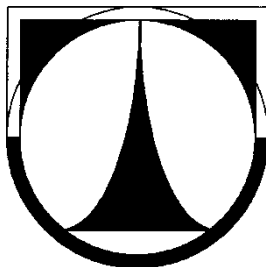


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



**NÁVRH VHODNÉHO ALGORITMU PRO ŘÍZENÍ VÝSUNU
SKLUZU VRATNÉ STANICE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Liberec 2014

Bc. Rudolf Soják



NÁVRH VHODNÉHO ALGORITMU PRO ŘÍZENÍ VÝSUNU SKLUZU VRATNÉ STANICE

Diplomová práce

Studijní program: N2301 - Strojní inženýrství
Studijní obor: 3901T003 - Aplikovaná mechanika

Autor práce: **Bc. Rudolf Soják**
Vedoucí práce: Ing. Jiří Blekta, Ph.D.



TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

Diploma thesis

Study programme: N2301 - Strojní inženýrství
Study branch: 3901T003 - Aplikovaná mechanika

Author: **Bc. Rudolf Soják**
Supervisor: Ing. Jiří Blekta, Ph.D.

Liberec 2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Rudolf Soják**

Studijní program: **N2301 / Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Aplikovaná mechanika**

Zaměření: **Inženýrská mechanika**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

NÁVRH VHODNÉHO ALGORITMU PRO ŘÍZENÍ VÝSUNU SKLUZU VRATNÉ STANICE

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se s problematikou vibrací, které působí na vratnou stanici během jejího provozu vlivem dopadající horniny. Konkrétně se zaměřte na stanici typu PD X3 se stavitelným štítem a výsuvným skluzem tlumícím pád horniny při přesypu na odchozí pás.
2. Na základě výsledků z prvotních měření charakterizujte vibrace vratné stanice. Soustřed'te se na různé provozní režimy zařízení. Zhodnot'te účinky vibrací na jednotlivé části vratné stanice a navrhňte nová vhodná místa pro měření intenzity vibrací způsobených přesypem dopravovaného materiálu.
3. Na základě měření vibrací ve vhodných místech vratné stanice navrhňte způsob identifikace charakteristiky dopravovaného materiálu. Soustřed'te se zejm. na dva typy horniny: kusovitý materiál s častým výskytem kamení a lepivý jílovitý materiál.

4. Navrhněte vhodný algoritmus, na základě kterého bude řízen výsun skluzu v případě kusovitého materiálu. Tento algoritmus navrhněte s ohledem na minimalizaci nebezpečí zahlcení násypky vratné stanice v případě náhlé změny charakteru přepravovaného materiálu.
5. Navržený algoritmus simulačně ověřte. V případě včasného nákupu průmyslového počítače a jeho instalace na vratnou stanici algoritmus ověřte též experimentálně.

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva: cca 40 stran,

- přílohy: výsledky měření.

Seznam literatury:

- Brepta, R., Půst, L., Turek, F.: Mechanické kmitání. Sobotáles. Praha 1994.
- Tůma, J.: Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. Sdělovací technika. Praha 1997.
- Další podklady z výzkumných zpráv, časopisů a sborníků, z internetu, apod.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Blekta, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Aleš Lufinka, Ph.D.

L. S.

vedoucí katedry

děkan

V Liberci dne

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 22. 5. 2014

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Jiřímu Blektovi, Ph.D. za rady, připomínky a čas, který mé práci věnoval. Také bych rád poděkoval ostatním zainteresovaným za jejich rady.

Anotace

Diplomová práce zpracovává téma navržení vhodného algoritmu výsuvu skluzu vratné stanice v povrchových dolech. Obsahuje měření vibrací na pohonné stanici dopravníku. Také tvorbu algoritmu vyhodnocujícího kusovitost dopravovaného materiálu, ve kterém je využito znalostí signálové analýzy, vlastností rychlé Fourierovy transformace a charakteristiky signálů ve frekvenční oblasti.

Klíčová slova: stanice PDX3, Severočeské doly, životnost dopravníkových pásů, vibrace, frekvence, FFT, Fourierova transformace, frekvenční analýza, váhové okno, Matlab, výkonové spektrum, průměrování spekter, spektrální analýza

Annotation

Diploma thesis process topic of designing suitable algorithm for control of the slip eject on return station in surface mines. This work includes measurement of vibrations on the conveyor drive station. Also creation of an algorithm evaluating the lumpiness of transported material, in which is used the knowledge of signal analysis, properties of fast Fourier transformation and signal characteristics in frequency domain.

Key words: station PDX3, North bohemia coal mines, service life of conveyor belts, vibrations, frequency, FFT, Fourier transformation, frequency analysis, windowing function, Matlab, power spectrum, averaging of spectra, spectral analysis

Obsah

Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Anotace	7
Annotation	7
Obsah	8
Seznam obrázků.....	10
Seznam tabulek	11
Seznam symbolů a jednotek	12
Zkratky.....	13
1 Úvod.....	14
2 Popis vratné a pohonné stanice	15
3 Charakteristika vibrační pohonné stanice	18
3.1 Vhodná místa pro měření vibrací	19
3.2 Použitá měřicí zařízení a postup měření	20
4 Návrh identifikace charakteristiky dopravovaného materiálu	23
4.1 Fourierova transformace	23
4.2 Vyvarování se nepřesností v FFT	25
4.2.1 Aliasing	25
4.2.2 Leakage a váhová okna	25
4.2.3 Překrývání intervalů.....	27
4.3 Charakteristiky signálů ve frekvenční oblasti	27
4.3.1 Výkonová spektrální hustota	28
4.4 Návrh identifikace materiálu.....	29
4.4.1 Schéma návrhu charakteristiky	31
4.4.2 Vlastní frekvence štítu	33
4.4.3 Počet vzorků intervalu - porovnání.....	33
4.4.4 Frekvenční rozsah analýzy signálu	34
4.5 Porovnání různých vstupních kritérií výpočtu	35
4.5.1 Vliv typu spektra.....	36
4.5.2 Vliv váhových oken	37
4.5.3 Vliv velikosti překrytí intervalů.....	37
4.5.4 Vliv šířky násobeného okolí vlastní frekvence	38

4.5.5	Vliv maximální hodnoty váhové funkce.....	39
5	Navržení vhodného algoritmu	41
5.1	Doporučení pro naprogramování průmyslového počítače	49
6	Ověření algoritmu	51
6.1	Měření číslo 1, stanice PDX3.....	51
6.2	Měření číslo 2, stanice PDX3.....	52
6.3	Měření číslo 1, stanice PD520	52
6.4	Měření číslo 2, stanice PD520	53
6.5	Měření číslo 3, stanice PD520	53
6.6	Měření číslo 4, stanice PD520	53
7	Závěr	54
	Citovaná literatura.....	55
	Příloha A	56
	Příloha B	61

Seznam obrázků

Obr. 1 - Vratná a pohonná stanice v dolech Bílina	15
Obr. 2 - Přejedání mezi dopravníky	16
Obr. 3 - Uložení štitu	17
Obr. 4 - Klasifikace signálů podle náhodnosti jejich průběhu (4)	19
Obr. 5 - Umístění akcelerometru	20
Obr. 6 - Intenzita vibrací v jednotlivých směrech	22
Obr. 7 - Magnituda a fáze	24
Obr. 8 - Aliasing (7)	25
Obr. 9 – Leakage (5)	26
Obr. 10 - Typy váhových oken	27
Obr. 11 - Překrývání záznamů (5)	27
Obr. 12 - Výkon signálu (4)	28
Obr. 13 - Váhová funkce	30
Obr. 14 - Vliv počtu měřených vzorků N	34
Obr. 15 - Nefiltrovaný signál	35
Obr. 16 - Vliv různých typů spekter	36
Obr. 17 - Vliv různých typů váhových oken	37
Obr. 18 - Vliv velikosti překrytí intervalů	38
Obr. 19 - Vliv šířky násobeného okolí vlastní frekvence	39
Obr. 20 - Vliv maximální hodnoty váhové funkce	40
Obr. 21 - Grafický výstup z navrženého algoritmu	48
Obr. 22 - Výstup z měření 1 na stanici PDX3	52
Obr. 23 - Výstup z měření 2 na stanici PDX3	56
Obr. 24 - Výstup z měření 1 na stanici PD520	57
Obr. 25 - Výstup z měření 2 na stanici PD520	58
Obr. 26 - Výstup z měření 3 na stanici PD520	59
Obr. 27 - Výstup z měření 4 na stanici PD520	60

Seznam tabulek

Tab. 1 - Základní parametry dopravníků (3).....	16
Tab. 2 - Vliv typu spektra	36
Tab. 3 – Vliv typu váhového okna.....	37
Tab. 4 - Vliv velikosti překrytí intervalů	38
Tab. 5 - Vliv šířky násobeného okolí vlastní frekvence	39
Tab. 6 - Vliv maximální hodnoty váhové funkce	40

Seznam symbolů a jednotek

e	Eulerovo číslo	
f	frekvence	[Hz]
f_m	mezní frekvence	[Hz]
f_o	frekvence snímání signálu	[Hz]
f_s	vzorkovací frekvence	[Hz]
Δf	frekvenční rozlišení	[Hz]
Δf_Ω	frekvenční rozsah okolo vlastní frekvence	[Hz]
i	celé číslo, případně index	
j	imaginární jednotka	
k	celé číslo, případně index	
m	celé číslo, případně index	
K	počet hodnot v maticích L, M	
L, M	matice pro ukládání hodnot \bar{X}, \bar{X}_Ω o délce K	
N	počet vzorků	
Q	dopravní výkon	[t/hod]
R_{xx}	autokorelační funkce signálu $x(t)$	
S_{xx}	výkonová spektrální hustota, autospektrum	
t	spojitý čas	[s]
Δt	vzorkovací interval	[s]
T	doba periody, délka záznamu	[s]
v	dopravní rychlost	[m/s]
$x(t)$	signál, funkce spojitého času	
x_i	hodnoty vzorkovaného signálu	
X	FFT signálu x_i	
X_Ω	FFT signálu x_i , vynásobeného váhovou funkcí	
\bar{X}, \bar{X}_Ω	průměrná hodnota z X, X_Ω	
$\overline{X_K}, \overline{X_{K\Omega}}$	průměrná hodnota matic L, M v každém intervalu	
π	Ludolfovo číslo	
ω	úhlová rychlost	[rad/s]
Δ	rozdíl hodnot $\bar{X}_K, \bar{X}_{K\Omega}$	
$\bar{\Delta}$	průměrná hodnota rozdílu Δ	

Zkratky

ESD	Energetická spektrální hustota (Energy spectral density)
DFT	Diskrétní Fourierova transformace (Discrete Fourier transformation)
FFT	Rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier transformation)
PSD	Výkonová spektrální hustota (Power spectral density)
PWR	Výkon (Power)
RMS	Efektivní hodnota (Root mean square)
PLC	Programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller)

1 Úvod

Diplomová práce se zaměřuje na problematiku možného zvýšení životnosti pásových dopravníků zlepšením ochrany pásu před účinky poškození, které vznikají dopadem přepravovaného materiálu ve fázi přesypu mezi dopravníky.

V dnešní době se pásové dopravníky používají v celé řadě odvětví, např. v potravinářství, logistice, tepelných elektrárnách, povrchových dolech apod. V této práci je pozornost soustředěna na poslední zmíněné využití – v povrchových dolech. Jejich funkcí je doprava odtěženého materiálu od kolesového rypadla k zakladači umístěném na opačné straně dolu. Vzhledem k velké vzdálenosti mezi těmito stroji (cca 10 km) musí být dopravníková trať složena z několika navzájem navazujících pásových dopravníků. Tím vzrůstá počet míst, kde dochází k přesypu přepravované horniny, což vede ke zvyšování opotřebení pásů vlivem tohoto procesu. Přesypové místo mezi dopravníky je tvořené pohonnou a vratnou stanicí. Předchozí praktické zkušenosti zaměstnanců povrchových dolů vedly k instalaci posuvně uloženého skluzu na vratné stanici. Tím dochází ke zmenšení pádové výšky a snížení kinetické energie dopadajícího materiálu. Toto potvrzuje i dlouhodobé pozorování životnosti pásů. Problematická je ovšem manipulace se skluzem, neboť díky různému složení přepravovaného materiálu jej není možné nechat neustále vysunutý (nebezpečí zahlcení násypky). Skluz je nyní ovládán na základě manuálního pokynu obsluhy, která se ale k tomuto místu dostane pouze jednou až dvakrát za směnu.

Cílem této práce je najít vhodný algoritmus, který do budoucna zajistí automatický výsuv skluzu na vratné stanici. K tomu je nutné najít vhodný identifikátor kusovitosti přepravovaného materiálu.

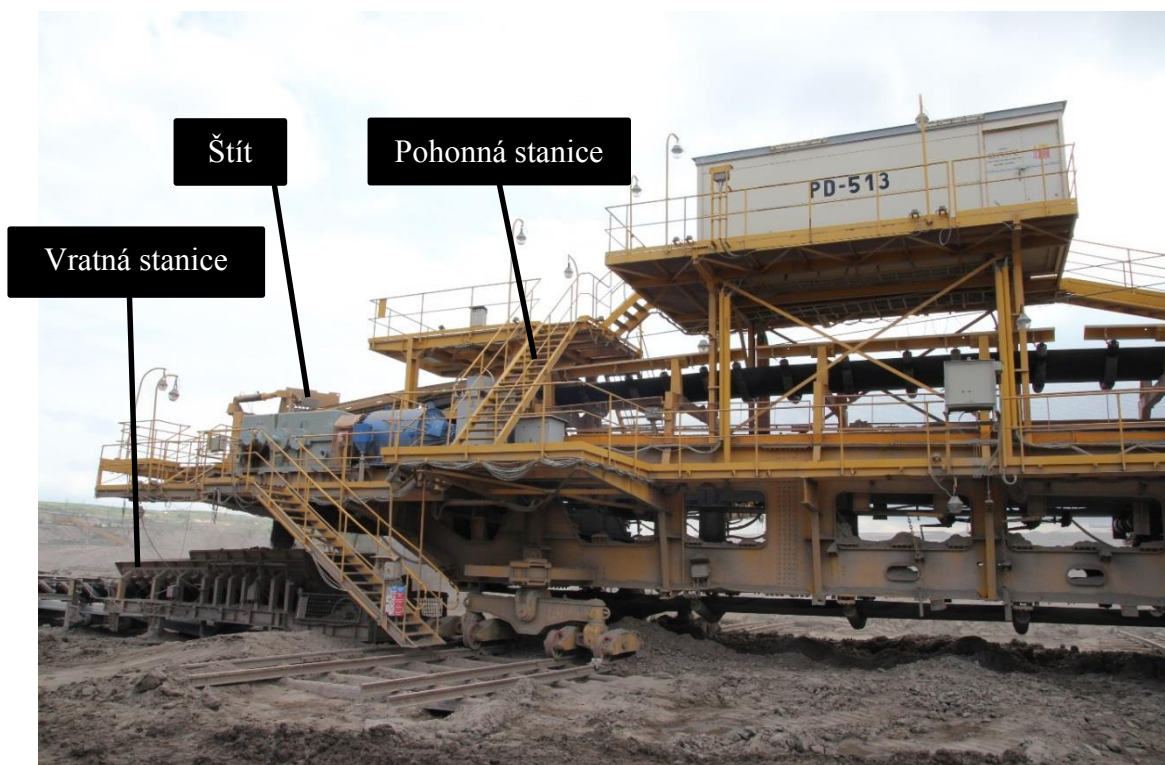
Práce navazuje na projekt FR-TI4/310 - Zvýšení životnosti dopravních pásů namáhaných rázovým zatížením (2012-2014, MPO/FR), program FR - TIP (2009-2017). (1)

2 Popis vratné a pohonné stanice

Po konzultaci s vedením Severočeských dolů Bílina, a.s. bylo rozhodnuto o realizaci opatření na stanicích typu PDX3, umístěných na 4. řezu skrývky Jih. Pro podchycení rozmanitosti přepravovaného materiálu však bylo nutné měření rozšířit i na další stanici stejného typu, která je umístěna na 6. řezu skrývky Sever a nese označení PD520. Obě stanice jsou osazeny pásem Contitech P2500/4+1, 8+4 A (2).

Výše zmíněné stanice (viz Obr. 1) slouží jako spoj pásových dopravníků, které odvádí vytěžený materiál od kolesového rypadla na protilehlou stranu dolu, kde se nachází zakladače.

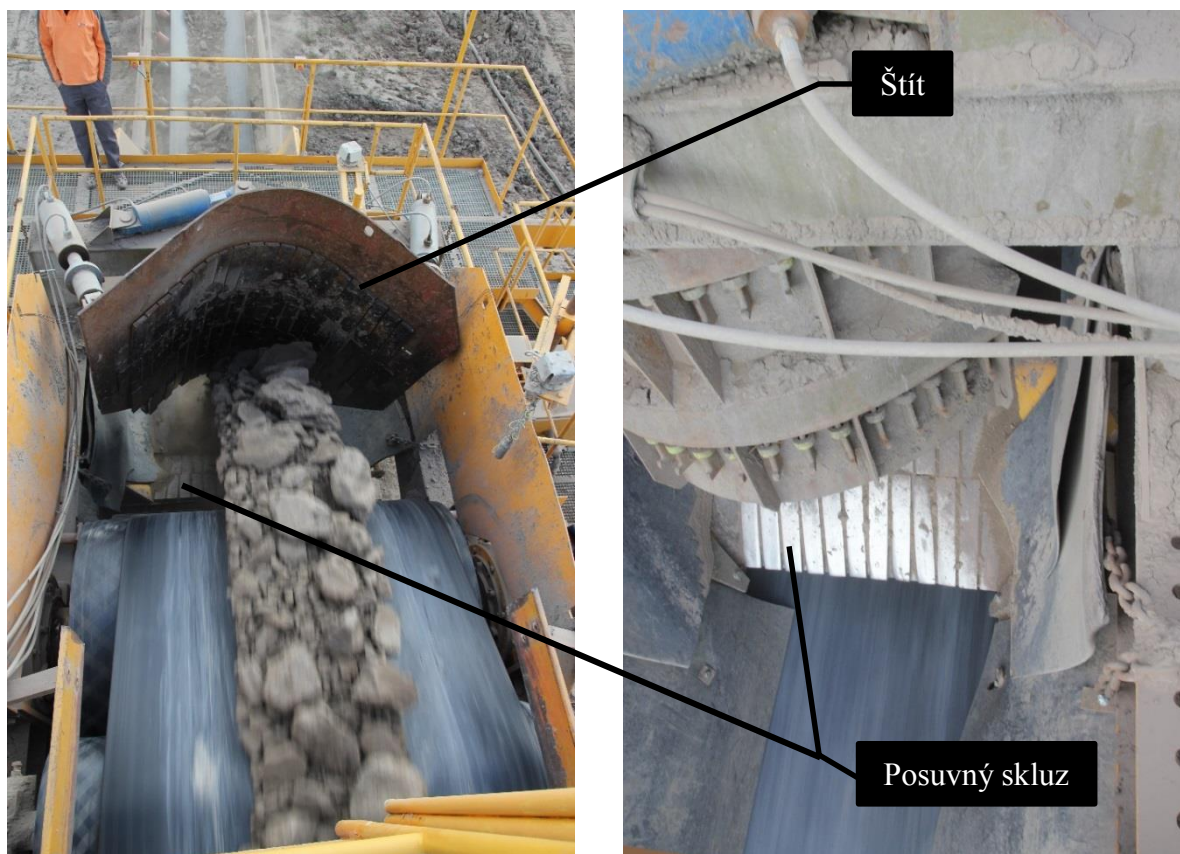
Poháněcí stanice je osazena elektromotory, jejichž počet a výkon je v závislosti na délce dopravníku a převýšení počátečního a koncového místa. Stanici je možné přemísťovat. U starších modelů po kolejnicích, nový model je usazen na pontonu, ke kterému je možné připojit čtyři kusy kráčivých jednotek OKJ 130 P. Na ocelové plošině nad poháněcí stanicí je umístěna rozvodná skříň, vrátek napínání, skříň pro zařízení centrálního mazání a ovládání štítu. Po obou stranách stanice jsou obslužné lávky pro umožnění přístupu ke všem strojním dílům. (3)



Obr. 1 - Vratná a pohonná stanice v dolech Bílina

Přepravovaný materiál je přiváděn od rypadla přes drtič na pohonnou stanici, ze které setrvačností dopadá na plochu štítu. Ten usměrňuje svojí pozicí a tvarem tok materiálu tak, aby dopadal do středu násypky umístěné na vratné stanici. Ta je vybavena pohyblivým

skluzem, který je možné vysunout v případě nadměrné tvrdosti a kusovitosti přepravovaného materiálu. Tím dochází ke snížení pádové výšky a kinetické energie dopadající horniny na pás. Přesypem na další dopravníky se uskutečňuje přeprava vytěženého materiálu na protilehlou stranu dolu k zakladači, který vyhloubenou a vytěženou jámu opět zasypává. Na následujících fotografiích (viz Obr. 2) je zachycen přechod mezi jednotlivými dopravníky.



