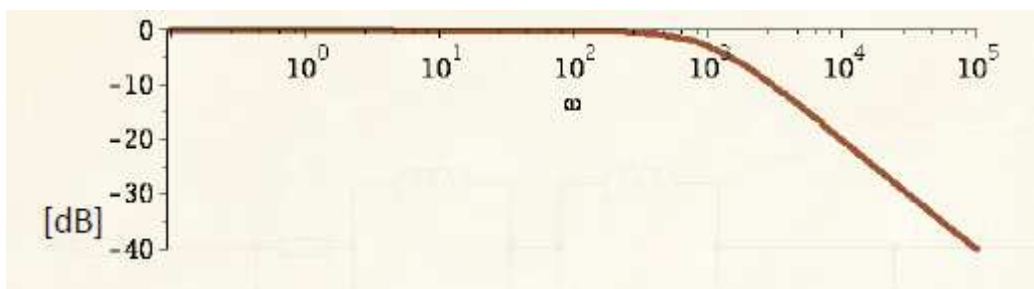
modul přenosu. Úhel mezi reálnou osou a spojnici mezi vybraným bodem křivky a počátkem určuje fázi přenosu. Hodograf pasivních obvodů, kromě rezonančního, leží uvnitř jednotkové kružnice. Ukázka Hodografu je na obrázku 14.



Obrázek 14 – Hodograf [5]

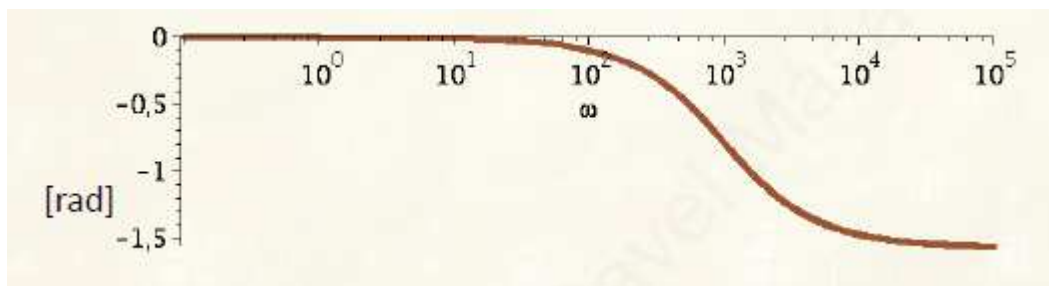
- **Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích (Bodeho charakteristika)**

Amplitudovou charakteristiku vynášíme jako $20 \log(F(j\omega))$. Obě osy charakteristiky jsou logaritmické a jednotkou je decibel [dB].



Obrázek 15 – Příklad amplitudové frekvenční charakteristiky [5]

Fázovou charakteristiku vynášíme jako $\arg((F(j\omega)))$. Osa x je logaritmická a osa y je lineární. Jednotkou je radián [rad].



Obrázek 16 – Příklad fázové frekvenční charakteristiky [5]

Podstatou Bodeho charakteristik jsou vlastnosti logaritmů

- Logaritmus součinu je součet logaritmů
- Logaritmus podílu je rozdíl logaritmů
- $\log 1 = 0$

V této kapitole jsem čerpal z [4], [5] a [6].

3.1 Dynamické systémy

Dynamický systém 1. řádu:

Obecné vyjádření obrazového a frekvenčního přenosu je

$$F(s) = \frac{K}{Ts + 1} \text{ a } F(j\omega) = \frac{K}{j\omega T + 1} \quad (3-3)$$

Frekvenční charakteristika v komplexní rovině:

$$F(j\omega) = \frac{K}{j\omega T + 1} \cdot \frac{1 - j\omega T}{1 - j\omega T} = \frac{K}{1 + \omega^2 T^2} - j \frac{K\omega T}{1 + \omega^2 T^2} \quad (3-4)$$

Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika:

$$|F(j\omega)|_{dB} = 20 \log K - 20 \log \sqrt{1 + \omega^2 T^2} \quad (3-5)$$

$$\varphi(\omega) = \arg K - \arg(1 + j\omega T) = -\arctg(\omega T) \quad (3-6)$$

Dynamický systém 2. řádu:

Obecné vyjádření obrazového přenosu je $F(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + \xi 2Ts + 1}$ (3-7)

kde $\xi \geq 1$ je tzv. součinitel poměrného tlumení a T je časová konstanta.

Pro $\xi=0$ dostáváme netlumený děj s úhlovou frekvencí $\omega_0 = \frac{1}{T}$, zatímco pro $\xi=1$ dostáváme mezní aperiodický děj. Úhlová frekvence ω_0 označena jako vlastní frekvence. Pro $\xi > 1$ je průběh aperiodický. Součinitel ξ představuje určité vyjádření míry kmitavosti děje.

Jestliže $\xi < 0$, je děj nestabilní (amplituda s časem narůstá).

Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika:

$$|F(j\omega)|_{dB} = 20 \log K - 20 \log \sqrt{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2 T^2} \quad (3-8)$$

$$\varphi(\omega) = \arg K - \arg[(j\omega T)^2 + 2\xi j\omega T + 1] = -\text{arctg} \frac{2\xi\omega T}{1 - \omega^2 T^2} \quad (3-9)$$

Systémy s dopravním zpožděním:

Obecné vyjádření obrazového a frekvenčního přenosu je

$$F(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-sT_d} \text{ a } F(j\omega) = \frac{K}{1 + j\omega T} e^{-j\omega T_d} \quad (3-10)$$

Logaritmická amplitudová a fázová charakteristika:

$$|F(j\omega)|_{dB} = 20 \log K - 20 \log \sqrt{1 + \omega^2 T^2} \quad (3-11)$$

$$\varphi(\omega) = -\omega T_d - \text{arctg}(\omega T) \quad (3-12)$$

Samotné dopravní zpoždění má ten efekt, že způsobí pootočení bodu frekvenční charakteristiky soustavy bez zpoždění o úhel ωT_d v záporném směru.

V této kapitole jsem čerpal z [4] a [7].

3.2 Koherenční funkce

Popis systémů lineárních a časově invariantních (LTI), které jsou frekvenčně závislé, je možný pomocí spektrální hustoty, vzájemnou spektrální hustotou a frekvenční charakteristikou. K posouzení přesnosti těchto charakteristik potřebujeme míru přesnosti a to je koherenční funkce. Koherenční funkce je značena $\gamma_{xy}(f)$ a je to reálná funkce reálné proměnné. Tato funkce může nabýt hodnot z intervalu $(0,1)$. Koherenční funkce udává míru korelace mezi dvěma signály a je možné ji použít i jako měřítko kvality odhadu frekvenčních charakteristik systémů a spektrálních hustot signálů. Je definovaná pomocí vzájemné a vlastní spektrální hustoty, a tak dostáváme vztah

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_x(f)G_y(f)}, 0 \leq \gamma_{xy}^2(f) \leq 1 \quad (3-13)$$

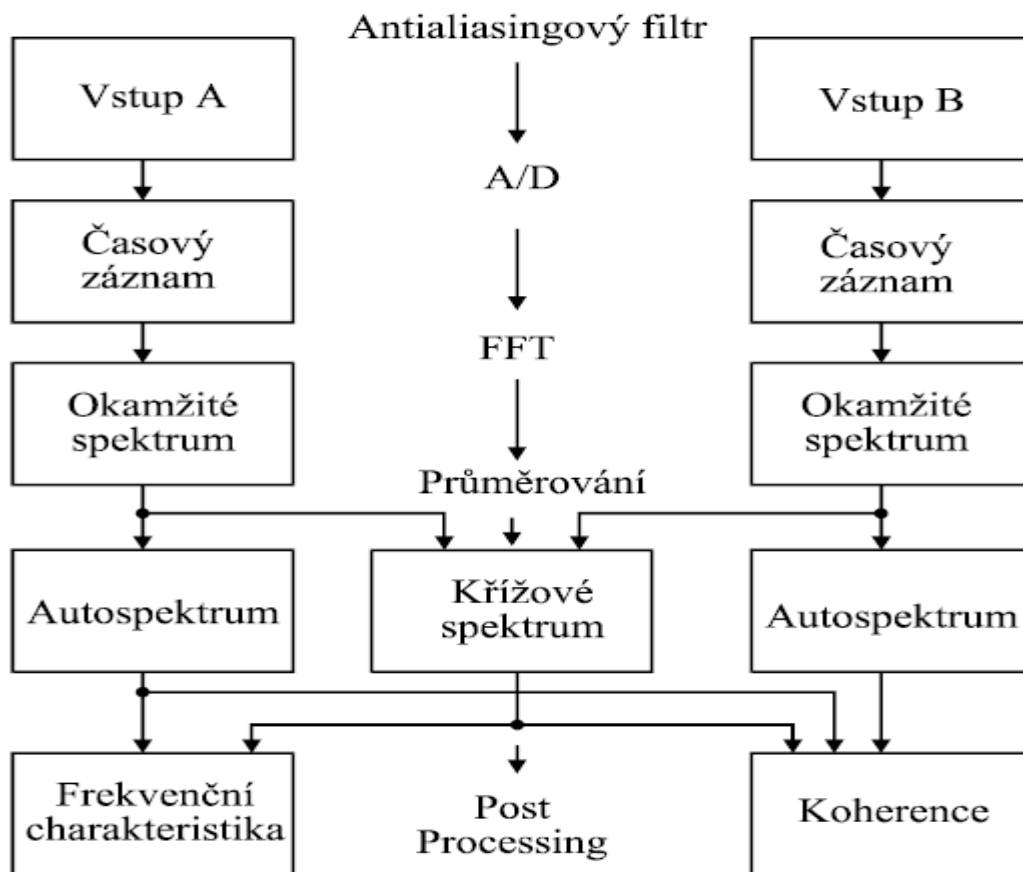
Když je $\gamma_{xy}^2(f) = 0$, potom vstup a výstup systému nejsou na daném kmitočtu na sobě závislé, když je $\gamma_{xy}^2(f) = 1$ jsou na daném kmitočtu na sobě závislé a jedná se o ideální LTI systém. Když je hodnota menší než jedna, tak je to způsobeno jednou z následujících skutečností:

- Při měření byl přítomen šum
- Spektrální odhady mají velkou systematickou chybu
- Systém není lineární
- Výstup systému není pouze odezvou na vstup systému

V této kapitole jsem čerpal z [8].