Obr. 2 - Přechod mezi dopravníky

Pro příklad je možné uvést základní charakteristiky dopravníků používaných na skrývce Sever. Jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tab. 1).

Tab. 1 - Základní parametry dopravníků (3)

Základní charakteristika dopravníků	
Maximální dopravní výkon	Q = 9000 t/hod
Osazení hlavními pohony	4 x 500 kW
Dopravní rychlost	v = 5,2 m/s
Dopravovaný materiál	Skrývka
Měrná sypná hmotnost	1,7 t/m ³
Kusovitost materiálu	0-750 mm

Štít vratné stanice je uložen pomocí tří úchytných bodů. Všechny jsou tvořeny soustavou hydraulického válce a Kardanova kloubu (viz Obr. 3). Pomocí prostředního pístu je možné měnit natočení štítu kolem svislé osy. Krajní písty nastavují sklon štítu vůči pásu. Sklon štítu je nastavován obsluhou stanic a je vždy volen tak, aby byl v kontaktu s přesýpanou horninou a směřoval její dopad do středu odchozího pásu. Vzhledem k riziku nadměrného opotřebení je osazen ocelovými pláty, které jsou jištěny závlačkou a lze je proto snadno vyměnit.



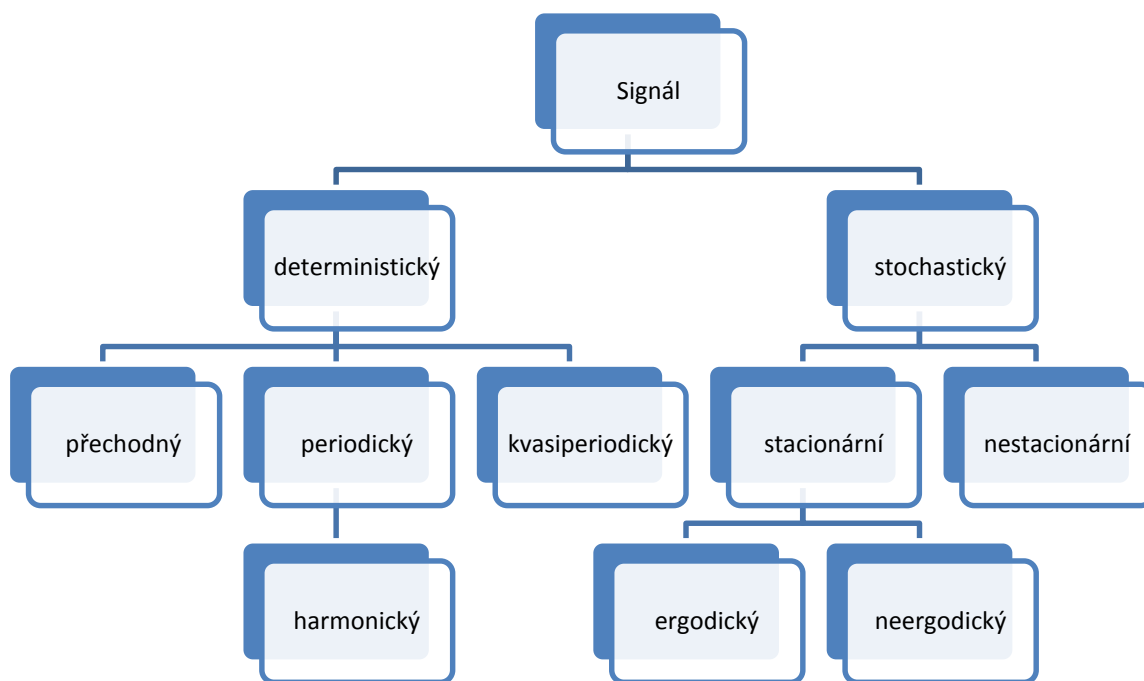
Obr. 3 - Uložení štítu

3 Charakteristika vibrací pohonné stanice

Pohonná stanice je vystavena celé řadě vibrací. Pro jejich analýzu a vyhodnocení je nutné tyto vibrace charakterizovat. Proto je v následujícím textu popsáno teoretické rozdělení vibrací s následnou praktickou aplikací na vratnou stanici.

Každá mechanická součást či soustava může být za provozu vystavena působení celé řadě vibrací. Nejčastěji bývají jejich zdrojem poháněcí zařízení, ložiska, hřídele, ozubená kola, řemeny a další prvky, které tvoří mechanické systémy. Většina vibrací má negativní dopad a jsou vyvolány zejména nevyvážeností rotujících hmot, vychýlením či házivostí hřídele, opotřebením, vůlí, atd.

Časový záznam fyzikálních veličin, v tomto případě vibrací, se nazývá signál (viz Obr. 4). Ten lze klasifikovat podle náhodnosti jeho průběhu na deterministický a stochastický (náhodný). Deterministický signál je takový, u něhož je možné jeho průběh předvídat, tzn. jeho průběh je determinován. Tento signál má tři podskupiny – přechodné, periodické a kvasiperiodické. Přechodné signály jsou časově omezené, signál je vybuzen z klidového stavu a opět se na nulovou úroveň vrátí. Patří sem například rázy, impulsy, atd. Naopak periodické a kvasiperiodické mohou trvat nekonečně dlouhou dobu. Tyto jsou složeny z harmonických signálů, jež jsou násobky základní frekvence. U periodického signálu to je jen jedna základní frekvence, u kvasiperiodického jsou alespoň dvě. Harmonický signál je speciálním druhem periodického signálu, se sinusovým průběhem. Stačí proto stanovit jedinou určující veličinu a zbývající lze dopočítat. Stochastický neboli náhodný signál nelze popsat rovnicí, ale pomocí sady parametrů. Pro stanovení těchto parametrů je třeba znát teorii statistiky a pravděpodobnosti. Nejčastěji stanovované parametry jsou střední hodnota, rozptyl, poměr signálu k šumu, variační koeficient. Stacionární signály mají tyto parametry v čase neměnné v dostatečně dlouhém časovém intervalu, nestacionární nikoliv. Stacionární signály se dále dělí na ergodické a ne-ergodické. U ergodických signálů je možné stanovit jejich charakteristiky z jednoho dostatečně dlouhého měření. Zcela náhodný signál je nazýván šumem.



Obr. 4 - Klasifikace signálů podle náhodnosti jejich průběhu (4)

Další rozdělení signálu je možné provést na spojitý a diskrétní. Spojitý signál je definovaný v každém časovém okamžiku. Je tvořen posloupností vzorků, které obecně mohou nabývat libovolné hodnoty. Diskrétní signál vzniká obvykle vzorkováním analogového signálu, přičemž počet vzorků za sekundu udává vzorkovací frekvence. Tento proces je nazýván diskretizací, a provádí se nejčastěji z důvodu zpracování signálu výpočetní technikou.

Signál měřený na výše zmíněné pohonné stanici je tvořen kombinací deterministického i náhodného signálu. Deterministická část signálu je dána periodickým buzením mechanických systémů na stanici. Těmi jsou zejména dopravníkové válce a jejich uložení, hnací elektromotory, převodovky apod. Náhodný signál je z největší míry vybuzen dopravovaným materiálem při přesypu z příchozího na odchozí dopravník. Konkrétně se jedná o nárazy do štítu a dopad na výsuvný skluz nebo na pás dopravníku. Náhodný je tento děj proto, že nelze předvídat složení ani množství dopravovaného materiálu. Informace do této kapitoly byly čerpány ze zdroje (4).

3.1 *Vhodná místa pro měření vibrací*

Při výběru místa pro měření účinků přepravovaného materiálu na vibrace je nutné brát v úvahu minimálně dvě kritéria:

- a) Změnou struktury přepravovaného materiálu musí dojít k rozpoznatelné změně charakteru vibrací daného místa.

b) Místo, které je přiměřeně dostupné obsluze.

Po pečlivém posouzení všech aspektů bylo rozhodnuto o měření vibrací na štítu, který je v přímém kontaktu s dopadajícím materiálem. V ideálním případě by měl být akcelerometr umístěn uprostřed plochy štítu (z rubové strany). Toto umístění ovšem není moc přístupné nejen pro kabeláž, ale také pro případnou údržbu či výměnu akcelerometru. Z tohoto důvodu byla zvolena pozice v místě uchycení štítu k tlumiči (viz Obr. 5), kam je snadný a především bezpečný přístup z ochozu stanice.



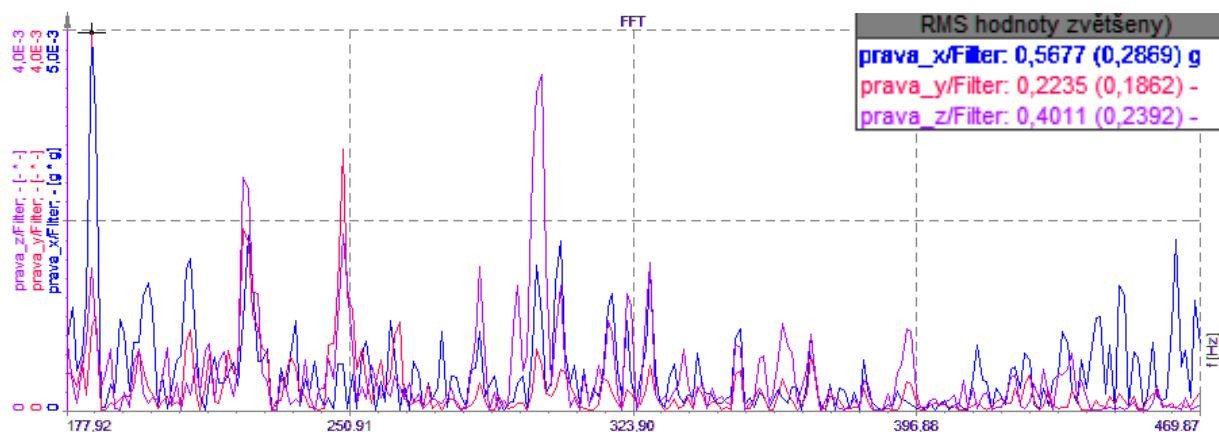
Obr. 5 - Umístění akcelerometru

3.2 Použitá měřicí zařízení a postup měření

Vibrace na štítu byly zaznamenávány pomocí měřicí ústředny DEWE-5000 a později také zařízením DEWE-43, které je kompaktnější, lehčí a pro tento účel dostačující. První zmíněné je vybaveno softwarem DEWEsoft, který je určen pro synchronizované získávání signálu z různých zdrojů a pro analýzu dat. Přístroj s tímto softwarem nahrazuje rekordér, digitální měřič, datovou ústřednu, FFT analyzátor a další. K zařízení byly připojeny jednoosé akcelerometry Kistler 8305B2, které byly upevněny na dvou montážních kostkách Kistler 3D K-Beam, typ 8516, po třech na každé. Tato konfigurace umožňuje měření vibrací ve všech třech směrech souřadnicového systému. Dále byla připojena kamera pro pozdější vizuální kontrolu přepravovaného materiálu. (2)

Během prvních měření byl také zaznamenáván hluk mikrofonom Microtech M370 s frekvenčním rozsahem $20\text{ Hz} - 20\text{ kHz}$. Toto měření bylo realizováno z podnětu praktických zkušeností pracovníků dolů, kteří se při rozhodování o vysunutí či zasunutí skluzu často řídí zvukovým projevem dopadajícího materiálu na štít. Při tvrdé a kusovité hornině štít „zvoní“. Tento jev vzniká při působení impulsní síly, která způsobí vychýlení tělesa z rovnovážné polohy a následné volné kmitání na jedné nebo více vlastních frekvencích. Bohužel se po úvodních měřeních ukázalo, že je signál z mikrofону nevypovídající z důvodu velice hlučného prostředí.

Postup měření byl následující. Na štít byly uchyceny dvě zmíněné montážní kostky s akcelerometry pomocí magnetické patice, která umožňuje jednoduchou montáž. Jejich umístění je rozepsáno v předchozím oddíle. Orientace akcelerometrů byla zvolena tak, že osa x je ve směru pohybu pásu, osa y je kolmá na směr pásu a leží v jeho rovině a osa z zaznamenává svislý směr. Tyto směry byly zvoleny takto, protože nejvyšší intenzita vibrací je předpokládána ve směru osy x , tj. ve směru dopadu materiálu na plochu štítu. Jak je vidět v tabulce na následujícím obrázku (viz Obr. 6), tak nejvyšší hodnota $RMS = 0,2869$ (jedná se o hodnoty v závorce, které odpovídají vybranému frekvenčnímu rozsahu), která udává průměrnou efektivní hodnotu signálu, vykazuje signál ve směru osy x (modrá barva). U ostatních měření jsou výsledky ve stejném smyslu, tedy nejvyšší intenzita vibrací ve vybraném frekvenčním rozsahu je ve směru x . Na zařízení DEWE-5000, kam byly akcelerometry připojeny, byl spuštěn záznamový mód aplikace DEWEsoft. V případě zařízení DEWE-43 byl tento obslužný program spuštěn na připojeném PC. Měřeno bylo celkem šest kanálů (3 osy na každém akcelerometru). K tomu byl ukládán obrazový záznam bez synchronizace (slouží pouze k vizuální kontrole dopravovaného materiálu a možnosti zpětného přiřazení různých druhů vibrací změně charakteru dopravované horniny). Před vlastním měřením byla provedena kalibrace snímačů, nastaveny jednotky měřených signálů a vzorkovací frekvence 5000 Hz . Nastavení jednotek vibrací bylo ponecháno ve voltech, neboť pro měření nebylo zcela směrodatné, jak velké je zrychlení v jednotkách mm/s^2 , ale jaká úroveň zrychlení je naměřena. A k tomu volty stačí. Zároveň je tím sníženo množství potenciálních operací, které bude muset PLC vykonávat (volty získává automaticky, na jiné jednotky by musel přepočítávat). Na signály byl aplikován antialiasingový filtr s hodnotou 800 Hz , který vyšší frekvence potlačuje.



Obr. 6 - Intenzita vibrací v jednotlivých směrech

Bylo realizováno celkem 10 měření na stanici PDX3 a 3 měření na stanici PD520. Celkem se jednalo o cca 8000 s záznamu. Byla snaha provést měření za různých podmínek - sucho, déšť, kusovitý materiál, sypký materiál.

4 Návrh identifikace charakteristiky dopravovaného materiálu

V této kapitole se práce věnuje popisu základní použité teorie, nutné k identifikaci dopravovaného materiálu z naměřených vibrací. Následně je pak pomocí této teorie navržen postup identifikace dopravované horniny, zejména dvou typů - kusovitý materiál s častým výskytem kamení a lepivý jílovitý materiál. Z teorie je zde věnován prostor Fourierově transformaci, nepřesnostem v transformaci, charakteristice signálů ve frekvenční oblasti a vlastním frekvencím. Podklady k tvorbě kapitol 4.1, 4.2 a 4.3 byly čerpány ze zdrojů (4) a (5).

4.1 Fourierova transformace

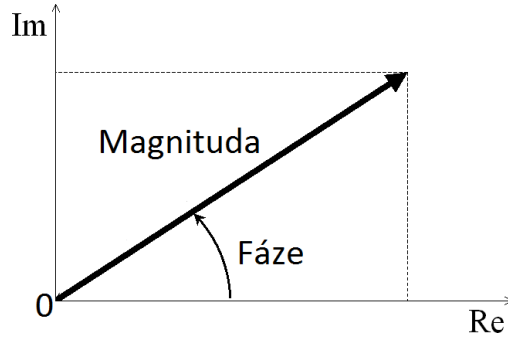
Fourierova transformace se používá pro převedení signálu z časové oblasti (průběh signálu v čase), kde jsou jednotlivé jevy promíchány, do frekvenční oblasti, tzv. periodogramu (závislost amplitudy a/nebo počáteční fáze na frekvenci), kde jsou jednotlivé jevy od sebe vzájemně odděleny. Vychází z Fourierových řad, které jsou ovšem definované jen pro periodický signál. Pro obecný signál se proto aplikuje Fourierova transformace, která je pro spojitý signál $x(t)$ definována následovně:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4.1)$$

a zpětná (inverzní) transformace je dána vzorcem:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega, \quad (4.2)$$

kde $X(\omega)$ je obecně komplexní číslo (viz Obr. 7). Výsledek transformace je proto zobrazován buď jako spektrum magnitud, fázové spektrum, nebo komplexní spektrum. V drtivé většině případů se používá amplitudové spektrum, jež je definováno jako $|X(\omega)|$, tzn. délka vektoru v komplexní rovině.



Obr. 7 - Magnituda a fáze

Pro vzorkovaný signál x_i , jež vznikne ze spojitě funkce času $x(t)$ výběrem jejích hodnot v časových intervalech Δt , se používá diskrétní Fourierova transformace – DFT. Nechť je za délku záznamu (periodu) T naměřeno N diskrétních hodnot signálu, potom jsou v následujícím vztahu, $T = N \cdot \Delta t$. Vzorkovací frekvence je dána převrácenou hodnotou periody vzorkování, $f_s = 1/\Delta t$. Za základní frekvenci snímání signálu lze označit převrácenou hodnotu délky záznamu, $f_0 = 1/T$. Přímá a inverzní DFT je dána vztahy:

$$X_k = \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{-j\frac{2\pi}{N}ki}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (4.3)$$

$$x_i = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j\frac{2\pi}{N}ki}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (4.4)$$

Zcela běžné jsou záznamy s délkou několika miliónů hodnot, u kterých je třeba k vyčíslení všech koeficientů X_k , N^2 sčítání a také N^2 násobení komplexních čísel. Až Cooley a Tukey (6) objevili rychlejší metodu výpočtu, pro kterou se vžil název rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform – FFT). Její podstatou je charakteristická délka záznamu, $N = 2^m$, kde m je přirozené číslo. Nejčastěji používané délky jsou $N = 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192$. Pro představu, záznam o délce milión vzorků při jednom výpočtu každou mikrosekundu by se pomocí DFT počítal milión sekund, resp. 11,5 dne, FFT to zvládne 35000krát rychleji. Vzhledem k délce záznamu v mocnině 2, lze posloupnost vzorků rozdělit na dvě části, na sudé a liché v pořadí. Pak lze vzorec pro přímou transformaci psát ve tvaru:

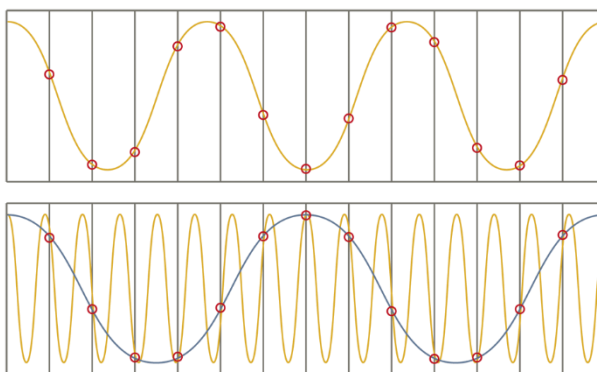
$$X_k = \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{-j\frac{2\pi}{N}ki} = \sum_{i=0}^{N/2-1} x_{2i} e^{-j\frac{\pi}{N}ki} + e^{-j\frac{2\pi}{N}k} \sum_{i=0}^{N/2-1} x_{2i+1} e^{-j\frac{\pi}{N}ki}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (4.5)$$

4.2 Vyvarování se nepřesností v FFT

Je mnoho míst kde lze v rychlé Fourierově transformaci vytvořit chybné výsledky jejím nesprávným použitím. Nepřesnosti jsou způsobeny vlivem diskretizace, nebo nutnosti omezit délku časového signálu. Proto je nutné věnovat se tématům jako je aliasing, leakage, vliv váhových oken a překrývání intervalů.

4.2.1 Aliasing

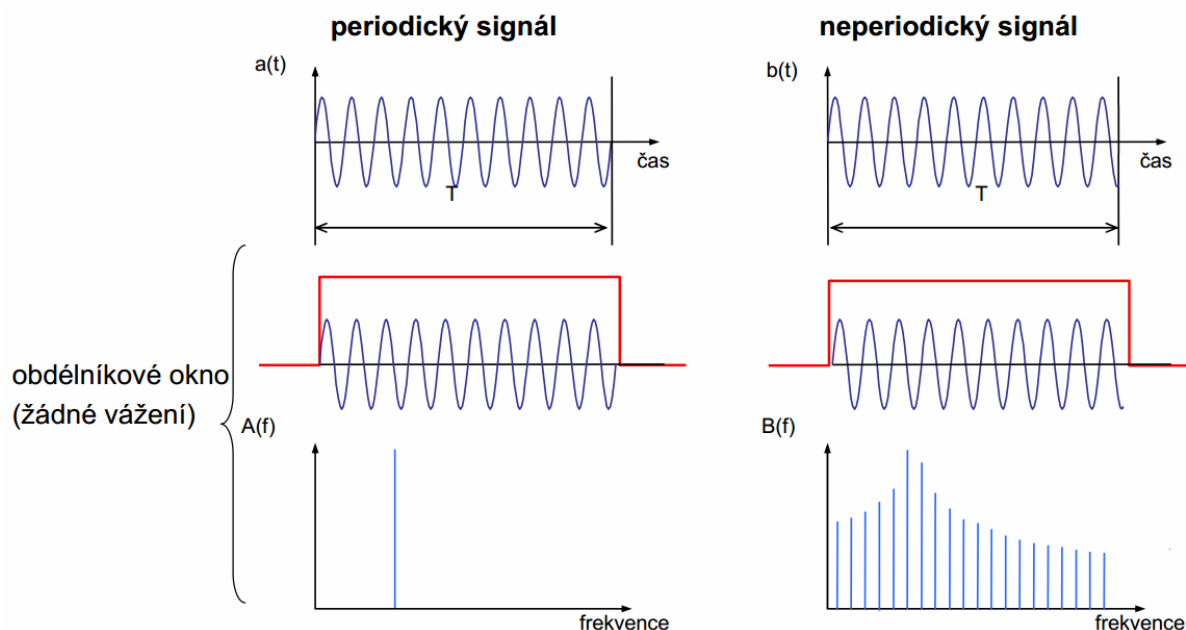
Tento jev vzniká diskretizací z původně spojitého signálu na vzorkovaný. Použitím nízké vzorkovací frekvence na signál, který obsahuje i vysoké frekvence dochází k jeho zkreslení a je špatně interpretován (viz Obr. 8). Ve spektru se tyto vysokofrekvenční složky budou jevit jako nízkofrekvenční. Ochrana před tímto efektem je anti-aliasingový filtr. Ten je nastaven na nejvyšší předpokládanou frekvenci v signálu a všechny vyšší zrcadlí do nižších frekvencí. Anti-aliasingový filtr podrobí časový signál nízkofrekvenčnímu filtru s ostrou sestupnou hranou. Protože filtry mají konečný sklon sestupné hrany, vypouští se z frekvenční charakteristiky i data s frekvencí blízké Nyquistově frekvenci. Tzn., pokud má záznam délku 2048 bodů, tak úplné spektrum není tvořeno 1024 body ale jen 800. (5)



Obr. 8 - Aliasing (7)

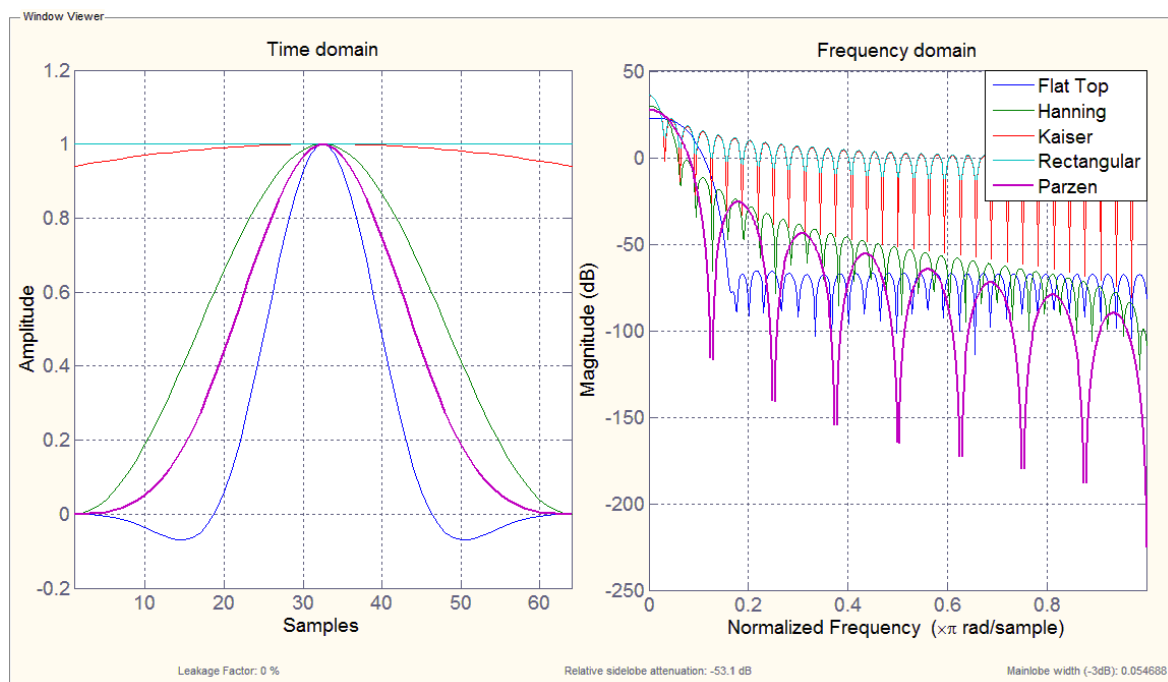
4.2.2 Leakage a váhová okna

Leakage, neboli chyba únikem, je způsobena neperiodickým signálem (viz Obr. 9). Tato chyba způsobuje, že energie frekvence, která je ve frekvenční oblasti velice výrazná u periodického signálu, se u neperiodického rozprostře do širšího okolí.



Obr. 9 – Leakage (5)

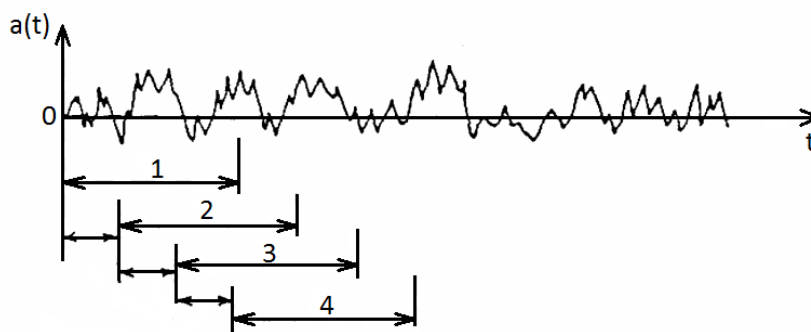
Minimalizace chyby únikem je možné změnou délky trvání měřeného vzorku tak, aby vyhověla základní periodicitě signálu. Nebo zvětšením délky záznamu signálu, tím se zvýší frekvenční rozlišení. Anebo použitím tzv. váhových oken, která snižují vliv neceločíselného počtu period v záznamu. Signál v časové oblasti je vynásoben průběhem zvoleného okna, tím se sníží váha signálu na jeho koncích. Okno existuje mnoho druhů, které mají různý průběh ve frekvenční oblasti (viz Obr. 10). Ideální průběh je úzký a co nejvyšší hlavní lalok a nízké postranní laloky. Bohužel to jsou protichůdné požadavky. Většinou s klesající šířkou hlavního laloku roste amplituda postranních laloků. Nejčastěji používaná okna jsou Hanningovo a Flat Top. Pro širokopásmové signály se pak používají například okna Barlettova, Hannova nebo Parzenova.



Obr. 10 - Typy váhových oken

4.2.3 Překrývání intervalů

Při použití váhových oken dochází ke ztrátě informací vlivem útlumu signálu na začátcích a na koncích záznamů. Je proto žádoucí, aby se jejich váha vyrovnala. Toho se dosáhne překrýváním záznamů (viz Obr. 11). Velikost překrytí z hlediska rychlosti zpracování a požadavku vyrovnané efektivní váhové funkce je dle (4) doporučeno $2/3$, tj. 66,7%. Tyto jednotlivé intervaly se pak často zprůměrují pro dosažení vyšší přesnosti výpočtu, tzv. Welchova metoda.



Obr. 11 - Překrývání záznamů (5)

4.3 Charakteristiky signálů ve frekvenční oblasti

Po provedení Fourierovy transformace je signál převeden do frekvenční oblasti, kde se snáz charakterizují jednotlivé jevy v systému. Základní publikací o frekvenční analýze

vzorkovaných signálů je kniha Oppenheima a Schafera (8). Metod pro charakteristiku signálů ve frekvenční oblasti je mnoho. Jejich základní rozlišení je podle typu signálu periodického nebo náhodného. U periodického signálu je pozornost soustředěna na jednotlivé složky (frekvence) spektra, proto je snaha o jejich zvýraznění. U náhodného signálu je naopak nahlíženo na spektrum jako celek a tak je také hodnoceno.

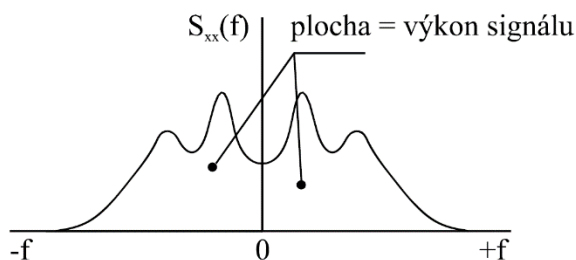
4.3.1 Výkonová spektrální hustota

Výkonová spektrální hustota (Power Spectral Density – PSD), zkráceně nazývána také jako autospektrum je definována na základě autokorelační funkce $R_{xx}(t)$ pomocí Wiener-Chinčinových vztahů. Tato charakteristika se používá pro náhodné signály (4). PSD je dána vzorcem:

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (4.6)$$

Nechť je dán signál s autokorelační funkcí $R_{xx}(t)$, kde korelační funkce pro nulové posunutí $R_{xx}(0)$ představuje výkon signálu. Tzn., plocha spektra ve frekvenční oblasti představuje výkon signálu (viz Obr. 12).

$$R_{xx}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} (x(t))^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(f) df. \quad (4.7)$$



Obr. 12 - Výkon signálu (4)

Pro vzorkované signály je PSD dána vztahem:

$$PSD_k = \begin{cases} \frac{1}{T} |\Delta t X_0|^2, & k = 0, \\ \frac{2}{T} |\Delta t X_k|^2, & k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1. \end{cases} \quad (4.8)$$

Kde místo $X(\omega)$ je třeba použít výraz $\Delta t X_k$. Tj. násobení koeficientů X_k vzorkovací periodou Δt , která je vypuštěna při definici DFT. Vzorec pro $k = 0$ odráží přechod z oboustranného spektra k jednostrannému, pouze pro nezáporné frekvence. Místo vzorkovací periody je běžnější doba záznamu, a proto lze vzorec (4.8) přepsat do tvaru:

$$PSD_k = \begin{cases} T|X_0/N|^2, k = 0, \\ 2T|X_k/N|^2, k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1. \end{cases} \quad (4.9)$$

Pro spektra s výskytem výrazných izolovaných frekvenčních složek se používá výhodnější zobrazení ve výkonovém spektru. Získá se podílem výkonové spektrální hustoty a délky záznamu.

$$PWR_k = PSD_k/T = \begin{cases} |X_0/N|^2, k = 0, \\ 2|X_k/N|^2, k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1. \end{cases} \quad (4.10)$$

Další možností charakteristiky je spektrum efektivních hodnot (Root Mean Square – RMS), které souvisí s výkonovým spektrem. Jednotlivé složky udávají efektivní hodnoty harmonických složek rozkladu na Fourierovu řadu, jejichž amplituda je $\sqrt{2}$ – krát větší než efektivní hodnota.

$$RMS_k = \sqrt{PWR_k}. \quad (4.11)$$

Pro přechodové děje je vhodné použít energetickou spektrální hustotu (energy spectral density – ESD), která je ve vztahu s výkonovou spektrální hustotou podle vzorce:

$$ESD_k = T \cdot PSD_k. \quad (4.12)$$

4.4 Návrh identifikace materiálu

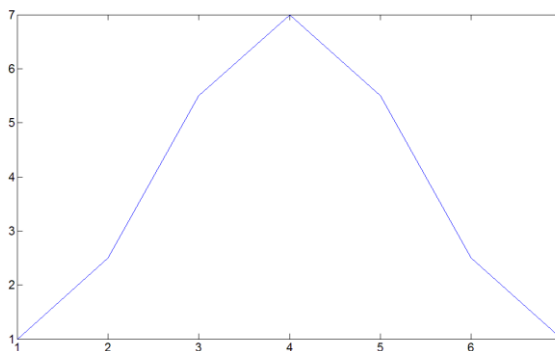
Cílem identifikace materiálu, je z naměřených vibrací rozeznat, kdy je na dopravníku přepravován kusovitý materiál (kameny) a kdy materiál sypký či jílovitý. Kusovitý materiál snižuje svým dopadem na pás dopravníku jeho životnost, a proto je třeba v tomto případě vysunout skluz, který chrání pás. Naopak při přepravě jílovitého materiálu je třeba tento skluz zasunout, protože hrozí riziko zahlcení násypek dopravníků.

Základním předpokladem pro identifikaci je skutečnost, že materiál s vyšší hmotností a tvrdostí intenzivněji vybudí vlastní frekvence štitu, do kterého naráží. Proto je třeba zjistit vlastní frekvence štitu. Ty jsou popsány v kapitole 4.4.2.

Z naměřených dat je vybrán pouze směr v ose x , z důvodu nejvyšší intenzity vibrací v tomto směru. Toto již bylo popsáno v kapitole 3.2. Změřený signál (označen jako x_i) je rozdělen na intervaly o počtu vzorků N , z požadavku FFT na délku intervalu $N = 2^m$.

Pro představu o průběhu vibrací v měřeném čase, je vykreslen graf závislosti amplitudy vibrací na čase. Z něho bude následně možné posoudit jejich intenzitu v jednotlivých časových okamžicích. Vybraný interval měření je přenásoben zvoleným Kaiserovým oknem pro zredukování vlivu neperiodicity signálu. Porovnání vlivu jiných oken na výsledek je

v kapitole 4.5.2. Interval je následně převeden pomocí FFT do frekvenční oblasti (označeno X). Algoritmus FFT není třeba programovat, jelikož je obsažen ve většině matematických řešičů, jako je Matlab, Maple, Simulink, atd. Pro potřeby vyhodnocení signálu je důležitá pouze amplituda jednotlivých frekvencí spektra, nikoliv fáze, proto se vypočítá absolutní hodnota každého záznamu v intervalu. Z vlastností FFT je známo, že pro shodnost absolutních hodnot koeficientů Fourierovy transformace je spektrum signálu zrcadlové vzhledem k Nyquistově frekvenci (polovina vzorkovací frekvence). Proto je možné grafy ve frekvenční oblasti znázornit v rozsahu od nulové frekvence po Nyquistovu. Tímto je vytvořena základní amplitudová charakteristika vibrací ve fázovém spektru. Z předpokladu buzení vlastních frekvencí štítu kusovitým materiálem, je pro zvýraznění vybrán pouze frekvenční interval v rozmezí těchto hodnot, tedy od 180 Hz do 450 Hz . Amplitudové spektrum je dále převedeno na výkonové spektrum podle vztahu (4.10), důvod je popsán v kapitole 4.5.1. A protože je pozornost soustředěna na stochastické vibrace štítu od přepravovaného materiálu, nejsou hodnoceny jednotlivé frekvence, ale celé spektrum. Z tohoto spektra je vypočtena průměrná hodnota amplitudy, označená jako \bar{X} . Dále je vytvořena tzv. váhová funkce (viz Obr. 13). Jde o funkci se sinusovým průběhem, s funkčním minimem na začátku a na konci intervalu, které je rovno jedné a s funkčním maximem uprostřed intervalu, které je zvoleno rovno sedmi (viz kapitola 4.5.5). Touto funkcí je vynásobena každá hodnota frekvence odpovídající vlastní frekvenci štítu a její okolí ve frekvenčním spektru (označeno X_{Ω}). Tím se zvýrazní buzení těchto frekvencí způsobené dopadajícím materiálem. Okolí frekvence je zvoleno cca $\Delta f_{\Omega} = \pm 7 \text{ Hz}$ (viz kapitola 4.5.4). Není násobena pouze hodnota frekvence, ale i okolí, protože díky neperiodicitě signálu, může být energie frekvence rozprostřena v širší oblasti. Z tohoto nově vzniklého spektra je taktéž vypočtena průměrná hodnota amplitudy z celého intervalu (označená \bar{X}_{Ω}).