3.3 Algoritmus výpočtu frekvenční charakteristiky a koherence

Výpočet frekvenční charakteristiky a koherence se provádí speciálními programy, např. MATLAB, nebo vícekanálový FFT analyzátor. Nejmenší počet kanálů je 2 a nejvyšší není omezen. Algoritmus výpočtu je u všech analyzátorů stejný a je ukázaný na obrázku 17. Vstupní signál dynamické soustavy je označen A a výstup je označen B. Tyto signály tvoří vstupy dvoukanálového FFT analyzátoru. Oba analogové signály prochází antialiasingovým filtrem, poté A/D převodem, FFT, průměrování a výpočet frekvenční charakteristiky s koherenční funkcí. Pomocí inverzní FFT je možné z frekvenční charakteristiky určit impulsní odezvu. Předností FFT analyzátorů je, že snímají oba vstupní signály v naprosto stejný časový okamžik, díky tomu nevzniká žádné zpoždění mezi vstupy ani při nejvyšším frekvenčním rozsahu.



Obrázek 17 – Blokový diagram dvoukanalového FFT analyzátoru [1]

V této kapitole jsem čerpal z [1].

4 LabVIEW

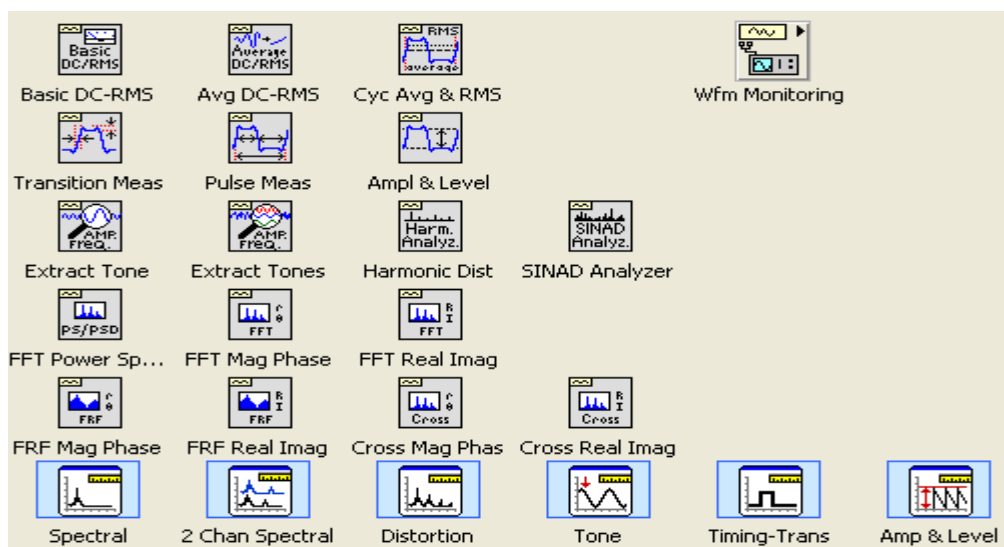
4.1 Co je to LabVIEW?

Programovací a vývojové prostředí LabVIEW je produktem americké firmy National Instruments, která je největším výrobcem v oblasti virtuální instrumentace, technické disciplíny, která zažívá veliký rozvoj v oblasti vývoje, výzkumu, školství a průmyslu. Prostedí LabVIEW, které je někdy nazýváno jako „grafický jazyk“, je vhodné k programování systémů pro měření a analýzu signálů, řízení a vizualizaci technologických procesů a také k programování složitých systémů. Hlavním cílem je nahradit dočasně nebo i trvale prostorově, finančně a mnohdy i časově náročné využití technických prostředků řešením virtuálním za přispění programových prostředků a zejména pak grafickými a vizuálními prostředky a zprostředkovat tak uživateli maximální názornost. Výsledný produkt LabVIEW se nazývá **virtuální přístroj** (Virtual Instrument – VI), protože svými projevy a činnostmi připomíná klasický přístroj ve své fyzické podobě. Může prezentovat buď skutečný měřicí přístroj, prvek měřicího nebo řídicího systému případně celý měřicí (řídicí) systém. Vytváření nového VI probíhá ve dvou oknech, v okně **čelního panelu** (standardně šedé) a v okně **blokového diagramu** (standardně bílé). Každé okno má klasické ovládací prvky dané prostředím Windows, roletové menu, nástrojovou lištu a místo pro ikonu a konektor. Vývoj VI začíná programátor většinou návrhem čelního panelu, po jeho ukončení pak pokračuje v okně blokového diagramu.

Čerpáno z [10] a [11].

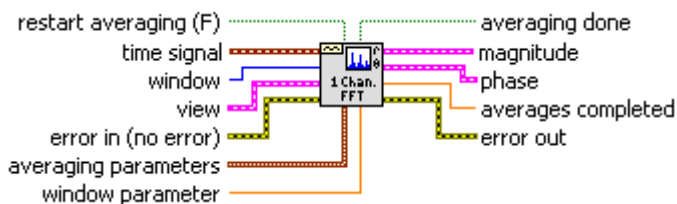
4.2 Zpracování FFT a PSD v LabVIEW

Prvky pro zpracování najdeme v blokovém diagramu – *Signal Processing – Wfm Measure*, kde má uživatel možnost si vybrat prvek, který přesně potřebuje. Na obrázku 18 jsou vidět všechny prvky, které *Wfm Measure* obsahuje.



Obrázek 18 – Nabídka FFT a PSD v prostředí LabVIEW

Nejjednodušším způsobem, jak v prostředí LabVIEW vyjádřit výkonovou spektrální hustotu, je si vzít prvek *Spectral*, který pracuje s jedním vstupním signálem a je to prvek, ke kterému stačí přivést pouze vstupní signál, a poté si vybrat, co chceme vyjádřit. *Spectral* nabízí, že na výstupu dostaneme amplitudu nebo výkonové spektrum nebo spektrální výkonovou hustotu. *Spectral* měří spektrum a zobrazí výsledky v oblasti výkonové spektrální hustoty. Častěji se používají prvky ze 4. řádku nabídky, kde je možné si nastavit parametry. Nejprve si přiblížíme, jak vypadá prvek pro zpracování FFT.

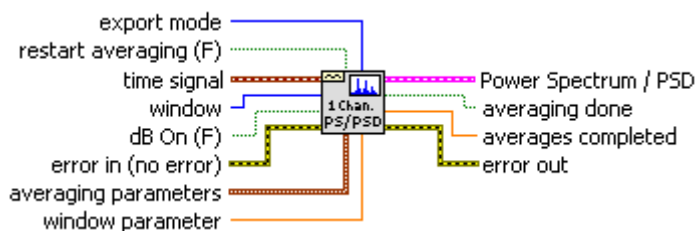


Obrázek 19 – Vstupy a výstupy FFT v LabView

Z obrázku 19 je vidět, že prvek pro zjištění amplitudy a fáze FFT má hodně vstupů a výstupů. Nejdůležitější si trochu přiblížíme. Na vstup *time signál* přivádíme signál, u kterého chceme provést FFT. Pomocí *Windows* ovlivňujeme vstupní signál. V nabídce máme možnost si vybrat z mnoha oken – Hanningovo, Hammingovo, trojúhelníkové atd. Jako základní okno je nastaveno Hanningovo okno. Ve *view* definujeme, jaké se nám budou vracet výsledky. U *view* nastavujeme tři parametry:

- **dB On** – určuje, zda budou výsledky v decibelech. Výchozí hodnota je FALSE.
- **unwrap phase** – určuje, zda se bude rozbalovat fáze. Rozbalení eliminuje nespojitosti, které mají absolutní hodnotu větší jak π . Výchozí hodnota je FALSE
- **convert to degree** – určuje, zda výsledky fáze budou převedeny z radiánů na stupně. Výchozí hodnota je FALSE, což znamená, že se výsledky nepřevádí na stupně.

Error in a *error out* nám dávají informace o chybách, které vstupují do obvodu, a které vystupují z obvodu. *Magnituda* a *phase* jsou výstupy, na kterých máme hodnotu amplitudy a fáze FFT, s kterými můžeme dále pracovat, a nebo si je zobrazit v grafu. Nyní se podíváme na prvek, kterým můžeme zjistit výkonovou spektrální hustotu.



Obrázek 20 – Vstupy a výstupy prvku PSD

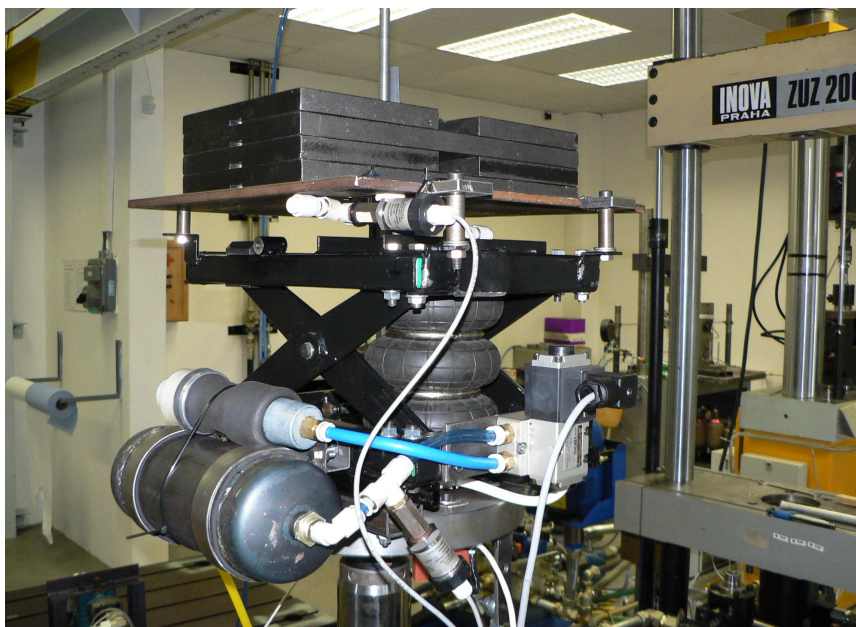
Time signal a *window* jsou stejné jako u FFT a značí připojení vstupního signálu a výběr okna. První rozdíl oproti FFT máme u vstupu *dB On*, který se zadával u FFT pod vstupem *view*, ale u PSD si zadáváme samostatně, jestli chceme výsledek v decibelech. Výchozí hodnota je i zde FALSE. *Error in* a *error out* nám opět dávají informace o chybách. Prvek PSD, který mám nyní vybrán, může zobrazovat i výkonové spektrum, a tak si pomocí *export mode* musíme vybrat, jestli na výstupu chceme výkonové spektrum nebo výkonovou spektrální hustotu. Když na *export mode* přivedeme 0, tak jsme si vybrali výkonové spektrum a to budeme mít na výstupu. V našem případě, když chceme na výstupu výkonovou spektrální hustotu, tak na vstup *export mode* dáme 1. Výstup *Power Spectrum/PSD* vrací výkonové spektrum nebo výkonovou spektrální hustotu. U tohoto výstupu se nám také vrací počáteční kmitočet, frekvenční rozklad a amplituda.

5 Aplikace v LabVIEW

5.1 Postup měření dat

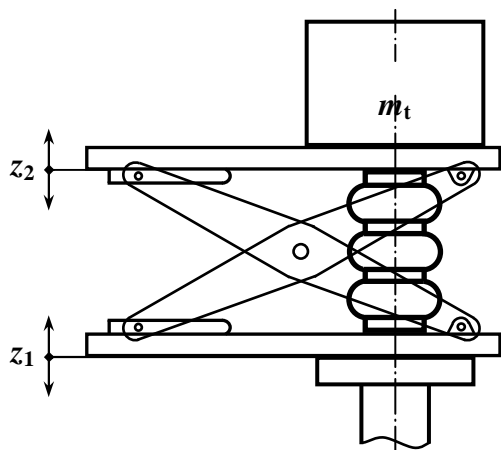
Za účelem vibroizolačních vlastností systému odpružení sedadel řidiče byly v rámci výzkumného záměru Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci a částečně výzkumného záměru Dopravní fakulty Jana Pernera v Pardubicích, v Hydrodynamické laboratoři zkonstruovány modely sedadla řidiče se sníženými pasivními odpory. V průběhu řešení těchto záměrů se pořídila data.

Po dohodě se zástupci firmy C.I.E.B. Kahovec byl zkonstruován nový model pružícího podstavce sedadla řidiče (obrázek 21), který vychází z prototypu sedadla určeného pro vozidlo KAMAZ. Jako vodící mechanismus je v tomto případě použit mechanismus nůžkový.



Obrázek 21 – Model pružícího podstavce sedadla s nůžkovým mechanismem s vlnovcovou pneumatickou pružinou [12]

Principiální schéma tohoto modelu je uvedeno na obrázku 22. Akčním členem je zde třívlňová rotačně symetrická vlnovcová pneumatická pružina Rubena PE 130/3. Efektivní plocha pružiny je dle katalogu 77 cm^2 . Model sedadla s touto vzduchovou pružinou má vlastní frekvenci 2,35 Hz.



Obrázek 22 – Schéma modelu pružícího podstavce sedadla s nůžkovým mechanismem s vlnovcovou pneumatickou pružinou [12]

Pro zjištění přenosových vlastností je výhodné systém budít frekvenčně rozmítaným harmonickým signálem. Sinový budící signál s lineárně se měnící frekvencí v intervalu $f \in \langle 0, f_{\max} \rangle$ v čase $t \in \langle 0, t_{\max} \rangle$, tzv. CHIRP signál, je popsán

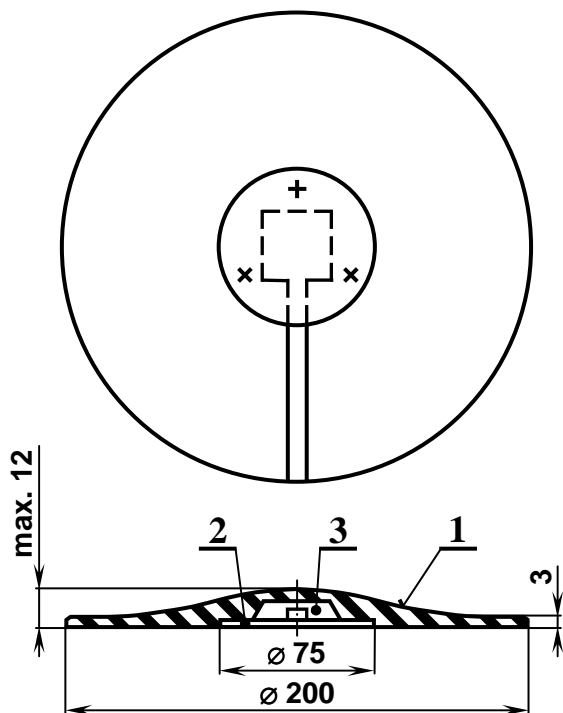
$$z_1(t) = A_{z_1} \sin(q t^2), \quad (5-1)$$

kde A_{z_1} je požadovaná amplituda signálu a

$$q = \frac{\pi f_{\max}}{t_{\max}}.$$

Určující veličinou pro vyjádření velikosti vibrací je dle normy ISO 2631 zrychlení. Vibrace se měří podle soustavy souřadnic s počátkem v bodě, kterým vibrace vstupují do lidského těla. Pro snímání vibrací je vhodné použít polopružný disk o průměru 200 mm s pevným jádrem o průměru 75 mm a tloušťkou od 3 do 12 mm, případně shodný disk o shodném vnějším průměru a tloušťkou do 6 mm. Ve středu tohoto disku je připevněn tříosý snímač efektivní hodnoty (RMS) zrychlení (akcelerometr) s rozsahem 0,1 až 10 m/s², přičemž přípustná maximální hodnota zrychlení bývá až 100 m/s². Měřicí disk musí být umístěn ve středu sedadla a je doporučeno jej připevnit k sedadlu páskou. Schéma disku je na obrázku 23.

Pro základní hodnocení účinků vibroizolace navrženého aktivního vibroizolačního systému byly použity testovací signály. Testovacím signálem byl signál CHIRP, a pak také další signály, které byly získané při jízdě nákladního automobilu na speciálních vozovkách polygonu v TATŘE Kopřivnice.



Obrázek 23 – Polopružný disk pro měření zrychlení na sedadle: 1 – disk, 2 – kovová deska pro upevnění snímače, 3 – dutina pro snímač [12]

V této kapitole jsem čerpal z [12].

5.2 Blokový diagram a čelní panel aplikace

V blokovém schématu jsou načteny data pomocí *Open File*, kde je přímo nastavena cesta k naměřeným datům. Při používání v praxi, se pouze změní cesta a jméno souboru a uživatel si bude moci zobrazit svoje naměřená data v této aplikaci. Výstup, vstup a filtry jsou řešeny pomocí přepínačů ovládaných logickým signálem pomocí tlačítka. Bloky zobrazující filtry, jsou propojeny pomocí *error signálu*. Na čelním panelu díky tomu můžeme volit vstup buď zrychlení (vstup a_1 a výstup a_2) nebo výchylku (vstup z_1 a výstup z_2). Vstup a výstup musí být stejně nastaven, buď zrychlení nebo výchylka. U filtrů si uživatel vybere, zda chce používat filtry nebo chce mít výstupní data zobrazena bez filtrace. Když bude chtít uživatel využít filtry, tak si vybírá z filtru1, který je použit na PSD vstupního signálu, FFT rozsah vstupního signálu a na FFT fázi u výstupu zrychlení a_2 a filtru2, který je použitý na PSD výstupního signálu a FFT rozsah výstupního signálu. V případě, že chce použít oba, tak může, ale je možné použít i pouze jeden filtr. Při vybrání filtru je možnost si filtr podrobněji nastavit, což se dělá v pravém horním rohu. Je možnost si nastavit provedení, typ, počáteční a koncovou frekvenci, to si může zvolit různé u obou filtrů.