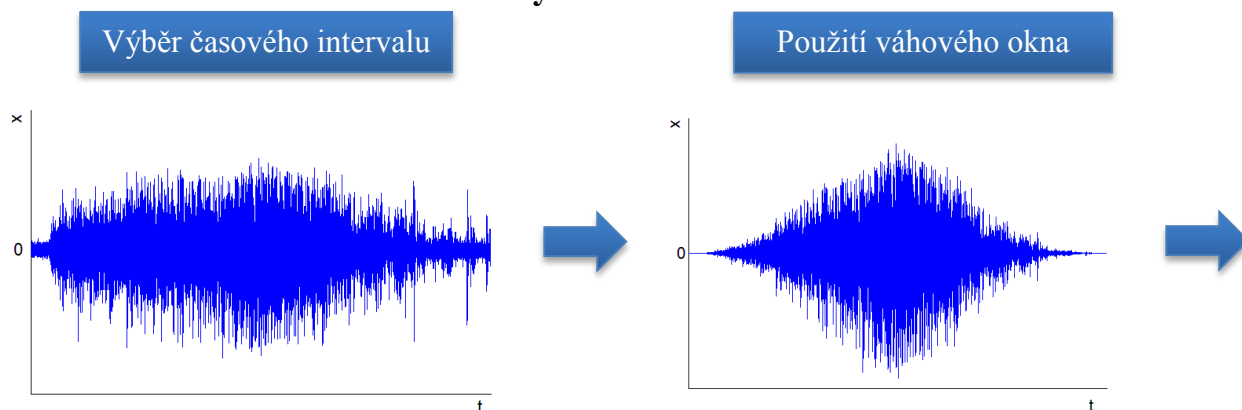


Obr. 13 - Váhová funkce

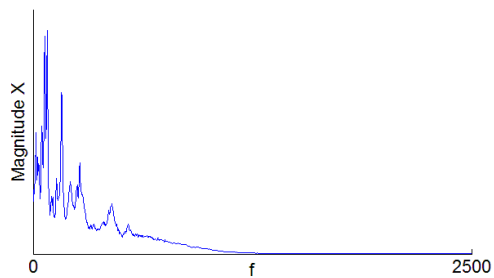
V dalším kroku jsou definovány dvě matice L, M o konstantním počtu hodnot K , obsahující na počátku nuly. Při každém výpočtu \bar{X} a \bar{X}_Ω jsou tyto hodnoty zapsány na konec matice jim příslušných a zároveň je první hodnota v matici vždy odstraněna. To udržuje délku matice stále konstantní. Ve stejném kroku je vypočítána průměrná hodnota každé matice, označená \bar{X}_K a $\bar{X}_{K\Omega}$. Délka K odráží čas, který je potřebný na vysunutí a zasunutí skluzu, tak aby při každé krátkodobé změně intenzity vibrací nemusel měnit svoji pozici. Tím by se měl skluz vysunout pouze při delším působení vyšší intenzity vibrací a zasunout při delším působení nižší intenzity. Pro počáteční výpočty je zvolen čas 120 sekund. Tím samozřejmě není pás chráněn před každým kamenem, to ale ani není v požadavcích dolů, neboť např. pouhá změna pozice štítu trvá přibližně jednu minutu. Hlavním cílem je chránit pás při jeho dlouhodobém zatížení kusovitým materiálem.

Nakonec jsou od sebe odečteny hodnoty $\bar{X}_{K\Omega}$ a \bar{X}_K v každém intervalu a tento rozdíl je hledaným identifikátorem kusovitosti materiálu, označený jako Δ . Čím více jsou buzeny vlastní frekvence štítu, tím vyšší je hodnota proměnné Δ . Pokud by byly více buzeny jiné frekvence, bude tato hodnota stále stejná. Dále dojde k zaokrouhlení hodnoty Δ na jednu platnou číslici, tím vzniknou jednotlivé úrovně vypovídající o intenzitě vibrací. Výstupem algoritmu je hodnota 1 nebo 0 (1 pro vysunutí, 0 pro zasunutí štítu), podle toho jak vysoká je hodnota Δ . Tato porovnávací hodnota bude nyní stanovena pouze teoreticky, v budoucnu bude přímo na zařízení odladěna podle požadavků vedení dolů.

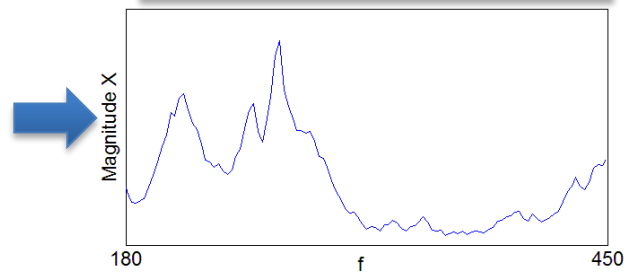
4.4.1 Schéma návrhu charakteristiky



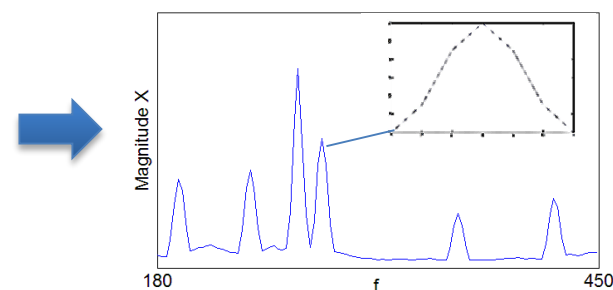
FFT



Úprava frekvenčního rozsahu a
převedení na výkonové spektrum



Použití váhové funkce



Výpočet
průměrné
hodnoty
spektra \bar{X}

Výpočet průměrné
hodnoty
upraveného
spektra \bar{X}_Ω

Průměrná hodnota matic L, M

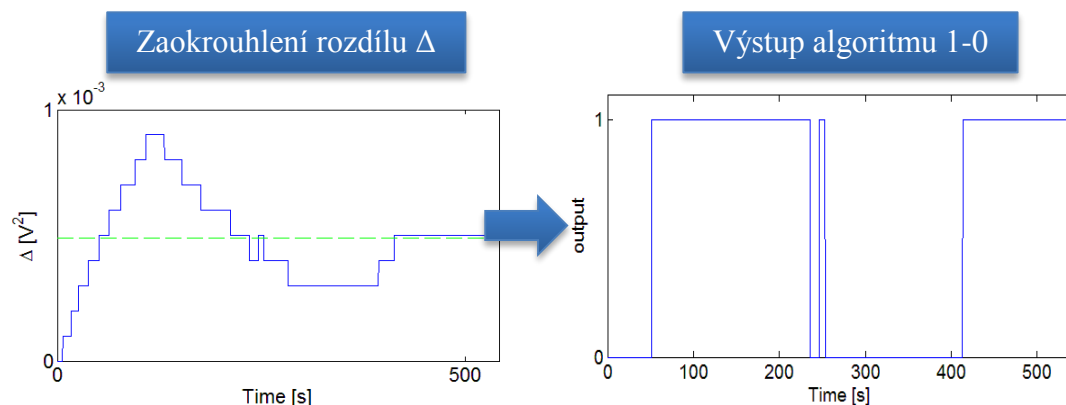
$$\begin{aligned}\bar{X}_K &= \bar{L} \\ \bar{X}_{K\Omega} &= \bar{M}\end{aligned}$$

Záznam do matic L, M

$$\begin{aligned}L(0) &= \emptyset, M(0) = \emptyset \\ L(K) &= \bar{X}, M(K) = \bar{X}_\Omega\end{aligned}$$

Výpočet rozdílu Δ

$$\Delta = \bar{X}_{K\Omega} - \bar{X}_K$$



4.4.2 Vlastní frekvence štítu

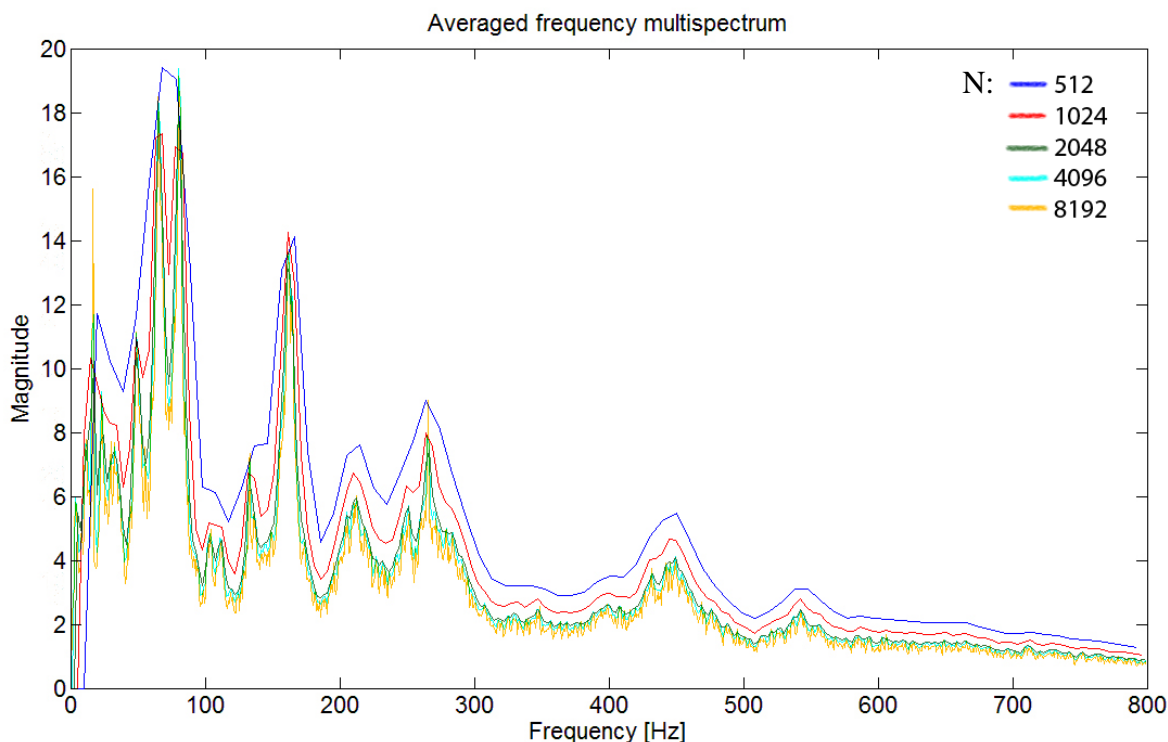
Měření vlastních frekvencí probíhalo na štítu stanice PDX3. Provedeny byly 3 sady měření, buzení pomocí velkého kladiva:

1. Akcelerometr ve středu nahoře, buzení v různých vzdálenostech od akcelerometru ve 3 směrech,
2. Akcelerometr ve středu nahoře, buzení ve středu štítu ve směru pohybu materiálu,
3. Akcelerometr v místech čepů hydrovalců.

Po vyhodnocení byly zjištěny tyto nejvýraznější vlastní frekvence: 188-198 Hz , 238 Hz , 267 Hz , 281 Hz , 364 Hz , 422 Hz . Z nich je dominantní frekvence 364 Hz , kmitání ve směru dopadu materiálu. Tyto data byla převzata od společnosti IDIADA CZ.

4.4.3 Počet vzorků intervalu - porovnání

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1, počet vzorků intervalu (nebo délka intervalu) je dán při použití FFT algoritmu mocninou 2, neboli $N = 2^m$. Při zvyšování počtu vzorků roste frekvenční rozlišení a je možné od sebe odlišit více frekvencí. Rozlišení je dáno vzorcem $\Delta f = f_s / (N - 1)$. Avšak s rostoucím počtem vzorků roste výpočetní náročnost celé operace, proto je třeba zvolit kompromis mezi rozlišením a dobou výpočtu. K tomu pomůže následující graf (viz Obr. 14).



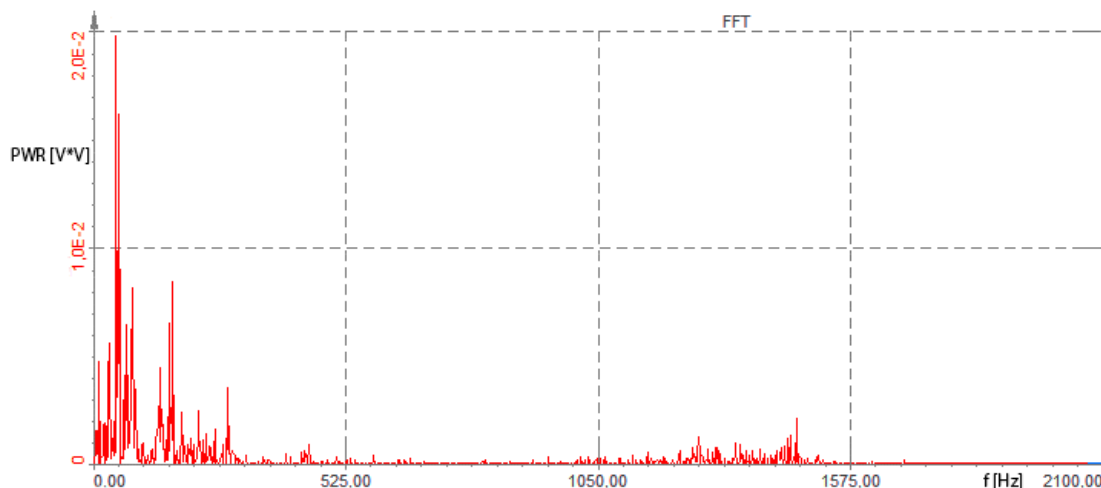
Obr. 14 - Vliv počtu měřených vzorků N

Jak je z grafu patrné, se zvyšujícím se N klesá plocha pod křivkou. Na hodnotě $N = 2048$ se velikost plochy ustálila a s každým dalším zvýšením už roste jen šum. Proto bylo zvoleno $N = 2048$, při kterém lze dostatečně rozlišit jednotlivé frekvence a přitom je křivka v grafu značně vyhlazená.

4.4.4 Frekvenční rozsah analýzy signálu

Frekvenční rozsah je dán vzorkovací frekvencí, která byla při měření 5000 Hz . Kde polovina této frekvence, $f_s/2 = 2500 \text{ Hz}$, se nazývá Nyquistova frekvence. Vzhledem k této frekvenci jsou symetrické absolutní hodnoty koeficientů Fourierovy transformace. Proto lze pro frekvenční charakteristiku signálu použít pouze polovinu frekvenčního rozsahu od 0 Hz do 2500 Hz . Další z podmínek je aby mezní frekvence výchozího nevzorkovaného signálu byla menší, nebo nejvýše rovna polovině vzorkovací frekvence, tj. $f_m \leq f_s/2$. Je to z důvodu oddělení vzájemně posunutých částí Fourierova obrazu vzorkovaného signálu. Pokud by se překrývaly, došlo by ke zkreslení informace obsažené v původním signálu. Tato podmínka se nazývá Shannon-Kotelnikovův teorém. Z tohoto důvodu byl při měření použit anti-aliasingový filtr, nastavený na hodnotu 800 Hz (dalo by se nastavit přímo hodnotu 2500 Hz , ale kvůli převaze vibrací o nižších frekvencích bylo nastaveno 800 Hz). Tím maximální použitelná hodnota rozsahu dále klesne. K dalšímu poklesu dojde díky sestupné hraně filtru, která sniží

frekvenční rozsah do maximální hodnoty $f_m = 800/1,28 = 625 \text{ Hz}$. Na následujícím obrázku (viz Obr. 15) je zobrazen nefiltrovaný signál převedený do frekvenční oblasti. Je vidět, že obsahuje i frekvence vyšší než je 625 Hz , avšak mají velice nízkou intenzitu oproti nižším frekvencím. Toto poukazuje na správnost použití anti-aliasingového filtru.