Přiblížíme si nejběžnější provedení filtrů:

- **Butterworth** – filtr, jehož propustné i nepropustné pásmo je maximálně ploché a má malou strmost přechodu do nepropustného pásma
- **Elliptic** – přesný opak Butterworthova filtru, propustné i nepropustné pásmo, má zvlnění a má ostrý přechod do nepropustného pásma
- **Chebyshev** – máme dva typy, Chebyshev prvního a druhého typu. Chebyshev prvního typu má zvlnění v propustném pásmu a strmější přechod do nepropustného pásma než u Butterworthova filtru. Nepropustné pásmo je bez zvlnění. Chebyshev druhého typu nemá zvlněné propustné pásmo, ale má zvlnění pásma nepropustné. Přechod je opět větší než u Butterworthova filtru.

U typu je možné si vybrat z následujících:

- **Dolní propust (Lowpass)** – označení pro filtr, který propouští nižší kmitočty a vyšší zadrží
- **Horní propust (Highpass)** – u horní propusti je to právě naopak než u dolní propusti, horní propust zadržuje nižší kmitočty a vyšší propustí
- **Pásmová propust (Bandpass)** – je filtr, který propouští pásmo určené mezními frekvencemi
- **Pásmová zádrž (Bandstop)** – opakem pásmové propusti je pásmová zádrž, zádrž nepropouští signál určitý mezními frekvencemi

Po těchto úpravách se data dostávají na bloky pro FFT a PSD, tyto bloky jsou propojeny s *error signálem*. U FFT je nastaveno, že výsledek nebude v decibelech, že se rozbálí fáze a výsledné hodnoty nebudou převedeny z radiánů na stupně. U PSD není nastaveno, jestli se bude převádět na decibely, a tak zůstává přednastavená hodnota FALSE. Výsledky z těchto bloků jsou již zobrazovány na grafických zobrazovačích. Vypočítávány jsou PSD vstupního i výstupního signálu, rozsah FFT a FFT fáze u výstupu zrychlení a_2 nebo u výstupu výchylky z_2 . Vypočítán je i přenos, který se zjistí jako odmocnina z PSD výstupu ku PSD vstupu. Na čelním panelu se zobrazuje i časová oblast vstupního a výstupního signálu. Na čelním panelu uživatel může dále nastavit, jakou chce frekvenci. Přednastavená frekvence je přednastavena na 1000 Hz. Dále jaký druh váhovací funkce bude používat, v nabídce je kolem 20 typů oken a jako přednastavené okno je Hanningovo okno.

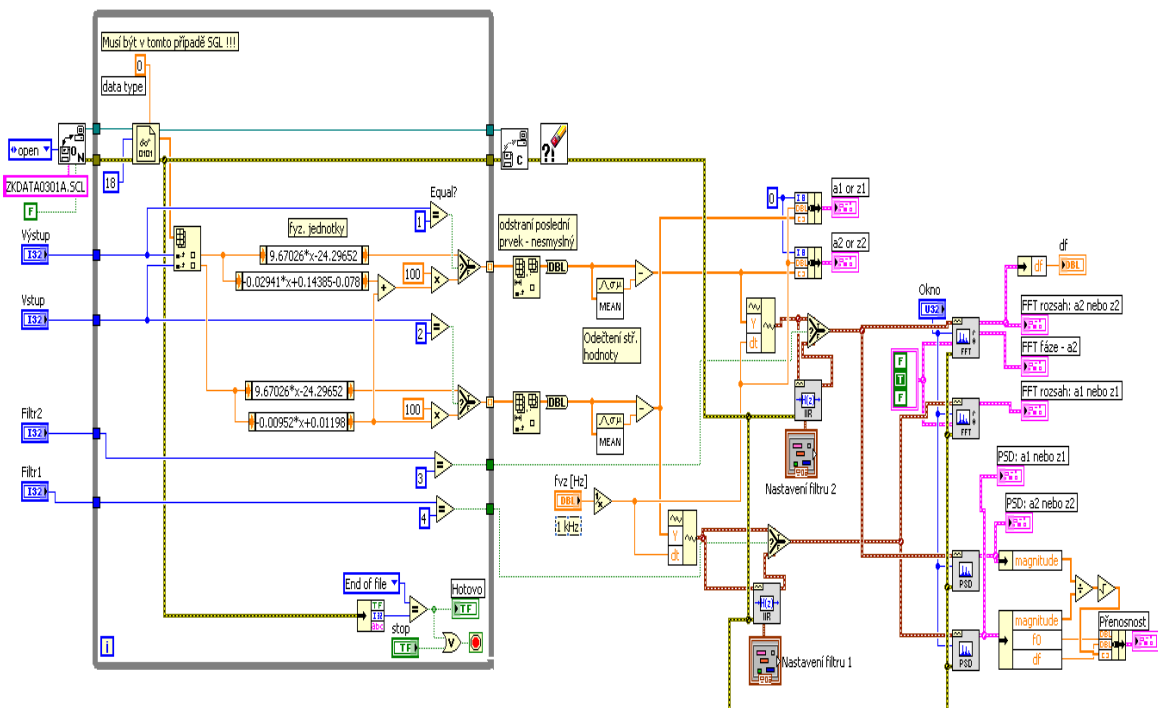
Několik váhovacích funkcí si trochu přiblížíme:

- **Hanningovo okno** – velmi často používaná okenní funkce s dobrým kompromisem mezi ostrotí spektra a potlačením falešných frekvencí. Má úzký hlavní lalok a malé postranní laloky

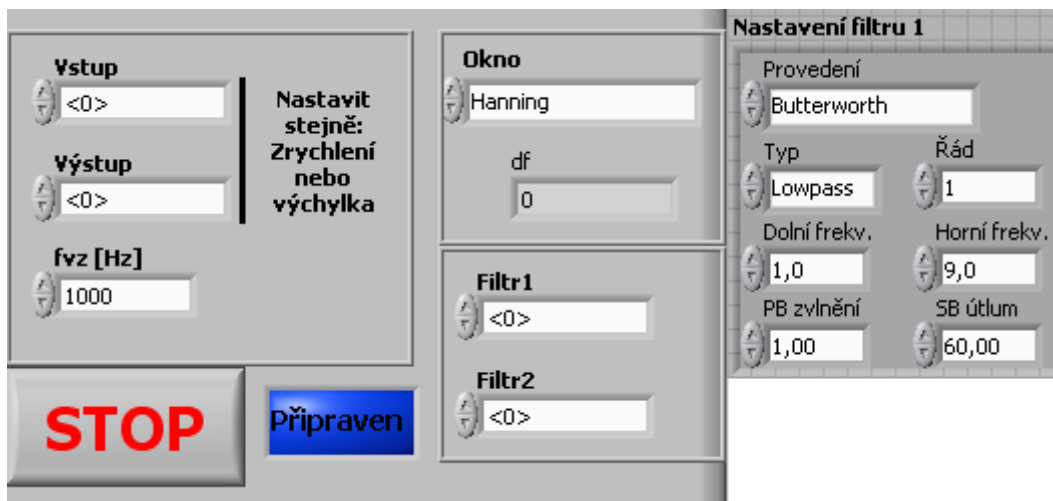
- **Obdélníkové okno** – vyjadřuje okenní funkci, která nemění hodnoty v segmentu signálu
- **Hammingovo okno** – je modifikací Hanningova okna. Má podobné vlastnosti. Používá se v krátkodobé analýze při použití techniky sčítání přesahů s 50% přesahem, kde vykazuje nejnižší zvlnění signálu po rekonstrukci.
- **Blackman – Harrisovo okno** – má širší hlavní lalok a vyšší potlačení falešných frekvencí. Jeho spektrum je však méně ostré. Používá se v krátkodobé analýze při použití techniky sčítání přesahů s přesahem 75%.

Čerpáno z [9].