Obr. 15 - Nefiltrovaný signál

4.5 Porovnání různých vstupních kritérií výpočtu

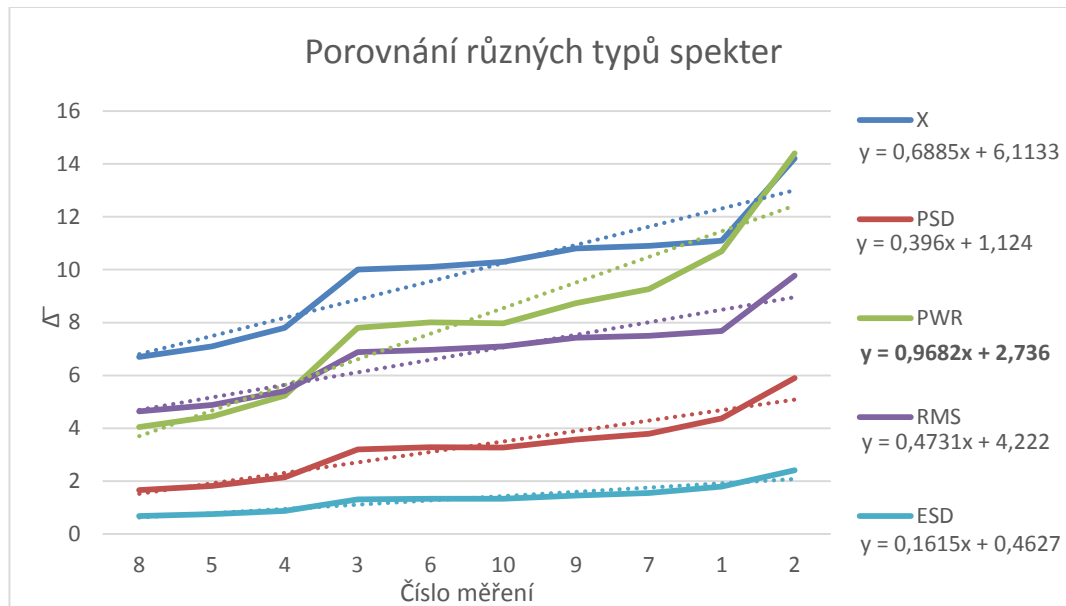
Do výpočtu frekvenčního spektra vstupuje několik kritérií, které mají vliv na výslednou hodnotu proměnné Δ . Proto v této části budou porovnány různé nastavení těchto kritérií. Řadí se mezi ně: typ počítaného spektra, šířka násobeného okolí vlastních frekvencí štítu, typ váhových oken, velikost překrytí intervalů a maximální hodnota vytvořené váhové funkce. K porovnání byla vybrána měření z vratné stanice PDX3, z levého akcelerometru ve směru osy x . Měření mají délku cca 30-60 sekund. Tím že jsou tato měření tak krátká, jsou směrodatnější pro výpočet průměrné hodnoty rozdílu z celého měření $\bar{\Delta}$ (není zcela pravda, průměrování začíná po 120 sekundách, kdy dojde k ustálení této hodnoty), než měření dlouhá. Zároveň je ale nastavené průměrování Δ za posledních 120 sekund, což je více než mají tato měření. Proto bylo každé měření poskládáno do matice 6krát za sebou, přechody mezi nimi částečně zahradí váhové okno. Kritérium pro hodnocení je proměnná $\bar{\Delta}$, ta se spočítá pro každé měření a postupně se mění vstupní kritérium, tabulka je následně seřazena podle prvního sloupce s hodnotami $\bar{\Delta}$ vzestupně. Z tabulky je vytvořen graf, kde pro každý sloupec $\bar{\Delta}$ je vynesena závislost na číslu měření. Ke každé křivce je zobrazena lineární spojnice trendu a v legendě je vypsána její rovnice. Hodnotí se směrnice přímky, čím větší úhel svírá spojnice trendu s osou x , tím více se projevuje závislost na vlastních frekvencích štítu. Tím více jsou také od sebe rozeznatelné (oddělené) jednotlivé intenzity vibrací.

4.5.1 Vliv typu spektra

Porovnáváné typy spekter jsou Amplitudové (X), PSD, PWR, RMS, ESD. Jsou popsány v kapitole 4.3.1. Ze zobrazeného grafu je vidět, že nejlépe vychází výkonové spektrum PWR, se směrnici 0,9682 a nejhůře vychází energetická spektrální hustota ESD, se směrnici 0,1615. Proto bude v algoritmu zvolen výpočet výkonového spektra záznamu.

Tab. 2 - Vliv typu spektra

Spektrum	X	PSD	PWR	RMS	ESD
Číslo měření	$\bar{\Delta}$	$\bar{\Delta}$	$\bar{\Delta}$	$\bar{\Delta}$	$\bar{\Delta}$
8	6,7	1,7	4,1	4,6	0,7
5	7,1	1,8	4,5	4,9	0,8
4	7,8	2,2	5,2	5,4	0,9
3	10,0	3,2	7,8	6,9	1,3
6	10,1	3,3	8,0	7,0	1,3
10	10,3	3,3	8,0	7,1	1,3
9	10,8	3,6	8,7	7,4	1,5
7	10,9	3,8	9,3	7,5	1,6
1	11,1	4,4	10,7	7,7	1,8
2	14,2	5,9	14,4	9,8	2,4



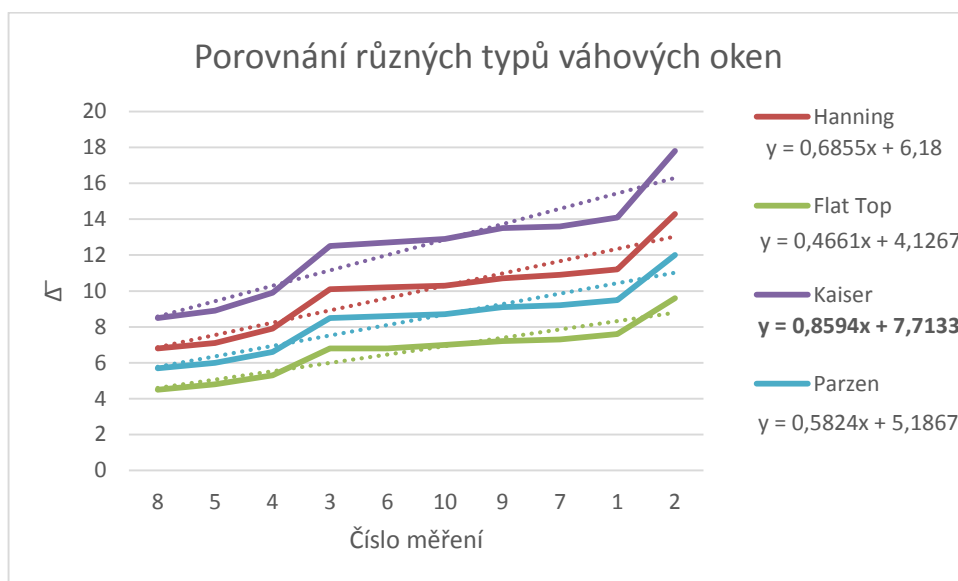
Obr. 16 - Vliv různých typů spekter

4.5.2 Vliv váhových oken

Porovnávána byla okna typu Hanning, Flat Top, Kaiser, Parzen, které se používají nejčastěji. Z grafu je zřejmá nejvyšší směrnice u okna typu Kaiser a nejnižší u okna Flat Top. Okno typu Kaiser bylo nastaveno s parametrem $\beta = 2,5$.

Tab. 3 – Vliv typu váhového okna

Typ okna	Hanning	Flat Top	Kaiser	Parzen
Číslo měření	$\bar{\Delta}$	$\bar{\Delta}$	$\bar{\Delta}$	$\bar{\Delta}$
8	6,8	4,5	8,5	5,7
5	7,1	4,8	8,9	6,0
4	7,9	5,3	9,9	6,6
3	10,1	6,8	12,5	8,5
6	10,2	6,8	12,7	8,6
10	10,3	7,0	12,9	8,7
9	10,7	7,2	13,5	9,1
7	10,9	7,3	13,6	9,2
1	11,2	7,6	14,1	9,5
2	14,3	9,6	17,8	12,0



Obr. 17 - Vliv různých typů váhových oken

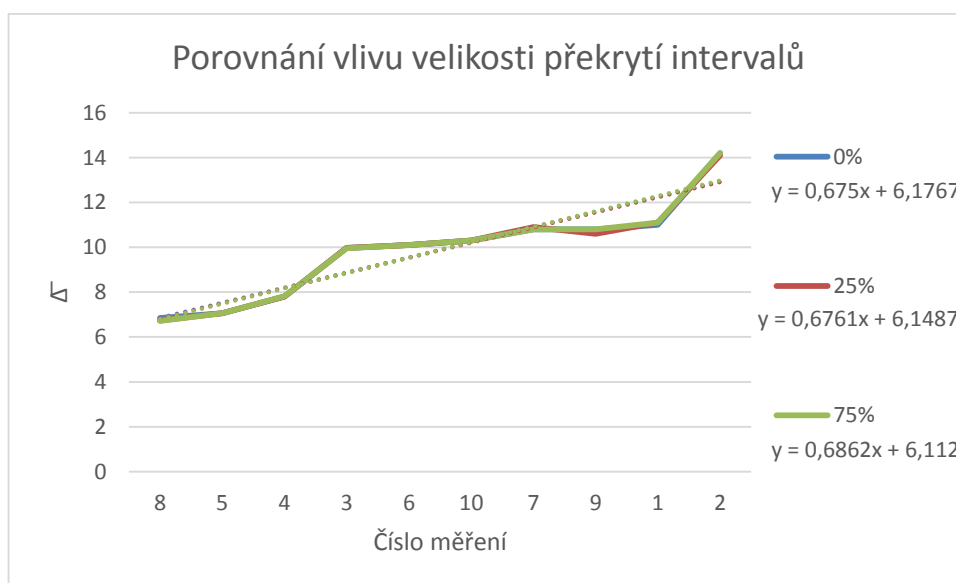
4.5.3 Vliv velikosti překrytí intervalů

Byla porovnávána překrytí intervalů o hodnotách 0%, 25% a 75%. Z grafu je vidět nezávislost na volbě velikosti překrytí. Směrnice se od sebe liší maximálně o 1,5%. Jelikož je ale dle (4) doporučeno překrytí 66,7%, bude použita tato hodnota. Pokud by ale později při

nasazení algoritmu na PLC, překračoval výpočetní čas svoje maximum, je možné toto překrytí snížit, bez citelnějšího vlivu na výsledek výpočtu.

Tab. 4 - Vliv velikosti překrytí intervalů

Překrytí	0%	25%	75%
Číslo měření	$\bar{\Delta}$	$\bar{\Delta}$	$\bar{\Delta}$
8	6,9	6,7	6,7
5	7,1	7,1	7,1
4	7,8	7,8	7,8
3	10,0	10,0	10,0
6	10,1	10,1	10,1
10	10,3	10,3	10,3
7	10,8	10,9	10,8
9	10,8	10,6	10,8
1	11,0	11,1	11,1
2	14,2	14,1	14,2



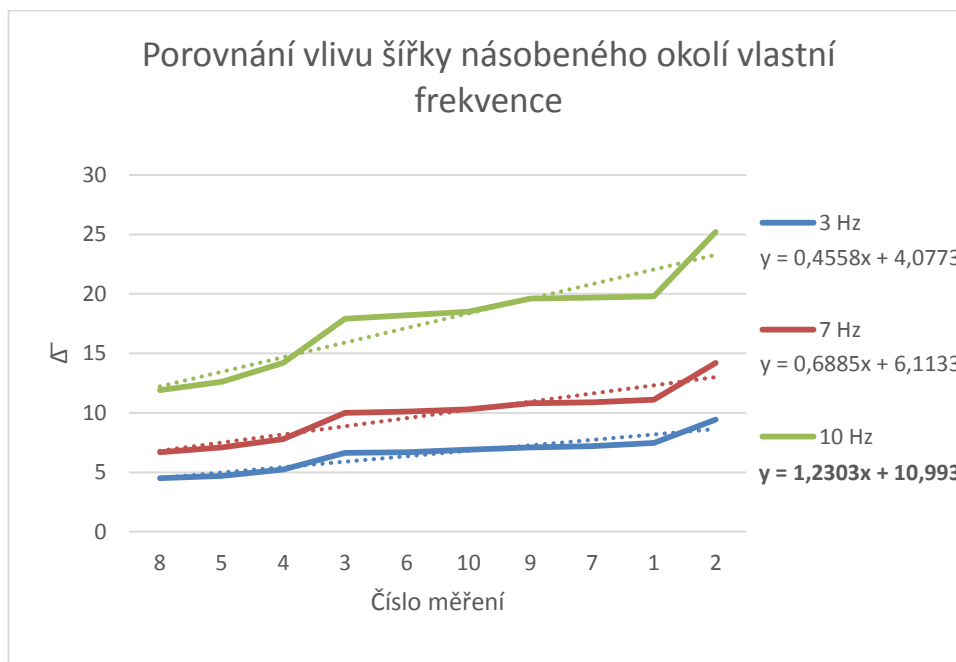
Obr. 18 - Vliv velikosti překrytí intervalů

4.5.4 Vliv šířky násobeného okolí vlastní frekvence

Možností nastavení velikosti šířky násobeného okolí vlastní frekvence je nekonečně mnoho. Pro porovnání byly vybrány hodnoty 3, 7 a 10 Hz. Z grafu je jasně patrné, jak při každém zvětšení šířky roste také velikost směrnice lineární spojnice trendu. Tato práce se soustředí spíše na úzké okolí těchto frekvencí, proto volba tohoto kritéria je individuální záležitost. Je zvolena hodnota ± 7 Hz.

Tab. 5 - Vliv šířky násobeného okolí vlastní frekvence

Velikost okolí	±3 Hz	±7 Hz	±10 Hz
Číslo měření	$\bar{\Delta}$	$\bar{\Delta}$	$\bar{\Delta}$
8	4,5	6,7	11,9
5	4,7	7,1	12,6
4	5,2	7,8	14,2
3	6,6	10,0	17,9
6	6,7	10,1	18,2
10	6,9	10,3	18,5
9	7,1	10,8	19,6
7	7,2	10,9	19,7
1	7,5	11,1	19,8
2	9,4	14,2	25,2



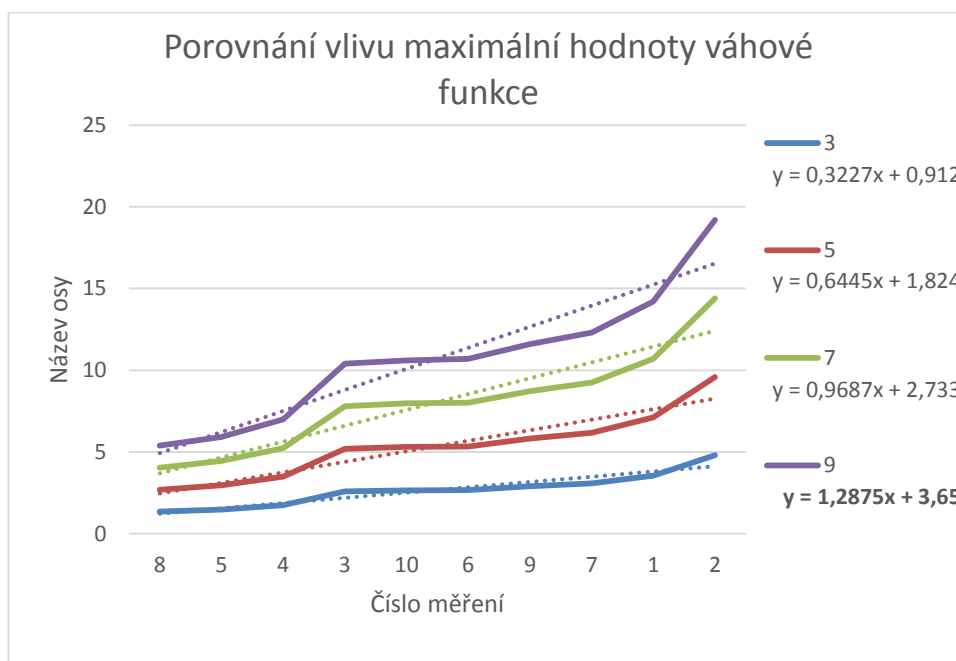
Obr. 19 - Vliv šířky násobeného okolí vlastní frekvence

4.5.5 Vliv maximální hodnoty váhové funkce

Stejně jako v předchozím porovnání, má i tato hodnota nekonečně mnoho možností. Pro porovnání byly zvoleny maximální hodnoty váhové funkce 3, 5, 7 a 9. S rostoucí hodnotou roste i velikost směrnice, viz graf. Samozřejmě čím vyšší toto maximum bude, tím více se zanedbají ostatní frekvence, což také není zcela žádoucí. Tato volba je také značně individuální a bylo zvoleno maximum o velikosti 7.

Tab. 6 - Vliv maximální hodnoty váhové funkce

Max. hodnota	3	5	7	9
Číslo měření	$\bar{\Delta}$	$\bar{\Delta}$	$\bar{\Delta}$	$\bar{\Delta}$
8	1,4	2,7	4,1	5,4
5	1,5	3,0	4,5	5,9
4	1,8	3,5	5,2	7,0
3	2,6	5,2	7,8	10,4
10	2,7	5,3	8,0	10,6
6	2,7	5,3	8,0	10,7
9	2,9	5,8	8,7	11,6
7	3,1	6,2	9,3	12,3
1	3,6	7,1	10,7	14,2
2	4,8	9,6	14,4	19,2



Obr. 20 - Vliv maximální hodnoty váhové funkce

5 Navržení vhodného algoritmu

Pro návrh algoritmu byl zvolen software MATLAB. Základním datovým typem pro výpočty je matice. Software má také množství předprogramovaných funkcí, například použitá funkce pro výpočet FFT. Celý algoritmus se nachází v příloze B, zde budou popsány jeho jednotlivé příkazy.

Datovým vstupem je textový soubor vygenerovaný z programu DEWEsoft. Tento soubor byl vygenerován tak, že obsahuje ve sloupci naměřené hodnoty z akcelerometru pouze ze směru x .

Nyní už samotný popis algoritmu:

- Načtení textového souboru, uloženého na disku a jeho importování do proměnné x .
 - `x = importdata('mer10_levaX_filter.txt');`
- Nastavení počátečních parametrů výpočtu: N je počet vzorků v intervalu, fs je vzorkovací frekvence akcelerometru, $proc$ je procentuelní překrytí intervalů, f_{horni} a f_{dolni} je zvolený frekvenční rozsah spektra, v matici $omega$ jsou uloženy hodnoty vlastních frekvencí štitu, $hodnotici_interval$ je doba v sekundách, z níž se počítá délka matic L, M označená jako K , $rozsah$ odpovídá označení Δf_{Ω} uvedenému výše v textu, $zlom$ je konstanta podle níž se porovnává hodnota Δ pro logický výstup 1 nebo 0.
 - `N = 2048;`
 - `fs = 5000; % [Hz]`
 - `proc = 0.67;`
 - `f_horni = 450; % [Hz]`
 - `f_dolni = 180; % [Hz]`
 - `omega = [193, 238, 267, 281, 364, 422]; % [Hz]`
 - `hodnotici_interval = 120; % [s]`
 - `rozsah = 7; % [Hz]`
 - `zlom = 0.00029;`
- Naměřené hodnoty jsou diskrétní, takže se jim počáteční parametry nemusí přesně rovnat. Proto je třeba hodnoty přepočítat a najít nejbližší hodnotu naměřenou.
 - Je třeba znát, o kolik vzorků budou jednotlivé intervaly překryty. Tato hodnota je dána součinem počtu vzorků N a překrytím $proc$, jehož výsledek je zaokrouhlen na nejbližší nižší celé číslo funkcí $floor$.
 - `prekryti = floor(N*proc);`

- Protože se vyhodnocuje záznam z měření, je třeba znát celkový počet vzorků v záznamu x , ten se zjistí funkcí *size*.
 - $N_{\text{mereni}} = \text{size}(x,1);$
- Pro zkrácení zápisu algoritmu je vypočten krok mezi vzorkovanými frekvencemi
 - $f_0 = f_s/N;$
- Záznam je potřeba rozdělit na intervaly o délce N , s tím že jsou tyto intervaly překryty. Počet intervalů se spočítá jako $N_{\text{mereni}}/(N - \text{překryti})$, od čehož se obvykle odečte hodnota 2, v tomto případě se kvůli proměnnosti překrytí a následnému zaokrouhlení odečítá $\text{překryti}/(N - \text{překryti})$, aby intervaly nepřekročily délku záznamu.
 - $\text{pocet_intervalu} = \text{floor}(N_{\text{mereni}}/(N - \text{překryti}) - \text{překryti}/(N - \text{překryti}));$
- Výpočet pořadí nejbližší hodnoty ve frekvenčním spektru, ze zadaného frekvenčního rozsahu.
 - $f_{\text{pocet_horni}} = \text{round}(f_{\text{horni}}/f_0);$
 - $f_{\text{pocet_dolni}} = \text{round}(f_{\text{dolni}}/f_0);$
- Pro váhovou funkci je také třeba vypočítat za zadaného okolí $\Delta f_{\Omega} = \pm 7 \text{ Hz}$ podíl této hodnoty a frekvenčního rozlišení, kde výsledek je zaokrouhlen na nejbližší vyšší celé číslo, aby byl rozsah vždy minimálně takový, jako je zadaná hodnota. Výsledkem je počet diskrétních hodnot frekvencí odpovídající 7 Hz .
 - $\text{mez} = \text{ceil}(\text{rozsah}/f_0);$
- Váhová funkce $F(i)$ se vytvoří pomocí *for* cyklu, kde v intervalu od 1 do $(\text{mez} * 2 + 1)$ se při každém průchodu vypočítá jedna funkční hodnota. Funkce nabývá hodnot od 1 do 7 a má tvar goniometrické funkce kosinus. Horní mez intervalu má tento tvar, protože okolí Δf_{Ω} je zadáno jednostranně, proto se musí mez zdvojnásobit a zároveň se musí přičíst jednička, která zastupuje vlastní frekvenci štítu, jejíž okolí je násobeno.
 - $\text{for } i = 1:(\text{mez}*2+1)$

$$F(i) = (1+3*(1-\cos(2*\pi*(i-1)/(\text{mez}*2))));$$

$$\text{end};$$
- V dalším kroku následuje vytvoření hodnot pro časovou, frekvenční a intervalovou osu. Vypočte se časový interval mezi vzorky t_s (v teorii označeno jako Δt). Časová osa má hodnoty od 0 do konce měření, což je dáno součinem časového intervalu a počtem těchto intervalů. Krok mezi hodnotami osy je t_s . Frekvenční osa je dána nejbližší diskrétní hodnotou k zadaným 180 Hz s krokem f_0 sahá až po nejbližší hodnotu k zadaným

450 Hz. Intervalová osa je v sekundách a představuje čas na konci každého intervalu o délce N . Z důvodu překrývání intervalů je krok osy součin ts a rozdílu $(N - \text{prekryti})$.

- $ts = 1/fs$;
- $\text{time} = 0:ts:(N_{\text{mereni}}-1)*ts$;
- $f = f_0*(f_pocet_dolni):f_0:f_0*(f_pocet_horni)$;
- $\text{int} = N*ts:(N-\text{prekryti})*ts:((\text{pocet_intervalu}-1)*(N-\text{prekryti})+N)*ts$;
- Ze zadané hodnoty *hodnotici_interval*, která je v sekundách, je nutné určit, kolik intervalů o délce N tento čas představuje. Je třeba dát pozor na překrytí intervalů, protože se uvažuje absolutní čas. Proto je od N odečteno *prekryti*. Na čas se tento počet hodnot převede vynásobením časovým intervalem ts . Dostane se čas jednoho intervalu, kterým se vydělí proměnná *hodnotici_interval* a nakonec zaokrouhlení na nejbližší nižší celé číslo, aby se nepřekročil zadaný čas.
 - $K = \text{floor}(\text{hodnotici_interval}/(ts*(N-\text{prekryti})))$;
- Pro omezení možné chyby algoritmu, byla přidána podmínka, pokud je zadaný čas větší než doba celého měření, tak se zadaný čas sníží na dobu měření.
 - if $K > \text{pocet_intervalu}$

$K = \text{pocet_intervalu}$;

end
- Pro další výpočty je nutné nadefinovat počáteční proměnné, které obsahují pouze nulové hodnoty. Jejich význam bude vysvětlen dále v textu.
 - $X_{\text{mean_value}} = 0$;
 - $X_{\text{mean_value_omega}} = 0$;
 - $X_{\text{pr}} = \text{zeros}(1, \text{pocet_intervalu})$;
 - $X_{\text{prK}} = \text{zeros}(1, \text{pocet_intervalu})$;
 - $X_{\text{prK_Om}} = \text{zeros}(1, \text{pocet_intervalu})$;
 - $\Delta = \text{zeros}(1, \text{pocet_intervalu})$;
 - $\text{vystup} = \text{zeros}(1, \text{pocet_intervalu})$;
 - $L = \text{zeros}(1, K)$;
 - $M = \text{zeros}(1, K)$;
- Nyní už jádro celého algoritmu, kterým je práce s jednotlivými intervaly záznamu. Vše probíhá v cyklu od prvního intervalu až do posledního.
 - for $i = 1:\text{pocet_intervalu}$

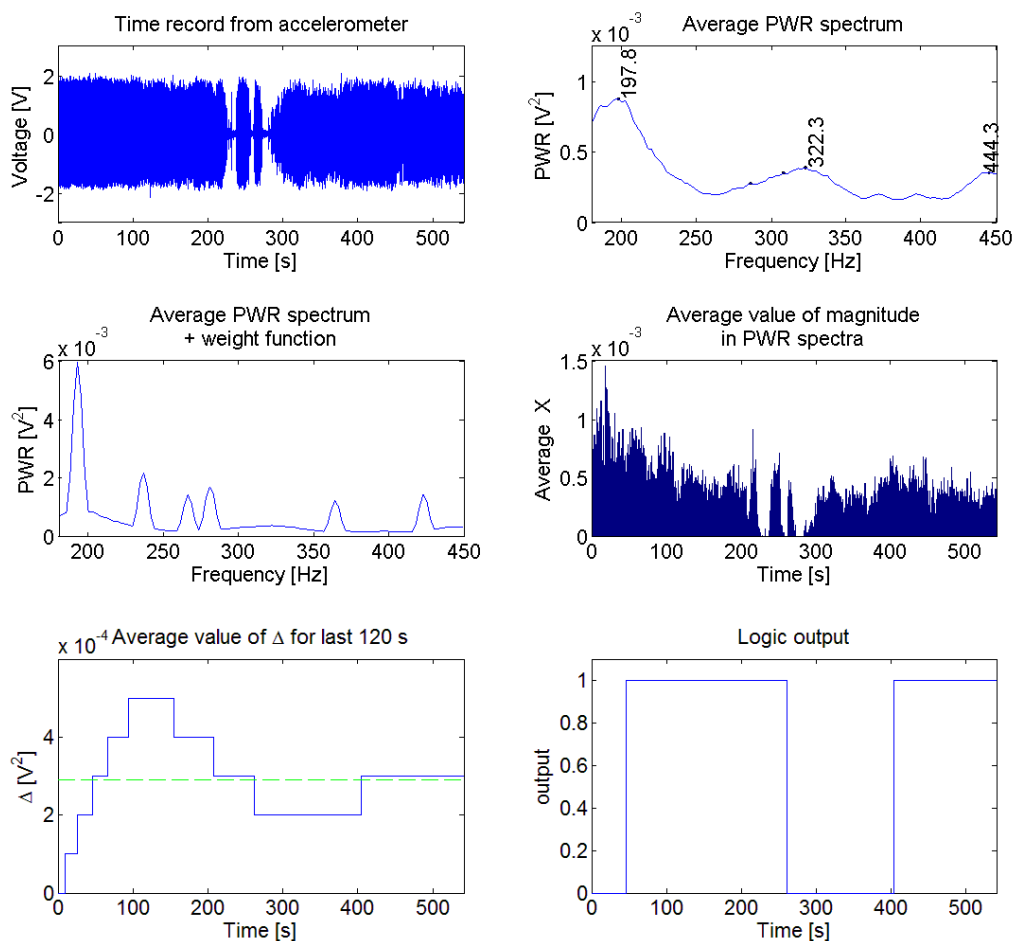
- Z celého záznamu x se vybere interval o délce N , podle toho v kolikátém cyklu se výpočet nachází (i). A uloží se do matice $x1$. Interval se v každém cyklu posune o hodnotu, která je dána rozdílem $(N - \text{prekryti})$.
 - $x1 = x(N*(i-1)-\text{prekryti}*(i-1)+1:N*(i)-\text{prekryti}*(i-1));$
- Vybraný interval se vynásobí Kaiserovým oknem s nastaveným parametrem $\beta = 2,5$.
 - $x1 = x1.*\text{kaiser}(N,2.5);$
- Teprve nyní se provede rychlá Fourierova transformace, pomocí příkazu *fft*. Popis toho příkazu je k dispozici v nápovědě MATLABu (9). Po transformaci se vypočítá absolutní hodnota všech vzorků a výsledek je uložen do matice X .
 - $X = \text{abs}(\text{fft}(x1));$
- Po převedení hodnot do frekvenční oblasti, je možné vybrat jen potřebnou frekvenční oblast. Ta byla zadána od 180 Hz do 450 Hz. Výběr je uložen do nové matice X_half .
 - $X_half = X(f_pocet_dolni:f_pocet_horni)';$
- Tento výběr se převede na výkonové spektrum.
 - $X_half = 2*(X_half/N).^2;$
- K matici $Xmean_value$ se v každém cyklu přičte matice X_half , po skončení cyklu z ní bude vypočítáno průměrné frekvenční spektrum celého záznamu.
 - $Xmean_value = Xmean_value + X_half;$
- Vypočte se průměrná hodnota amplitudy vybraného intervalu.
 - $Xpr(i) = \text{mean}(X_half);$
- Pro výpočet průměrné hodnoty amplitud spektra za posledních 120 sekund měření, byla před začátkem cyklu definována matice L . Nejprve se z ní vždy odstraní první hodnota a poté se na její konec přidá hodnota průměru $Xpr(i)$. Tím je zajištěna konstantní délka matice, odpovídající 120 sekundám. Poté se z ní vypočítá průměr a uloží se do matice $XprK$.
 - $L(1) = [];$
 - $L = [L, Xpr(i)];$
 - $XprK(i) = \text{mean}(L);$
- Pro použití váhové funkce, se matice X_half nakopíruje do matice X_omega . Tento krok je zde spíše pro názornost. Pro urychlení algoritmu je možné počítat přímo s X_half .

- $X_{\omega} = X_{\text{half}}$;
- Váhová funkce se aplikuje v cyklu, kdy při každém průchodu je násobeno okolí jedné vlastní frekvence štítu. Nejprve je třeba najít, na jaké pozici se v intervalu nachází daná vlastní frekvence a od této hodnoty se odečte pozice dolní meze frekvenčního rozsahu, protože bylo frekvenční spektrum oříznuto. Poté se vybere v matici X_{ω} okolí pozice vlastní frekvence, které je dáno hodnotou *mez*. Toto rozmezí má stejný počet hodnot jako navržená váhová funkce a může dojít k jejich vynásobení. Výsledkem součinu se přepíší původní hodnoty v matici X_{ω} .
 - for j = 1:size(omega,2)
 - cislo = round(omega(j)/(fs/N))-f_pocet_dolni+1;
 - $X_{\omega}(\text{cislo}-\text{mez}:\text{cislo}+\text{mez}) = X_{\omega}(\text{cislo}-\text{mez}:\text{cislo}+\text{mez}).*F$;
 - end;
- Dále se provedou ekvivalentní výpočty průměrných hodnot, jako to bylo v případě matic $X_{\text{mean_value}}$, L a $X_{\text{pr}K}$, změna je pouze ve vstupních datech, která jsou přenásobena váhovou funkcí.
 - $X_{\text{mean_value_}\omega} = X_{\text{mean_value_}\omega} + X_{\omega}$;
 - $M(1) = []$;
 - $M = [M, \text{mean}(X_{\omega})]$;
 - $X_{\text{pr}K_Om}(i) = \text{mean}(M)$;
- Nakonec je vypočten rozdíl z i -tých hodnot $X_{\text{pr}K}(i)$ a $X_{\text{pr}K_Om}(i)$, výsledek uložen do matice *Delta* (v textu označeno Δ). Tato hodnota se následně zaokrouhlí na jednu platnou číslici, tím vzniknou úrovně odpovídající intenzitě vibrací. Hodnota $Delta(i)$ se porovná s hodnotou konstanty *zlom*, pokud je větší, je výstup 1, jinak 0. Jednička značí vysunutí štítu, nula zasunutí. Tím končí celý cyklus pro vybraný interval a výpočet se opakuje na dalších až do posledního.
 - $Delta(i) = X_{\text{pr}K_Om}(i) - X_{\text{pr}K}(i)$;
 - $Delta(i) = \text{round}(Delta(i)*10000)/10000$;
 - if $Delta(i) > \text{zlom}$
 - vystup(i) = 1;
 - else
 - vystup(i) = 0;
- end;

- end;
- Po skončení cyklu se provedou dodatečné výpočty potřebné k číselné a obrazové analýze všech měření. Jsou vypočtena a zobrazena průměrná frekvenční spektra, časový záznam výchylek z akcelerometru, průběh matic *Delta* a *vystup* v čase.
- Výpočet průměrného frekvenčního spektra celého záznamu před i po použití váhové funkce. Hodnoty, které se v každém cyklu sčítaly, se nyní podělí celkovým počtem intervalů v záznamu.
 - $X_{mean_value} = X_{mean_value} / \text{pocet_intervalu}$;
 - $X_{mean_value_omega} = X_{mean_value_omega} / \text{pocet_intervalu}$;
- Výpočet souřadnic a hodnot frekvencí s nejvyšší amplitudou, pomocí funkce *findpeaks*. V jejích vlastnostech se nastaví třídění výsledků od největší po nejmenší hodnotu (*SORTSTR*), počet vrcholů (*NPEAKS*) a minimální vzdálenost mezi vrcholy (*MINPEAKDISTANCE*). Pak se do proměnné *OMEGA* uloží hodnoty frekvencí, na kterých se vrcholy nachází.
 - `[pks,locs] = findpeaks(Xmean_value, 'SORTSTR', 'descend', 'NPEAKS', 5, 'MINPEAKDISTANCE', 5);`
 - `OMEGA = f(locs);`
- Pro celkové hodnocení jednotlivých záznamů, je vypočtena průměrná hodnota *DeltaPr* (v textu označeno $\bar{\Delta}$) z matice *Delta*, s tím že se vyberou hodnoty, které začínají až po 120 sekundách od počátku měření. Tím se odstraní vliv nulových hodnot z matic *L*, *M*, které se po této době zcela zruší.
 - `begin = round(120/((N-prekryti)*ts));`
 - `DeltaPr = mean(Delta(begin:end));`
- Vykreslí se graf, ve kterém je zobrazen průběh výchylek napětí v čase z použitého akcelerometru. Funkcí *axis* se nastaví minimální a maximální hodnoty os.
 - `subplot(2,2,1);`
 - `plot(time,x);`
 - `xlabel('Time [s]');`
 - `ylabel('Voltage [V]');`
 - `title('Time record from accelerometer');`
 - `axis([0 max(time) -3 3]);`

- Další graf vykresluje zprůměrované výkonové spektrum celého záznamu, do kterého jsou zakresleny hodnoty frekvencí s největší amplitudou, které byly vypočítány výše (*pks*, *locs*).
 - `subplot(2,2,2);`
 - `plot(f, Xmean_value), hold on`
 - `plot(f(locs),pks+0.05,'k.','markerfacecolor',[1 0 0]), hold off`
 - `strValues = num2str(OMEGA(:),4);`
 - `text(OMEGA,pks+1,strValues,'VerticalAlignment','cap', 'Rotation', 90, ...`
 - `'HorizontalAlignment', 'left');`
 - `xlabel('Frequency [Hz]);`
 - `ylabel('PWR [V^2]);`
 - `title('Average PWR spectrum');`
 - `axis([f_dolni f_horni 0 0.00125]);`
- Třetí graf je vykreslení zprůměrovaného frekvenčního spektra celého záznamu vynásobeného váhovou funkcí.
 - `subplot(2,2,3);`
 - `plot(f, Xmean_value_omega);`
 - `xlabel('Frequency [Hz]);`
 - `ylabel('PWR [V^2]);`
 - `title({' '; 'Average PWR spectrum'; '+ weight function'});`
 - `axis([f_dolni f_horni 0 0.006]);`
- Následující graf zobrazuje průběh průměrné hodnoty amplitudy výkonového spektra v čase každého intervalu
 - `subplot(2,2,4);`
 - `bar(int, Xpr);`
 - `xlabel('Time [s]);`
 - `ylabel('Average X');`
 - `title({' '; 'Average value of magnitude'; 'in PWR spectra'});`
 - `axis([0 max(int) 0 0.0015]);`
- Další graf vykresluje průběh hodnoty Δ v závislosti na čase jednotlivých intervalů.
 - `figure(2);`
 - `subplot(2,2,1);`
 - `plot(int, Delta);`

- `xlabel('Time [s]');`
- `ylabel('Average magnitude');`
- `title(['Average value of magnitude for last ', num2str(hodnotici_interval), ' s']);`
- `axis([0 max(int) 0 0.0006]);`
- `line('XData', [0 max(int)], 'YData', [zlom zlom], 'LineStyle', '--', 'Color','g');`
- Poslední graf vykresluje logický výstup algoritmu, hodnota 1 znamená vysunutí štítu, hodnota 0 zasunutí.
 - `subplot(2,2,2);`
 - `plot(int, vystup);`
 - `xlabel('Time [s]');`
 - `ylabel('output');`
 - `title('Logic output');`
 - `axis([0 max(int) 0 1.1]);`



Obr. 21 - Grafický výstup z navrženého algoritmu

5.1 Doporučení pro naprogramování průmyslového počítače

Pro algoritmus, který bude použit na průmyslovém počítači (PLC), který bude nainstalován na pohonné stanici, je důležité, aby byl co nejjednodušší. Je to z důvodu výpočetní náročnosti. PLC musí být schopno zpracovat každý naměřený interval o počtu vzorků N s tím, že jsou jednotlivé intervaly překryty a to čas dále zkracuje. Tato doba je dána vzorcem $t = \frac{(N - \text{překryti})}{f_s}$, což při daných hodnotách vede k času 0,135 s. Proto výše navržený algoritmus, který byl uzpůsoben analyzování již změřených dat, je třeba upravit pro kontinuální vyhodnocování vibrací.