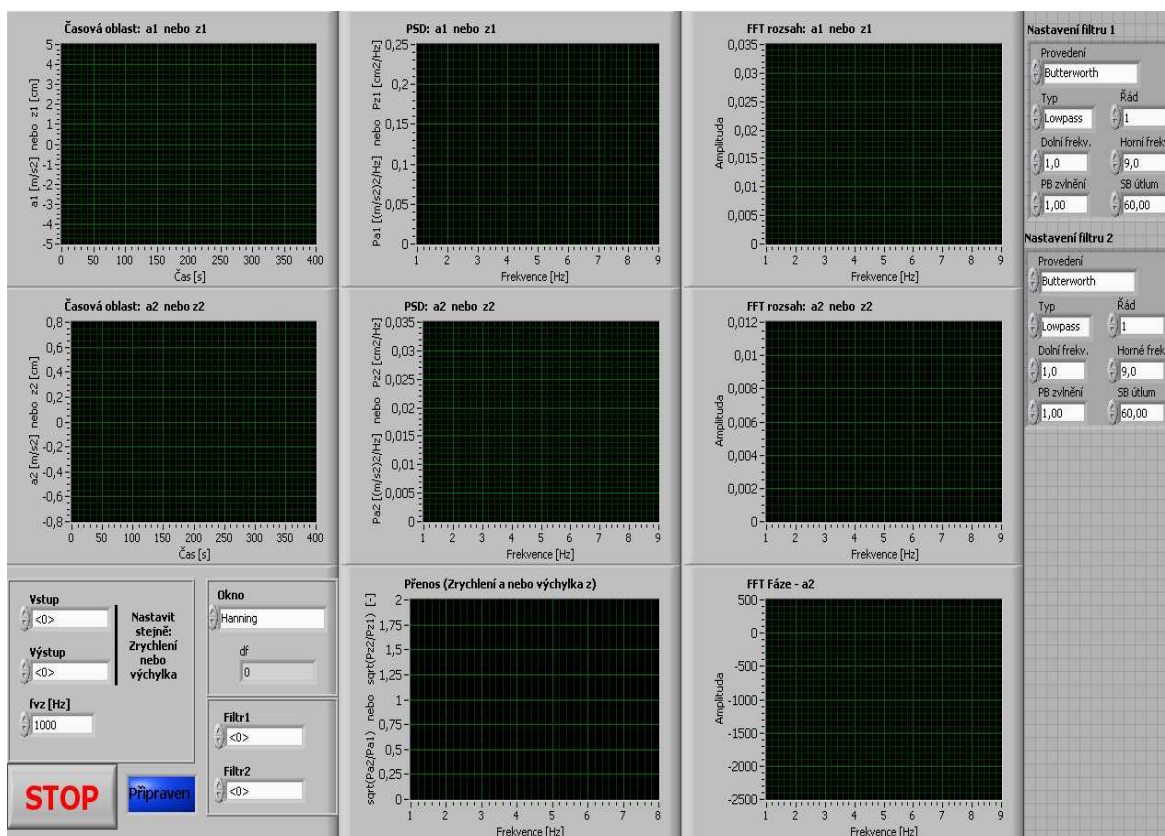
Pro lepší přehled, kdy je zobrazení dat hotovo, je na čelním panelu kolonka Připravit, která se při dokončení běhu programu změní na HOTOVO. Kdybychom chtěli běh aplikace v průběhu zastavit, stačí na čelním panelu stisknout tlačítko STOP. Kompletní blokové schéma je vidět na obrázku 24. Na obrázku 25 máme zobrazeny pohromadě všechny věci, které můžeme před spuštěním aplikace nastavit. Kompletní vzhled čelního panelu je zobrazen na obrázku 26.



Obrázek 24 – Kompletní blokový diagram



Obrázek 25 – Nastavovací část čelního panelu



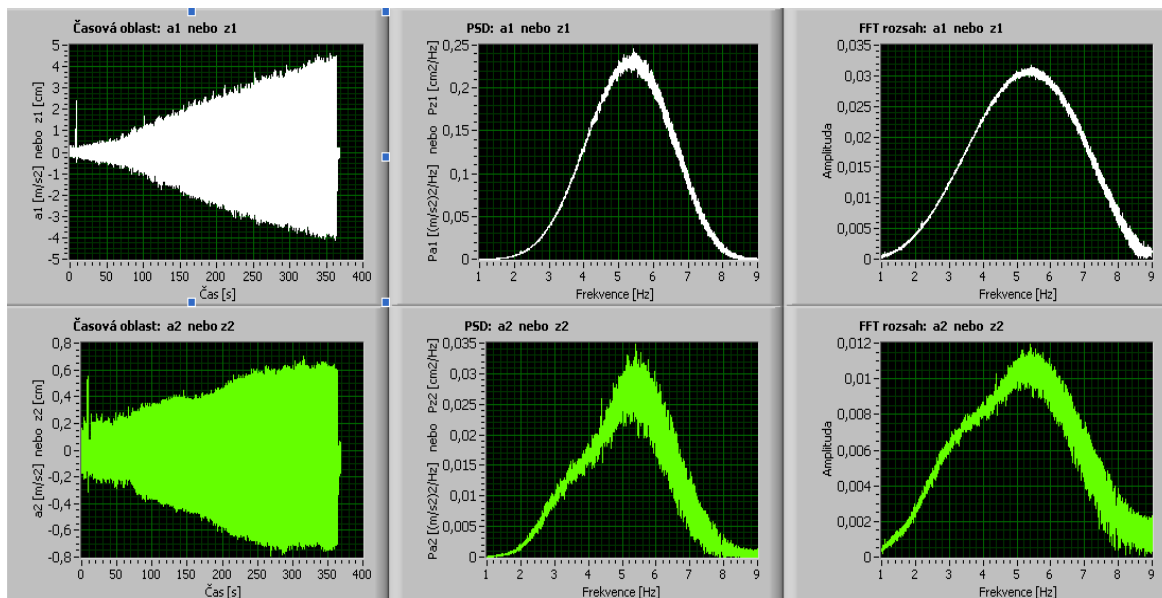
Obrázek 26 – Celkový vzhled čelního panelu

5.3 Výsledky

V této části si ukážeme výsledky, které vychází v této aplikaci, při různě nastavených hodnotách nejprve pro zrychlení a poté pro výchylku.

5.3.1 Výsledky pro zrychlení

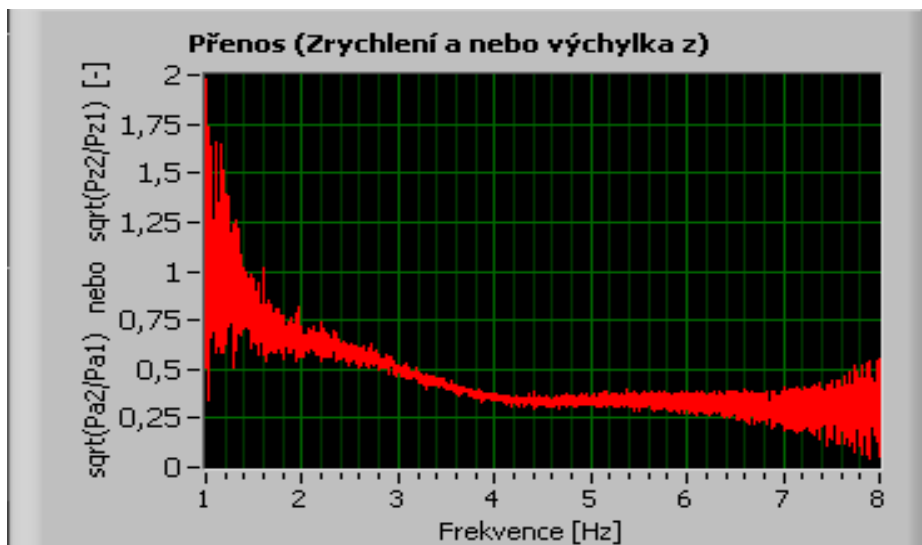
Nejprve bude vstup a výstup nastaven společně na zrychlení, bez filtrů, frekvence zůstane na přednastavené hodnotě 1000Hz. Okno bude Hanningovo. Ve výsledcích si ukážeme, jak vypadají grafy v časové oblasti, PSD a FFT rozsah pro vstupní a výstupní hodnoty.



Obrázek 27 – Průběhy pro zrychlení s vypnutými filtry

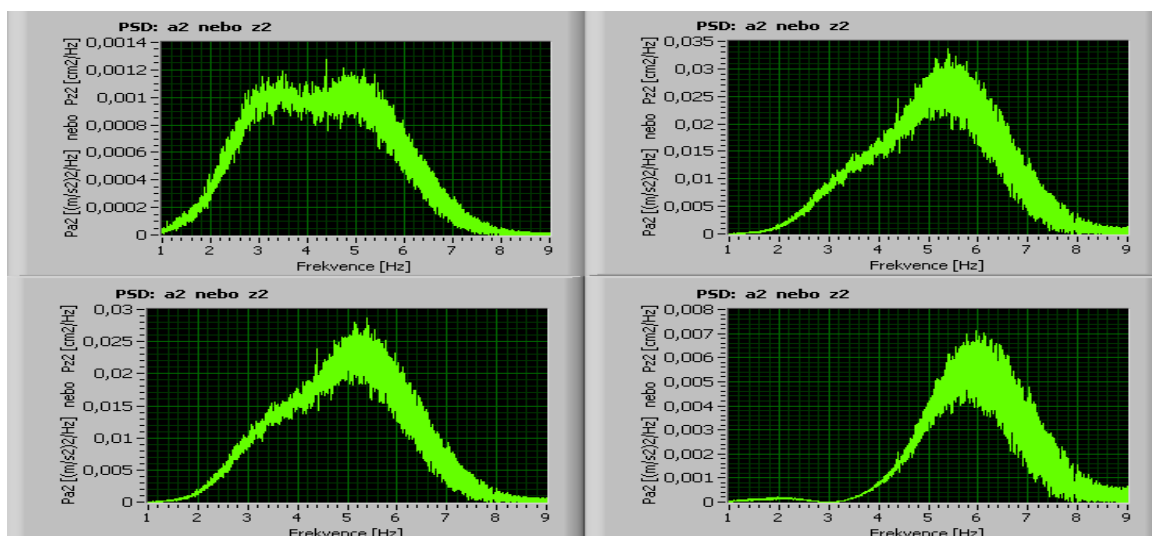
Na obrázku 27 vidíme zobrazen průběh $a_1(t)$, což je zrychlení základny a časová oblast $a_2(t)$ zobrazuje zrychlení sedáku. Dalšími průběhy jsou PSD a FFT zrychlení. Oba průběhy připomínají obrácenou parabolu. V průběhu PSD je vidět rychlý nárůst hodnot od 2 Hz až do 5,5 Hz, kde je maximální hodnota PSD a je to zhruba $0,23 \frac{(m/s^2)^2}{Hz}$. PSD zrychlení sedáku je také přibližně parabola, ale hodně zkreslená. Jak můžeme vidět, tak hodnoty u PSD sedáku jsou zhruba 10x menší a maximální hodnota je kolem $0,27 \frac{(m/s^2)^2}{Hz}$. FFT pro a_1 má svůj vrchol v 5,5 Hz a nabývá hodnoty 0,03. FFT pro a_2 je opět trochu podobný FFT pro a_1 a hlavně druhá polovina průběhu FFT pro hodnoty od 5,5 až do 9 Hz je hodně zkreslená. Maximální hodnota je přibližně 0,01.

K tomuto nastavení si necháme ještě zobrazit přenos. Jak vidíme na obrázku 28, tak přenos je na 1 Hz zkreslený a klesá až ke 4 Hz, kde průběh přestane klesat a trochu začne růst. Pozvolný růst skončí zhruba na 5,5 Hz a poté nastává opět pokles. Od 6 Hz je přenos opět hodně zkreslen.



Obrázek 28 – Přenos zrychlení s vypnutými filtry

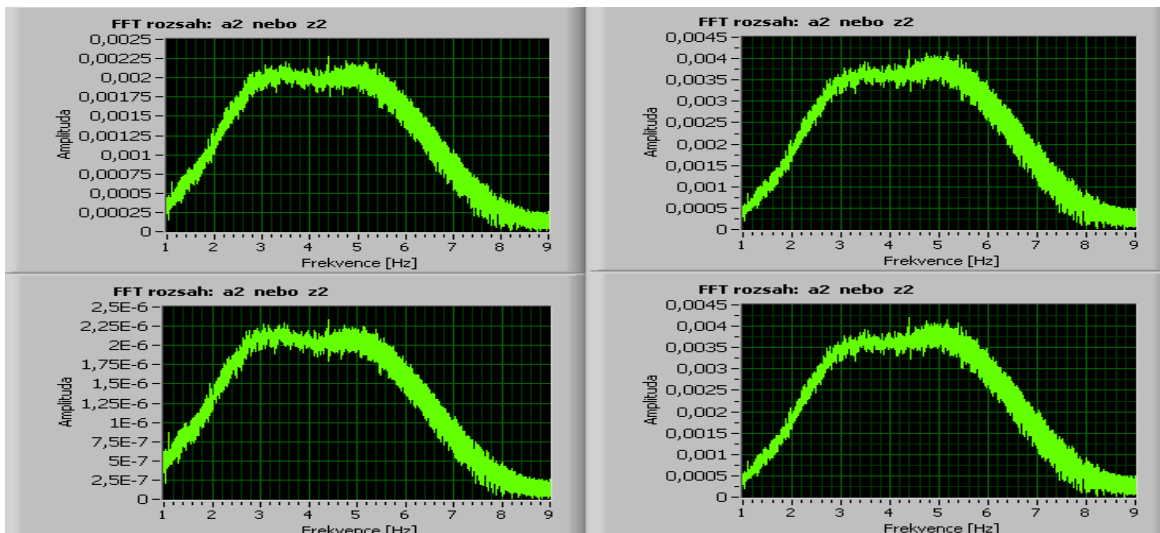
Na obrázku 29 si ukážeme, jak bude vypadat průběh zrychlení $a_2(t)$ pro PSD, když budou použity všechny 4 typy filtru (dolní propust, horní propust, pásmová propust, pásmová zádrž). Všechny typy byly nastaveny pro filtr Butterworthův.



Obrázek 29 – PSD a_2 pro všechny typy filtru

Na obrázku 30 jsou ukázány všechny 4 základní provedení filtrů (Butterworthův, Chebyshev 1 a 2 typu a Eliptický), při vybraném typu dolní propust a zobrazen bude FFT rozsah pro a_2 . Rozdíl, který je patrný na první pohled, je ve velikosti amplitudy. Největší hodnoty nabývá filtr Eliptický a Chebyshev 1 typu, kde se hodnota amplitudy pohybuje okolo 0,0035. Naopak jasně nejmenší hodnoty nabývá amplituda u Chebysheva 2 typu, kde se maximální hodnota pohybuje okolo 2μ . Průběhy pro filtr Chebyshev 1 typu a Eliptický vychází úplně stejně. Stejný průběh mají i Butterworthův filtr a Chebyshev 2 typu, jen se liší ve velikosti amplitudy. Průběh u Chebysheva 1 typu stále roste až do frekvence 5 Hz a

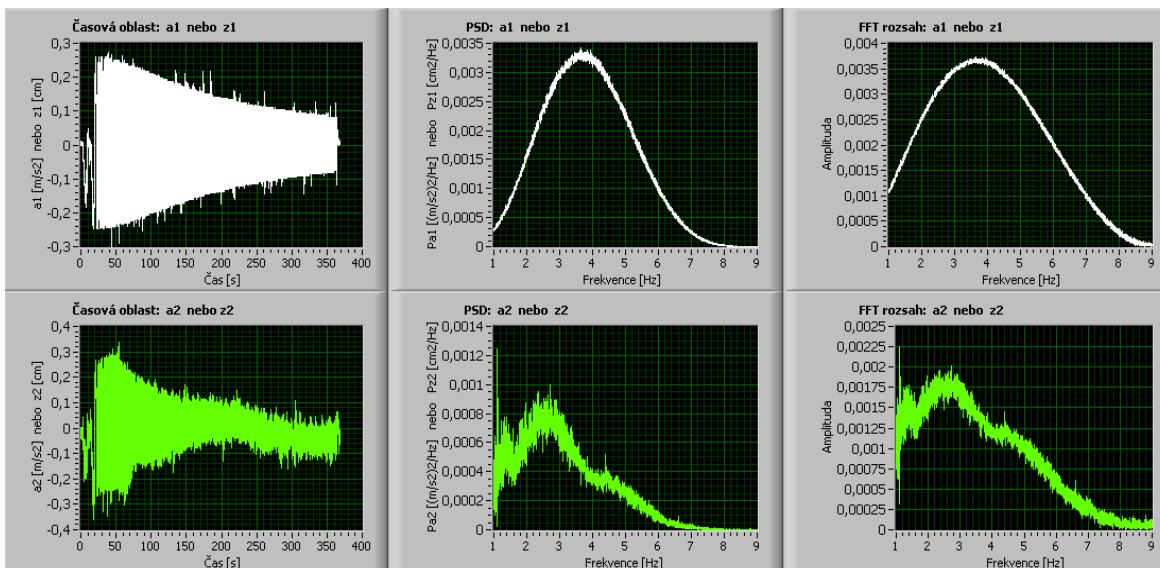
od této hodnoty již hodnota amplitudy jenom klesá. U Chebysheva 2 typu hodnota amplitudy roste do hodnoty frekvence 3,5 Hz. Poté je malý pokles hodnoty, zde nastává rozdíl oproti Chebyshevu 1 typu a Eliptickému filtru. Amplituda po menším poklesu opět začne mírně stoupat, ale od frekvence 5 Hz amplituda již jenom klesá.



Obrázek 30 – FFT rozsah pro základní provedení filtru

5.3.2 Výsledky pro výchylku

Při nastavení vstupu a výstupu na výchylku, bez filtrů a okno Hanningovo vychází tyto průběhy.

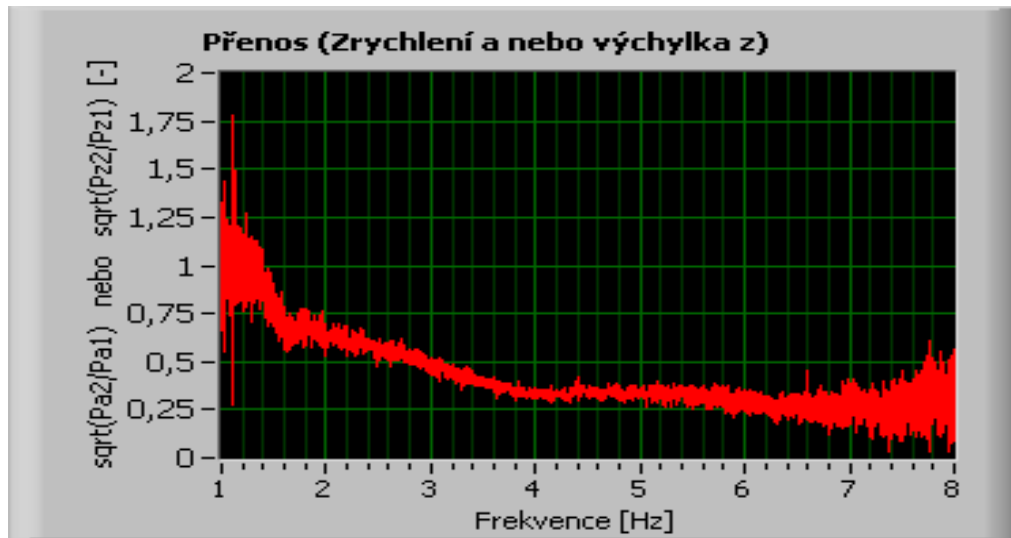


Obrázek 31 – Průběhy pro výchylku s vypnutými filtry

V časové oblasti má výchylka $z_1(t)$ stejný průběh jak pod osou x, tak nad osou x. $Z_2(t)$ je vypočítán jako z_1 (základna) + z_{2r} (střední poloha sedáku) a jeho průběh v časové oblasti

je podobný průběhu z_1 . Průběhy PSD a FFT pro z_1 jsou skoro stejné jako průběhy pro PSD a FFT u a_1 . U PSD je maximální hodnota přibližně $0,0033 \frac{cm^2}{Hz}$ a u FFT 0,0038.