- Nejprve se při spuštění skriptu nastaví a vypočítají počáteční podmínky.

```
N = 2048;
fs = 5000; % [Hz]
proc = 0.67;
f_horni = 450; % [Hz]
f_dolni = 180; % [Hz]
omega = [193, 238, 267, 281, 364, 422]; % [Hz]
hodnotici_interval = 120; % [s]
rozsah = 7; % [Hz]
zlom = 0.00029;
překryti = floor(N*proc);
f0 = fs/N;
f_pocet_horni = round(f_horni/f0);
f_pocet_dolni = round(f_dolni/f0);
mez = ceil(rozsah/f0);
for i = 1:(mez*2+1)
    F(i) = (1+3*(1-cos(2*pi*(i-1)/(mez*2))));
end;
ts = 1/fs;
K = floor(hodnotici_interval/(ts*(N-překryti)));
XprK = zeros(1,pocet_intervalu);
XprK_Om = zeros(1,pocet_intervalu);
Delta = zeros(1,pocet_intervalu);
vystup = zeros(1,pocet_intervalu);
L = zeros(1,K);
```

```
M = zeros(1,K);
```

- Nyní pro výpočet jednotlivých intervalů o délce N je nutné ukládat data postupně do třech proměnných (matic), protože se intervaly překrývají z 67%. Nebo je možné použít i jednu matici o velikosti minimálně $3N$, pro záznam z akcelerometru a k němu druhou matici, která si z ní bude vybírat postupně úseky o délce N s daným překrytím.

```
for i = 1:pocet_intervalu
```

```
    x = importdata('...');
```

```
    x1 = x(N*(i-1)-prekryti*(i-1)+1:N*(i)-prekryti*(i-1));
```

```
    x1 = x1.*kaiser(N,2.5);
```

```
    X = abs(fft(x1));
```

```
    X_half = X(f_pocet_dolni:f_pocet_horni)';
```

```
    X_half = 2*(X_half/N).^2;
```

```
    L(1) = [];
```

```
    L = [L, mean(X_half)];
```

```
    XprK = mean(L);
```

```
    for j = 1:size(omega,2)
```

```
        cislo = round(omega(j)/(fs/N))-f_pocet_dolni+1;
```

```
        X_half(cislo-mez:cislo+mez) = X_half(cislo-mez:cislo+mez).*F;
```

```
    end;
```

```
    M(1) = [];
```

```
    M = [M, mean(X_half)];
```

```
    XprK_Om = mean(M);
```

```
    Delta = XprK_Om-XprK;
```

```
    Delta(i) = XprK_Om(i)-XprK(i);
```

```
    Delta(i) = round(Delta(i)*10000)/10000;
```

```
    if Delta(i) > zlom
```

```
        vystup(i) = 1;
```

```
    else
```

```
        vystup(i) = 0;
```

```
    end;
```

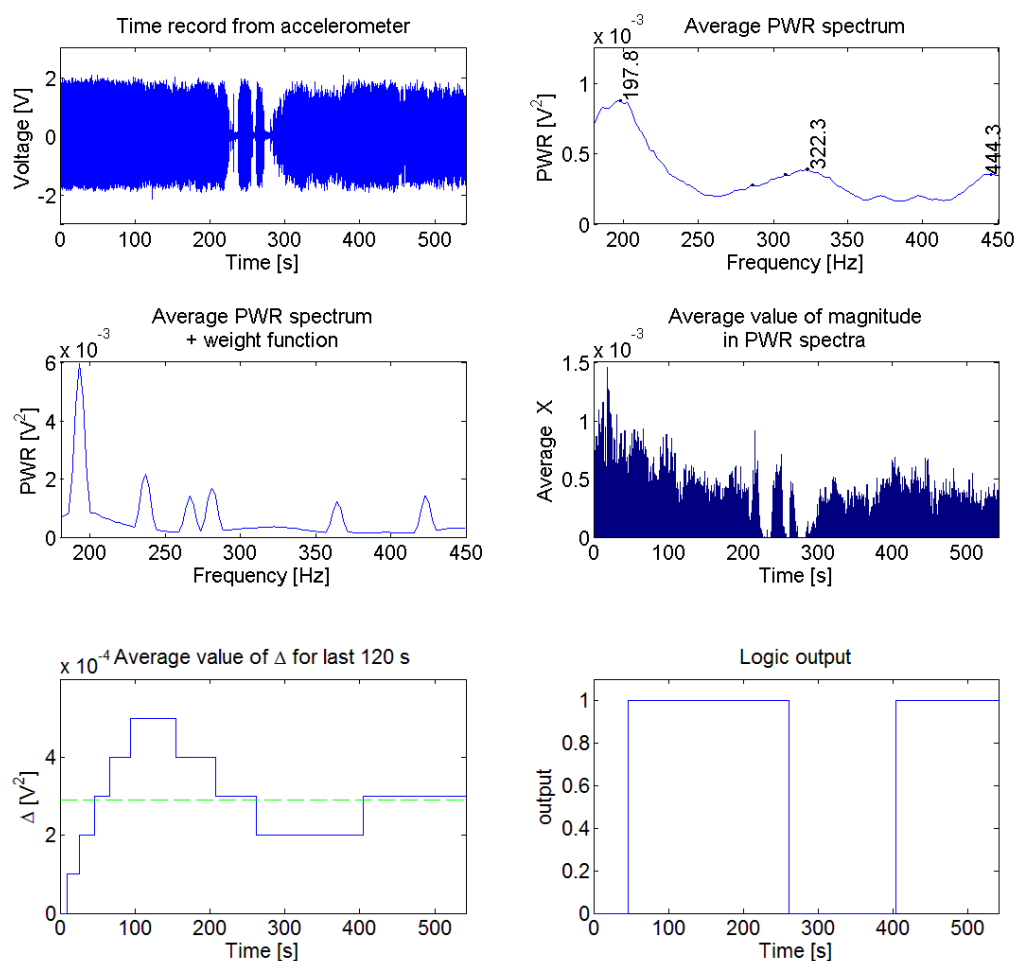
```
end;
```

6 Ověření algoritmu

Ověření algoritmu v této fázi je pouze simulační z naměřených dat, jelikož není na pohonné stanici nainstalovaný průmyslový počítač pro vyhodnocování měření. Budou analyzována data z 25. 4. 2014, na kterých jsou zachyceny dostatečně dlouhé časové intervaly, přibližně 8 minut. Budou zde popsány výstupy ze všech záznamů, zobrazen bude pouze jeden. Ostatní výstupy jsou uvedeny v příloze (Příloha A). Většina grafů má nastavené limitní hodnoty os, tak aby porovnání mezi jednotlivými měřeními bylo více objektivní. Pouze u měření číslo 1 na stanici 2 nebyly tyto limity nastaveny z důvodu nízké intenzity vibrací.

6.1 Měření číslo 1, stanice PDX3

Pohledem na první graf (viz Obr. 22), je vidět záznam, který má prvních 200 s poměrně pravidelný průběh. Od času 200 s do 300 s jsou zde tři mezery, kdy po pásu nebylo nic přepravováno. Od 300 s je průběh záznamu nepravidelný, ale s poměrně vysokou amplitudou. Na dalším grafu, který reprezentuje průměrné výkonové spektrum celého měření, jsou tři hlavní vrcholy na frekvencích 197,8 Hz, 322,3 Hz a 444,3 Hz. Je vidět, jak je energie jednotlivých frekvencí rozprostřena v celém spektru, nejsou zde žádné výrazné frekvence. Frekvence 197,8 Hz je velice blízká vlastní frekvenci štítu, proto po vynásobení spektra váhovou funkcí je tato frekvence nejvýraznější. Čtvrtý graf vykresluje průběh průměrné hodnoty amplitud v jednotlivých intervalech délky N . Intenzita vibrací je nejvyšší na počátku s následným pozvolným poklesem až ke zmíněným mezerám, poté už kolísá okolo hodnoty $0,005 \text{ V}^2$. Tento graf nejvíce koresponduje s následujícím grafem vyjadřujícím závislost proměnné Δ . Její hodnota zpočátku měření vždy postupně roste. Je zde patrné určité časové zpoždění oproti záznamu z akcelerometru, způsobené počátečním nastavením nul v maticích L, M . Poslední graf znázorňuje logický výstup pro řízení štítu, kdy při hodnotě 1 se štít vysouvá a při hodnotě 0 zasouvá.



Obr. 22 - Výstup z měření 1 na stanici PDX3

6.2 Měření číslo 2, stanice PDX3

Signál tohoto záznamu (viz Obr. 23) působí velice vyrovnaně, s jedinou mezerou kolem času 500 s. Na konci záznamu jsou vibrace minimální, nebyl přepravován žádný materiál. Ve výkonovém spektru jsou dva vrcholy na 188 Hz a 319,8 Hz, s tím že první zmíněná frekvence je blízká vlastní frekvenci štítu, proto má po vynásobení spektra váhovou funkcí tato frekvence největší amplitudu. Průběh proměnné Δ koresponduje s grafem průměrných amplitud, ve kterém jsou tři výraznější poklesy hodnoty průměru. Proto jsou i v průběhu Δ tyto poklesy viditelné. Při rostoucí kusovitosti materiálu se zároveň zvyšuje amplituda kmitů štítu při dopadu tohoto materiálu.

6.3 Měření číslo 1, stanice PD520

Toto měření (viz Obr. 24) proběhlo v době, kdy nebyl dopravován žádný materiál, proto jsou amplitudy vibrací téměř nulové. Ve výkonovém spektru jsou viditelné dvě výrazné

frekvenční složky 205,1 Hz a 285,6 Hz. Jsou způsobené deterministickým signálem od mechanických systémů na stanici, které pracují neustále. Pozor ale na měřítko os, které je u tohoto měření odlišné. Průběh proměnné Δ je vzhledem k téměř nulové intenzitě vibrací nulový, stejně tak logický výstup.

6.4 Měření číslo 2, stanice PD520

Signál z akcelerometru v tomto měření (viz Obr. 25) je velice nepravidelný, s četným výskytem téměř nulových amplitud. Tomu také odpovídá výkonové spektrum, které má celkově menší plochu pod křivkou než měření na stanici 1. Díky nízké intenzitě vibrací v celém měření, nedosahuje hodnota proměnné Δ úrovně potřebné pro vysunutí štítu.

6.5 Měření číslo 3, stanice PD520

V tomto měření (viz Obr. 26) je průběh vibrací štítu velice podobný předchozímu měření. V signálu akcelerometru je množství míst s téměř nulovou amplitudou. Výkonové spektrum je pak také velice podobné. Výstup z algoritmu je nulový tzn., štít bude v zasunuté pozici.

6.6 Měření číslo 4, stanice PD520

Poslední měření (viz Obr. 27) už vykazuje signál z akcelerometru více pravidelný. Jsou zde tři mezery, na začátku měření, okolo 80 s a 400 s. Průběh výkonového spektra je opět podobný předchozím dvěma. Průběh proměnné Δ je stále pod úrovní potřebné k vysunutí štítu. To je způsobeno nízkou kusovitostí materiálu, který by více vybudil vlastní frekvence štítu. Výstup je tedy také hodnota 0.

7 Závěr

Hlavním cílem práce bylo navrhnout algoritmus automatického výsunu štítu, tzn. navrhnout vhodný způsob měření kusovitosti a tvrdosti přepravované horniny a dále najít vhodný způsob měření a algoritmus vyhodnocení naměřených vibrací.

Byl nastíněn princip přepravy materiálu od kolesového rypadla k zakladači. Bylo popsáno problémové místo, kde dochází ke snižování životnosti dopravníkových pásů. V tomto uzlu, na štítu, byly měřeny vibrace. Ty byly charakterizovány z hlediska náhodnosti signálu. Jako nejvhodnější místo pro měření vibrací s ohledem na nejvyšší intenzitu vibrací od dopravovaného materiálu a bezpečné dostupnosti pro obsluhu byl vybrán štít umístěný na pohonné stanici. Konkrétně, místo upevnění štítu k tlumiči v horním rohu štítu.

Byla navržena metoda vyhodnocování měření, která využívá znalosti buzení vlastních frekvencí štítu při dopadu materiálu. Byla zavedena proměnná Δ , která charakterizuje kusovitost materiálu. Odpovídá průměrné intenzitě vibrací za posledních 120 s záznamu, tento čas je možné upravovat podle potřeb vedení dolů a podle výsledků měření po zprovoznění PLC na stanici. Díky zaokrouhlení Δ na jednu platnou číslici byly vytvořeny hladiny odpovídající intenzitě vibrací. Obsluha rypadla vždy uvidí aktuální hodnotu hladiny a bude mít možnost dlouhodobě kontrolovat správnost algoritmu, protože zároveň vidí jaký materiál je těžen.

Algoritmus byl navržen ve vývojovém prostředí softwaru Matlab, tak aby nedocházelo k velice častým změnám polohy štítu z důvodu dlouhé doby změny své pozice. Proto ani není možné reagovat na náhlou změnu charakteru přepravovaného materiálu. Navíc štít bude vysunut pouze při nejvyšších intenzitách vibrací a nenastává často situace, kdy po velkém množství kamení je skokově přepravován lepivý jílovitý materiál. Pokud by tato situace nastala, obsluha rypadla bude mít možnost manuálně štít zasunout.

Ověření algoritmu proběhlo na dříve naměřených datech, jelikož PLC není na stanici ještě nainstalované.

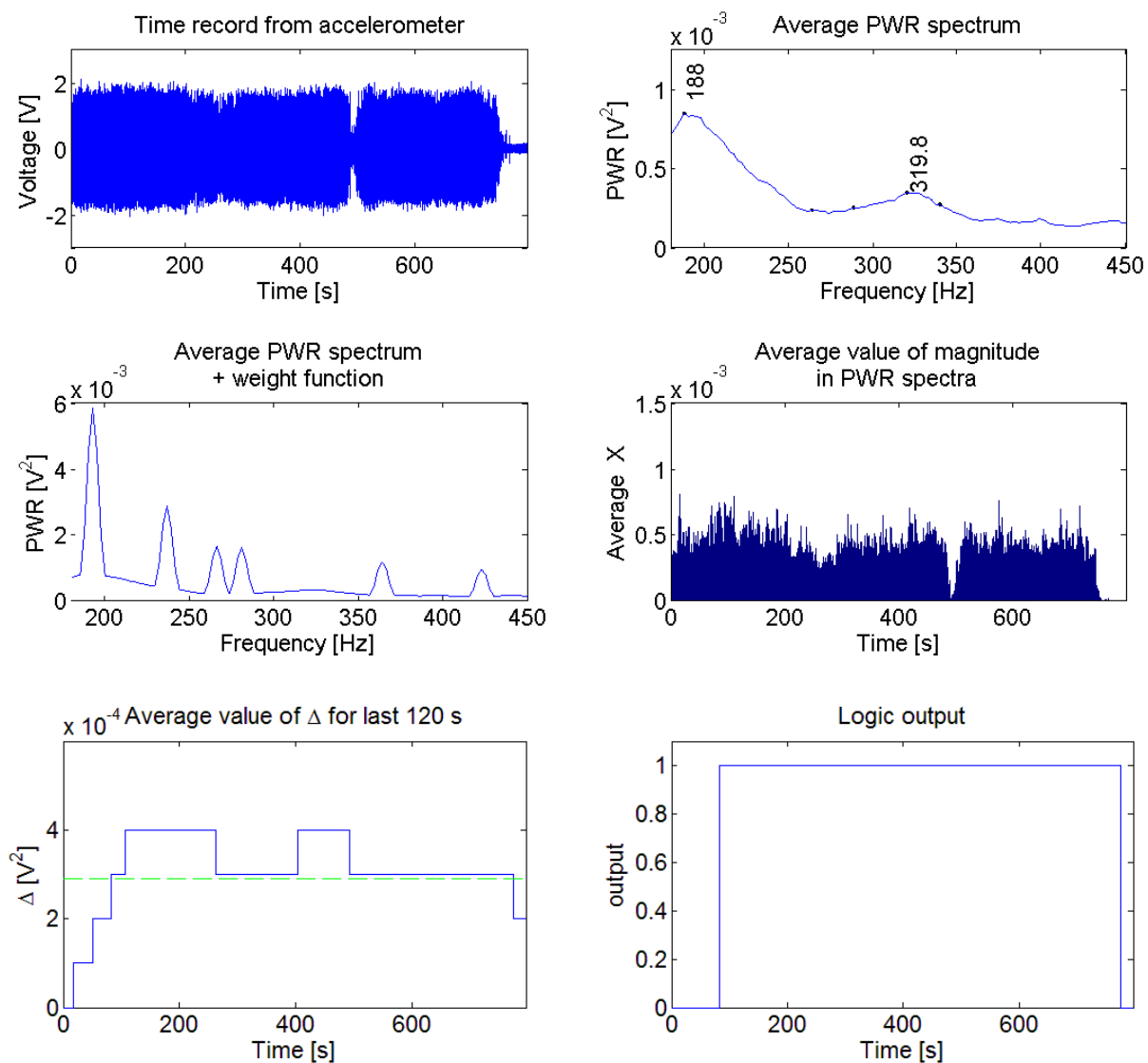
Přínosem této práce je navržený algoritmus, který bude použit pro automatické řízení výsuvu skluzu vratné stanice. To bude mít za následek zvýšení životnosti dopravníkových pásů, na jejichž údržbu jsou vynakládány nemalé finanční prostředky.

Je důležité dostatečně informovat obsluhu pohonné stanice o tom, aby byla pozice štítu nastavena v neustálém kontaktu s dopravovaným materiálem. Tím bude zajištěna vypovídající schopnost měřených vibrací.