Další, co nás u výchyly zajímá, je průběh přenosu, který je zobrazen na obrázku 32. Když se podíváme na přenos výchyly a zrychlení, tak je vidět, že si jsou oba průběhy hodně podobné a liší se jen v několika detailech, které budou lépe vidět při zobrazení v Matlabu, které bude níže.



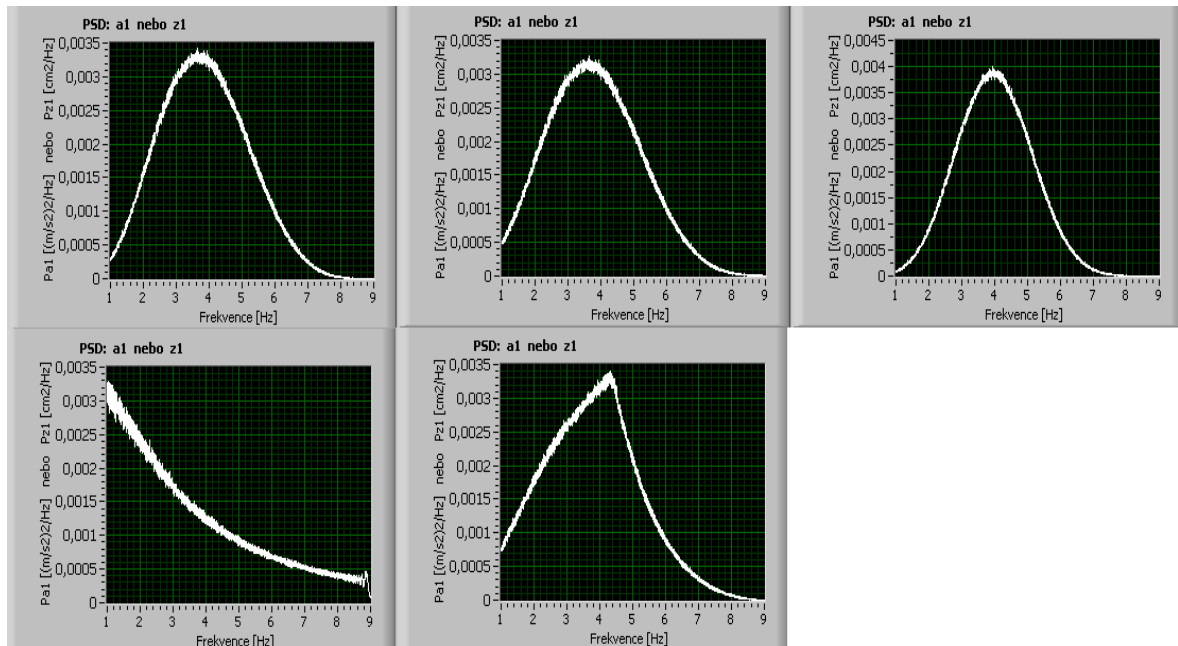
Obrázek 32 – Přenos výchyly s vypnutými filtry

Přenos výchyly na obrázku 32 je rozkmitán v rozmezí frekvencí 1-2 Hz a 7-8 Hz, a tak se podíváme, jestli nejde získat lepší průběh přenosu. Nejlepší průběh vychází, když okno (okenní funkci) je nastaveno na možnost Rectangle (obdélníkové okno), které nemá v průběhu přenosu takový rozkmit hodnot a díky tomu je lépe vidět, jaký má přenos průběh. Takový průběh byl získán při nastavení filtru na Butterworthův a typ filtru byl vybrán dolní propust a na filtru 1 se nastavila frekvence 2 a 9 Hz.



Obrázek 33 – Přenos výchyly pro obdélníkové okno

Nyní se podíváme, jak se liší průběh výchylky z_1 pro PSD, když budeme měnit okno (váhovací funkci). Okno si nastavíme na Hanningovo, Hammingovo, Blackman – Harris, Rectangle (obdélníkové okno) a Triangle (trojúhelníkové okno). Jak vidíme na obrázku 34, průběh se při nastavení okna Hanningova, Hammingova a Blackman – Harris nemění, pouze se mění maximální hodnota, která je dosažena. Všechny tyto průběhy připomínají parabolu, která není u všech oken zobrazena celá, neboť se nevešla do vybrané frekvenční oblasti. Pro Hanningovo okno je hodnota $0,0033 \frac{cm^2}{Hz}$, pro Hammingovo vychází PSD $0,0031 \frac{cm^2}{Hz}$ a pro Blackman – Harris vychází PSD nejvyšší $0,0039 \frac{cm^2}{Hz}$. U průběhu obdélníkového okna se ve frekvenční oblasti, kterou máme zvolenou, zobrazuje část průběhu, který připomíná exponenciálu. Hodnota PSD pro obdélníkové okno je $0,0032 \frac{cm^2}{Hz}$. U trojúhelníkového okna průběh přibližně do 4,5 Hz narůstá. Ve 4,5 Hz dosáhne svého vrcholu, který je $0,0033 \frac{cm^2}{Hz}$ a průběh začne podle exponenciály klesat až k 0. Ve vrcholu průběhu je na obrázku krásně vidět, jak se vytvořila špička, která charakterizuje obdélníkové okno.



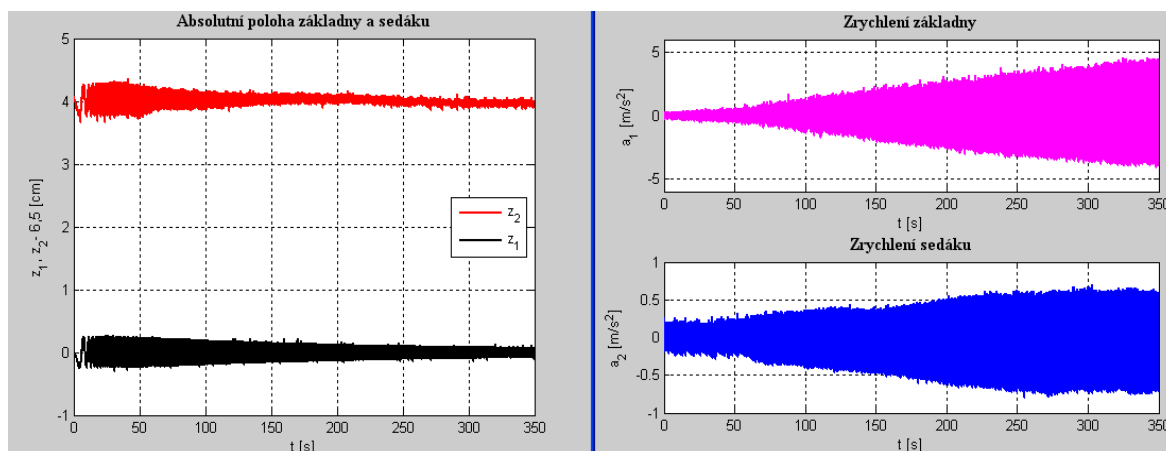
Obrázek 34 – Průběhy výchylky při různých okenních funkcích

6 Matlab

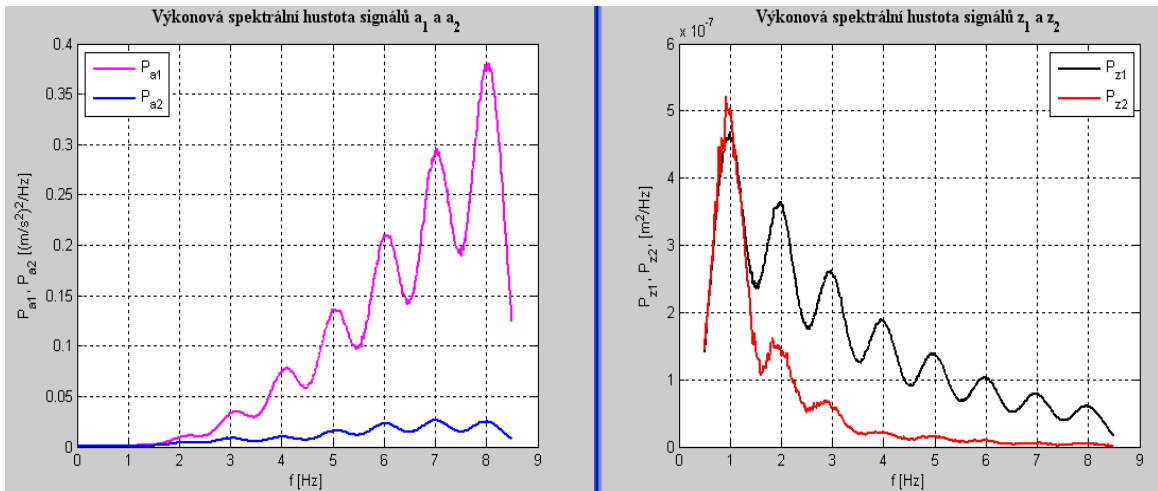
6.1 Program v Matlabu

Data použitá v programu jsou stejná jako u aplikace v LabVIEW. V Matlabu jsou načtena pomocí příkazu *load* + jméno souboru, kde jsou data umístěna. V programu se musí zvolit i frekvence a ta je dána také na 1000Hz. Každá veličina byla při měření ukládána a měla pro Matlab přiděleno číslo, těmi nejdůležitějšími čísly byly 2, 3, 6, 7, pod kterými byly uloženy zrychlení a výchylky. Z těchto hodnot jsou pak v programu dopočítávány polohy základny, sedáku a zrychlení základny a sedáku. Nyní je možné zobrazit absolutní polohu základny a sedáku. Obě hodnoty mohou být zobrazeny do jednoho grafu, neboť při dopočítávání byla poloha sedáku posunuta o 4cm výše. Jako další je zobrazeno zrychlení základny a zrychlení sedáku. Před dalšími příkazy pro zobrazení průběhu do grafů je vypočítávána výkonová spektrální hustota. V Matlabu se výkonová spektrální hustota počítá pomocí příkazu *pwelch(x)*. Jak z názvu vyplývá, výpočet je zjišťován pomocí Welchovy metody, která je rozebrána v kapitole 2.1. Po výpočtu výkonové spektrální hustoty si ji zobrazíme v grafu pro zrychlení i pro výchylku pro základnu a sedák. Poslední věcí, která se musí dopočítat, je přenos zrychlení a přenos výchylky. Obě tyto veličiny jsou počítány stejně jako v LabVIEW. Je to odmocnina z výkonové spektrální hustoty výstupu ku výkonové spektrální hustotě vstupu. Celý program je dostupný na přiloženém CD.

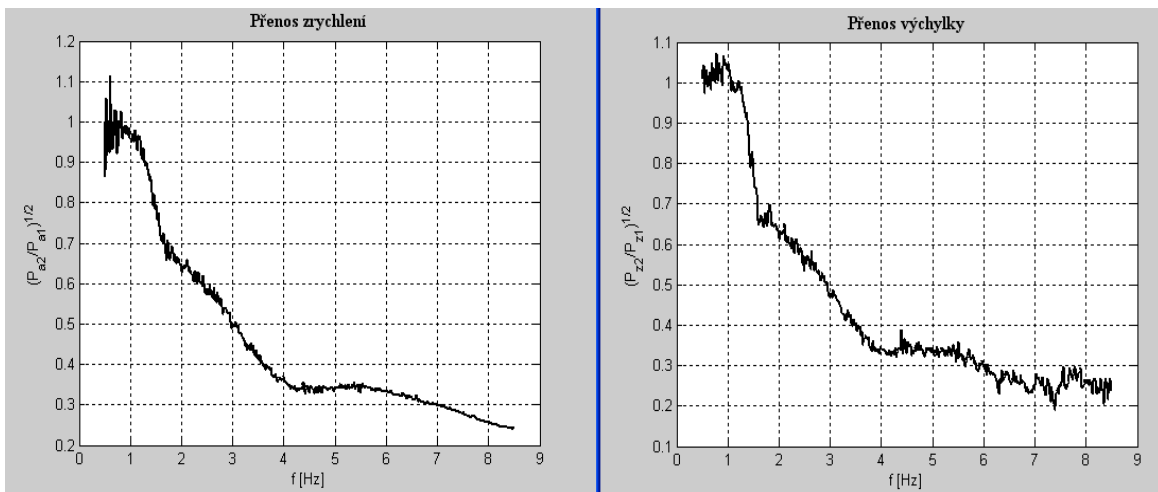
6.2 Grafy



Obrázek 35 – Poloha základny, sedáku a průběh zrychlení



Obrázek 36 – Průběhy PSD pro zrychlení a výchylky



Obrázek 37 – Přenos zrychlení a výchylky

Závěr

Cílem práce bylo vytvořit aplikaci ve vývojovém prostředí LabVIEW, která bude sloužit ke zpracování a vyhodnocování dat s rychlým zobrazením FFT, PSD a dalších charakteristik. Za stejným účelem měl být vytvořen skript v Matlabu, podle něhož bychom mohli porovnat průběhy, které vychází v LabVIEW a ověřit jejich správnost, čehož je v práci dosaženo.

Aplikace vytvořená v prostředí LabVIEW graficky zobrazuje časovou oblast pro zrychlení nebo výchylku, přenos, FFT a PSD a uživatel si může vybrat, zda bude používat filtraci nebo chce výsledky bez ní, což bylo úkolem práce. V práci jsou použity pouze vstupní veličiny výchylka a zrychlení, neboť hlavně zrychlení a výchylka měly nejlepší průběhy pro zobrazování výsledků. Ve výsledcích jsou porovnávány průběhy při různě použitých okenních funkcích nebo různě nastavených parametrech na filtrech. Tato aplikace může usnadnit práci lidem, kteří mají naměřená data a potřebují si nechat zobrazit FFT, PSD nebo přenos, aplikace může být využita i ke studijním účelům. Aplikaci může uživatel ještě lépe zdokonalovat a obohacovat o další grafické zobrazení a funkce, například může nechávat zobrazit větší rozsah frekvencí než je použit v práci nebo rozšířit o další vstupní veličiny, které by byly zobrazovány na grafických zobrazovačích.

Skript v Matlabu zobrazuje v časové oblasti průběh a absolutní polohu zrychlení a výchylky, PSD a přenos. Stejně jako v LabVIEW i zde uživatel může naprogramovat nové věci, které by mu pomohly při řešení jeho problému, jako například nové charakteristiky, nové vstupní veličiny a nebo využití i jiných frekvencí pro tyto použité vstupní veličiny.

Jak je vidět na výsledcích, co vychází v aplikaci LabVIEW a těch, co byly získány ze skriptu v Matlabu, tak průběhy v časové oblasti, jsou u obou programů shodné. To průběh přenosu se mírně liší, což může být způsobeno použitým typem filtru, jinak postaveným algoritmem a vlivem softwaru, ale pro základní porovnání a ověřování průběhu to je pro uživatele dostačující. Nejblíže si jsou průběhy přenosu podobné při použití obdélníkového okna v prostředí LabVIEW, které odstraňuje rozkmit a průběh je hladší. Stejně jako přenos je odlišný i průběh PSD v aplikaci vytvořené v LabVIEW a průběh, co vychází ze skriptu z Matlabu, což je stejně jako v případě přenosu způsobeno použitým typem filtru, jinak postaveným algoritmem a vlivem softwaru.

Literatura

- [1] Tůma, J.: Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901936-1-7.
- [2] Čížek, V.: Diskrétní Fourierova transformace a její použití. Matematický seminář SNTL, Praha 1981.
- [3] Sovka, P. – Pollák, P.: Vybrané metody číslicového zpracování signálů, Vydavatelství ČVUT Praha, 2001.
- [4] Kupka, L.: Frekvenční charakteristiky. [Online] [Citace dne 30.3.2012] http://www.fm.tul.cz/~libor.kupka/Frekvencni_charakteristiky.pdf.
- [5] Máša, P.: Frekvenční charakteristiky. EO2 – Přednáška 11 [Online] [Citace dne 4.4.2012] <http://amber.feld.cvut.cz/vyu/eo2/files/lectures/P11.pdf>
- [6] Algebra blokových schém. Obrazový přenos . [Online] [Citace dne 7.4.2012] http://web.tuke.sk/sjf-kaar/stranky/Predmetove_str/TK/material/Teor.prik/1blok.pdf
- [7] Cvejn, J.: Řízení procesů, Univerzita Pardubice, 2006-2010
- [8] Uhlíř, J. – Sovka, P.: Číslicové zpracování signálů. Vydavatelství ČVUT Praha, 1995.
- [9] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA [Online] [citace dne 27.6. 2012] http://p007.webpark.cz/se/2_ftwt.htm
- [10] Pechoušek, J.: Základy programování v prostředí LabVIEW. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2004. ISBN 80-244-0800-7.
- [11] Vlach, J.- Havlíček, J. – Vlach, M.: Začínáme s LabVIEW. BEN – technická literatura, Praha 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [12] Kupka, L.: Aktivní vibroizolační systém sedadla řidiče. Disertační práce. http://www.fm.tul.cz/files/autoreferat_kupka.pdf
- [13] Taufer, I., Kotyk, J. a Javůrek, M.: Jak psát a obhajovat závěrečnou práci bakalářskou, diplomovou, rigorózní, disertační, habilitační. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2009. ISBN 978-80-7395-157-3.

Přílohy

Na přiloženém CD jsou uloženy tyto soubory.

Název souboru	Popis
JedlickaL_SoftwareProZpracovani_LK_2012.pdf	Bakalářská práce ve formátu PDF
Data.rar	Naměřená data
FileR_Base.vi	Aplikace pro převod dat z LabVIEW do programu Matlab
BK aplikace.vi	Aplikace pro zpracování dat v LabVIEW
Mer_Sed5_03_CHLT.m	Skript v Matlabu