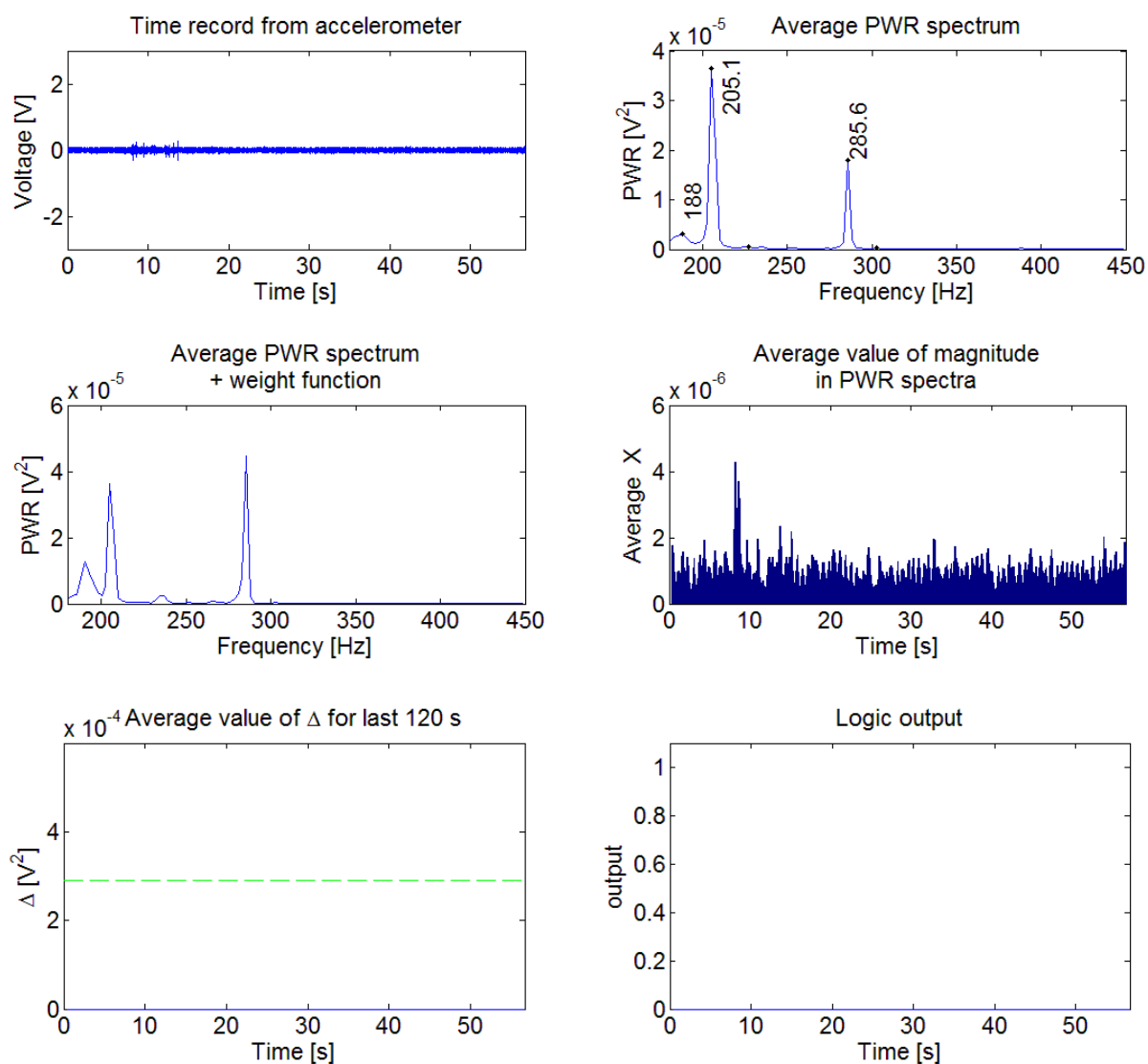
Citovaná literatura

1. **RADA PRO VÝZKUM, VÝVOJ A INOVACE.** Projekty VaVaI. *Informační systém výzkumu, experimentálního vývoje a inovací.* [Online]
<http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=FR-TI4/310>.
2. **BOCKO, P., PETŘÍKOVÁ, I., MARVALOVÁ, B., BLEKTA, J., SKAROLEK, A.** INCREASING OF WORKING LIFE OF CONVEYOR BELTS. *The International Journal of TRANSPORT & LOGISTICS*. 2012, Sv. 12/2012, 25/2012.
3. **VEVERKA, J.** Výroční zpráva za rok 2011. *Web NOEN*. [Online] [Citace: 9. Duben 2014.] http://www.noen.cz/download/Vyrocní_zpráva_noen_2011.pdf.
4. **TŮMA, J.** *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha : Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901936-1-7.
5. **BILOŠOVÁ, A.** Digitální zpracování signálů. *VŠB Katedra mechaniky*. [Online]
http://www.337.vsb.cz/materialy/zaklady_experimentalni_mechaniky/EXPME_3.pdf.
6. **COOLEY, J. W., TUKEY, J.W.** An algorithm for machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of Computation*. 1965, Sv. 19, 90, stránky 297-301.
7. **FIELDING-DSP.** *Alias-Free Harmonic Distortion*. [Online]
<http://www.fieldingdsp.com/alias>.
8. **OPPENHEIM, A.V., SCHAFER, R.W.** *Digital signal processing*. New Jersey : Prentice Hall, 1975. ISBN 0-13-214635-5.
9. **MATHWORKS.** FFT. *Documentation Center*. [Online] [Citace: 26. Duben 2014.]
<http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html>.

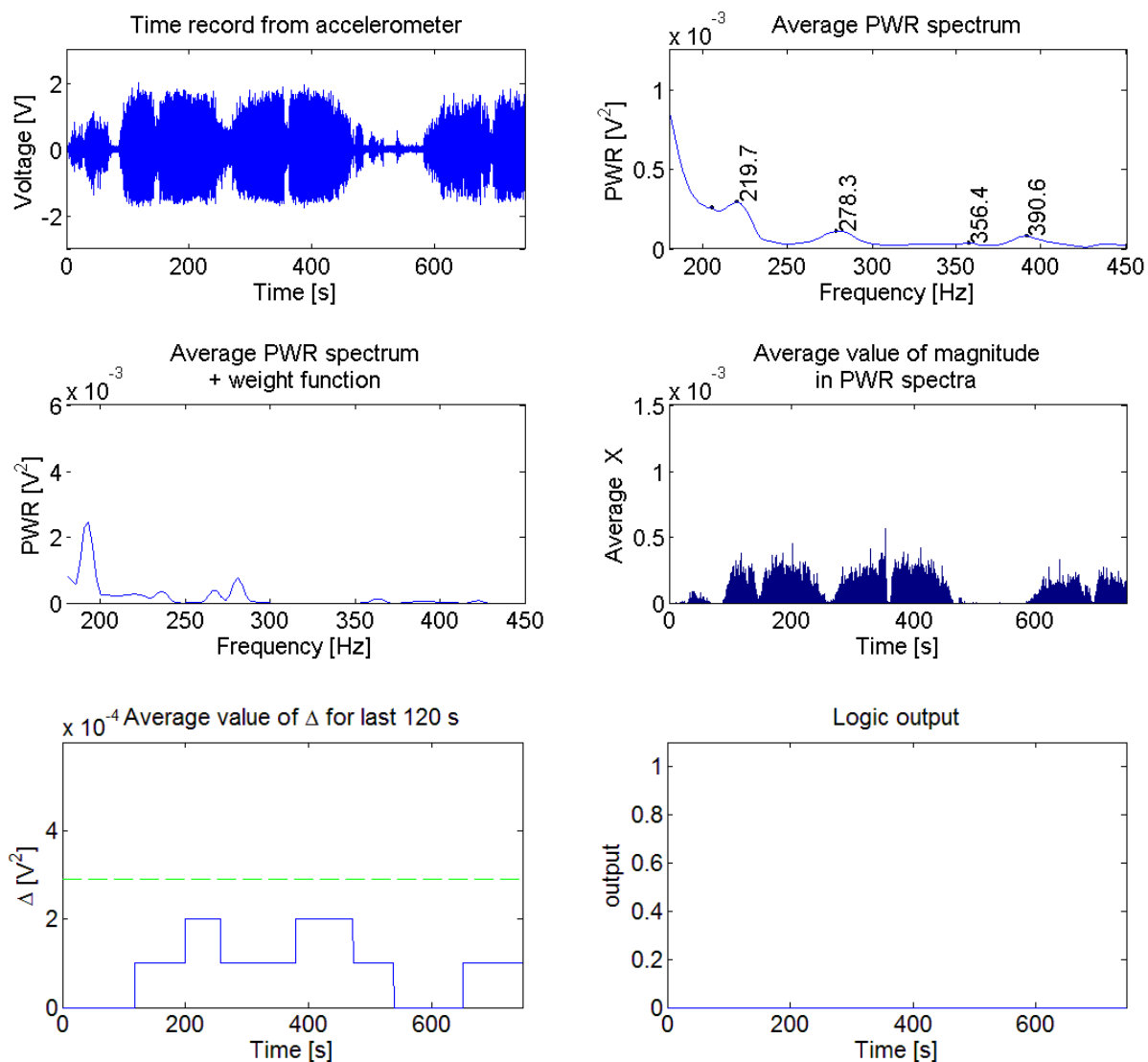
Příloha A



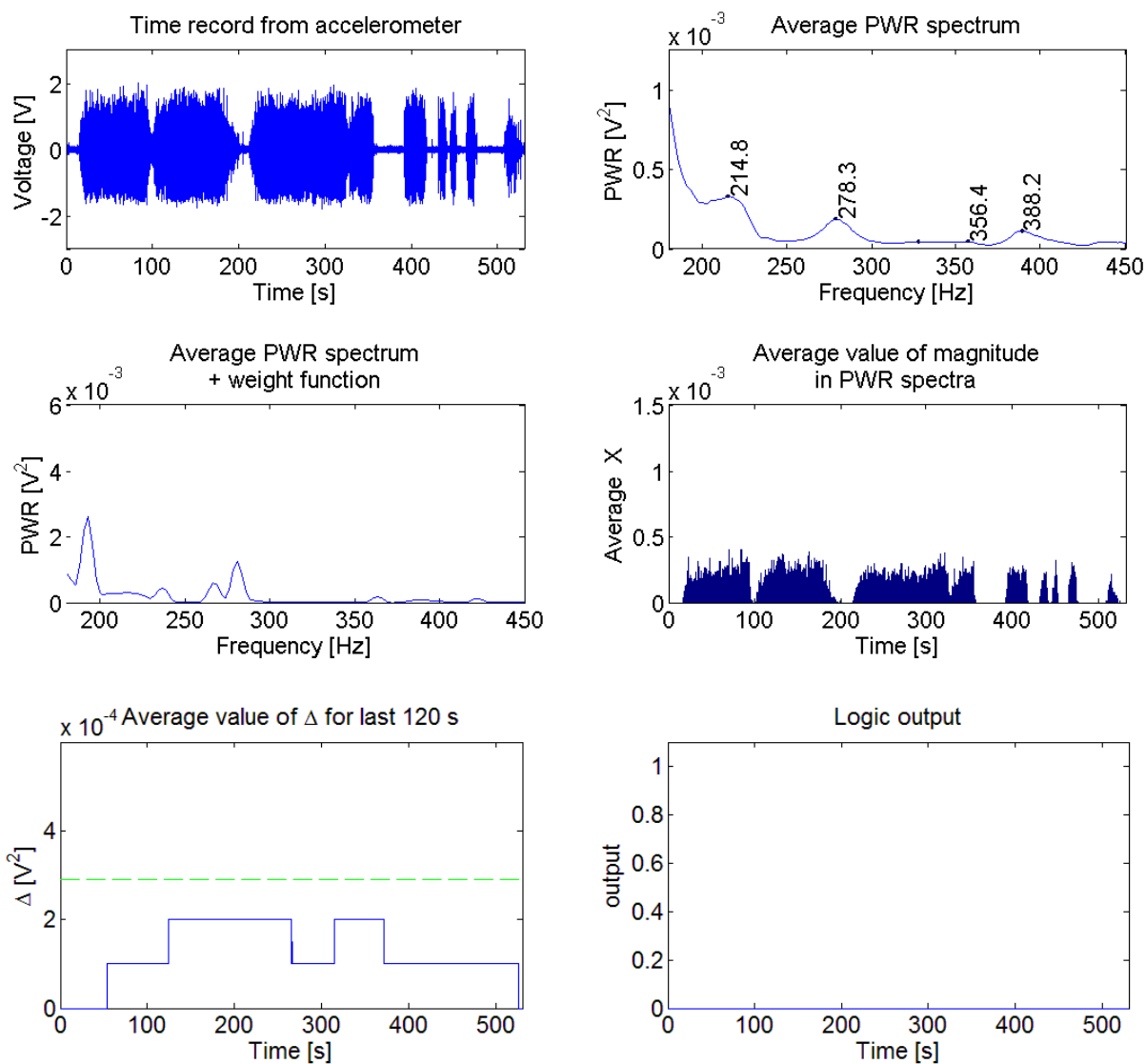
Obr. 23 - Výstup z měření 2 na stanici PDX3



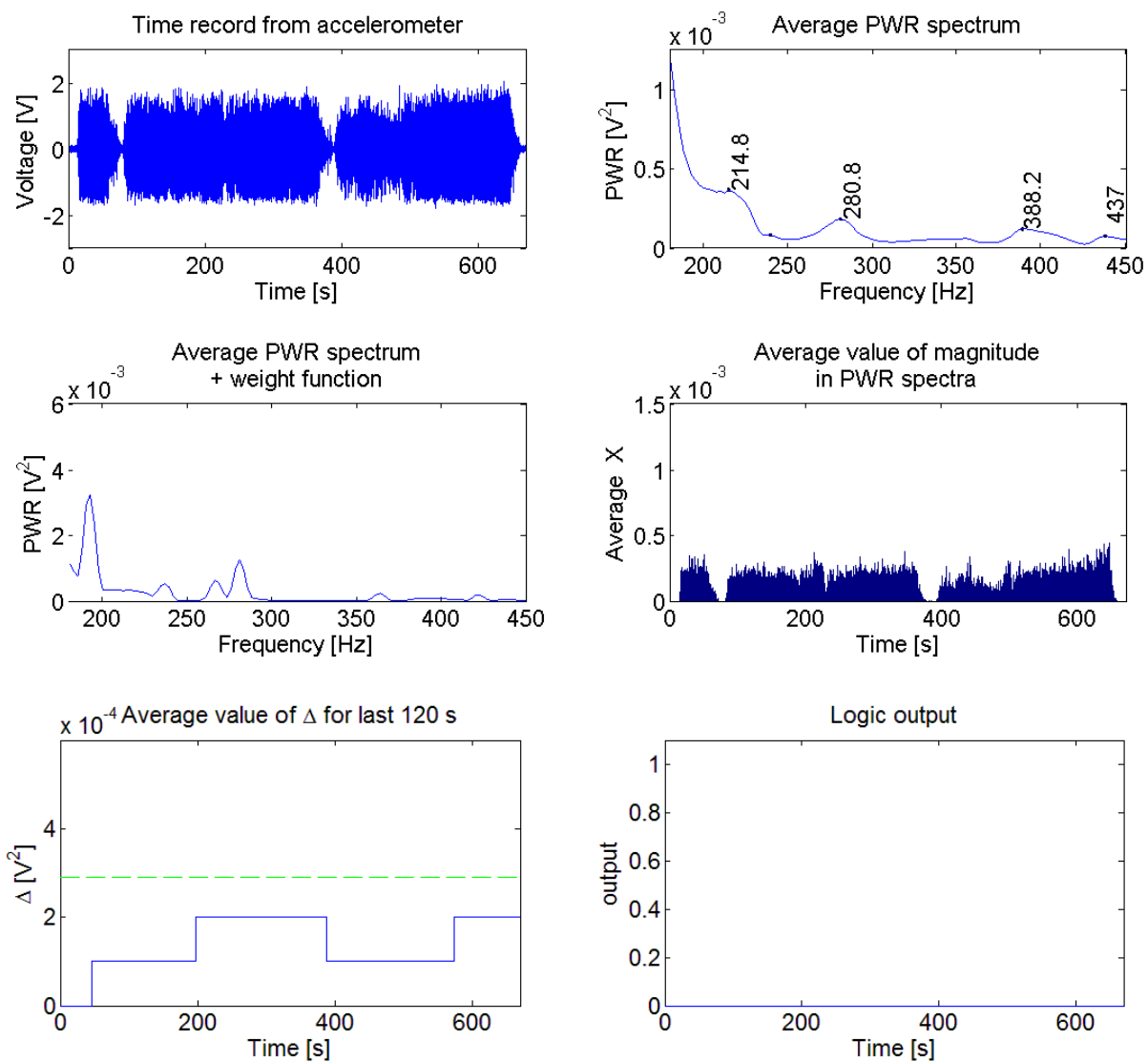
Obr. 24 - Výstup z měření 1 na stanici PD520



Obr. 25 - Výstup z měření 2 na stanici PD520



Obr. 26 - Výstup z měření 3 na stanici PD520



Obr. 27 - Výstup z měření 4 na stanici PD520

Příloha B

```
clearvars;

x = importdata('mer1_pravaX_2504_st1.txt');

N = 2048;
fs = 5000; % [Hz]
proc = 0.67;
f_horni = 450; % [Hz]
f_dolni = 180; % [Hz]
omega = [193, 238, 267, 281, 364, 422]; % [Hz]
hodnotici_interval = 120; % [s]
rozsah = 7; % [Hz]
zlom = 0.00029;

%number of records, intervals in file
prekryti = floor(N*proc);
Nmereni = size(x,1);
f0 = fs/N;
pocet_intervalu = floor(Nmereni/(N-prekryti)-prekryti/(N-prekryti));
f_pocet_horni = round(f_horni/f0);
f_pocet_dolni = round(f_dolni/f0);

mez = ceil(rozsah/f0);
for i = 1:(mez*2+1)
    F(i) = (1+3*(1-cos(2*pi*(i-1)/(mez*2))));
end;

%time and frequency axes
ts = 1/fs;
time = 0:ts:(Nmereni-1)*ts;
f = f0*(f_pocet_dolni:f0*f0*(f_pocet_horni));
int = N*ts:(N-prekryti)*ts:((pocet_intervalu-1)*(N-prekryti)+N)*ts;

K = floor(hodnotici_interval/(ts*(N-prekryti)));
if K > pocet_intervalu
    K = pocet_intervalu;
end

%initial setting of matrixes
Xmean_value = 0;
Xmean_value_omega = 0;
Xpr = zeros(1,pocet_intervalu);
XprK = zeros(1,pocet_intervalu);
XprK_Om = zeros(1,pocet_intervalu);
Delta = zeros(1,pocet_intervalu);
vystup = zeros(1,pocet_intervalu);
L = zeros(1,K);
M = zeros(1,K);

%FFT
for i = 1:pocet_intervalu
    x1 = x(N*(i-1)-prekryti*(i-1)+1:N*(i)-prekryti*(i-1));
    x1 = x1.*kaiser(N,2.5);
    X = abs(fft(x1));
    X_half = X(f_pocet_dolni:f_pocet_horni)';
    X_half = 2*(X_half/N).^2;

    Xmean_value = Xmean_value + X_half;

    Xpr(i) = mean(X_half);
    L(1) = [];
    L = [L, Xpr(i)];
    XprK(i) = mean(L);

    X_omega = X_half;
    for j = 1:size(omega,2)
        cislo = round(omega(j)/(fs/N))-f_pocet_dolni+1;
        X_omega(cislo-mez:cislo+mez) = X_omega(cislo-mez:cislo+mez).*F;
    end;

    %stejne vypocty, ale se zvyraznenymi vlastnimi frekvencemi
    Xmean_value_omega = Xmean_value_omega + X_omega;

    M(1) = [];
```

```

M = [M, mean(X_omega)];
XprK_Om(i) = mean(M);

Delta(i) = XprK_Om(i)-XprK(i);
Delta(i) = round(Delta(i)*10000)/10000;
if Delta(i) > zlom
    vystup(i) = 1;
else
    vystup(i) = 0;
end;
end;

% Averaging of frequency multispectrum
Xmean_value = Xmean_value/pocet_intervalu;
Xmean_value_omega = Xmean_value_omega/pocet_intervalu;

[pks,locs] = findpeaks(Xmean_value, 'SORTSTR', 'descend', 'NPEAKS', 5, 'MINPEAKDISTANCE', 5);
OMEGA = f(locs);

begin = round(hodnotici_interval/((N-prekryti)*ts));
DeltaPr = mean(Delta(begin:end));

% plot of data in time spectrum
subplot(2,2,1);
plot(time,x);
xlabel('Time [s]');
ylabel('Voltage [V]');
title('Time record from accelerometer');
axis([0 max(time) -3 3]);

% plot of averaged spectrum
subplot(2,2,2);
plot(f, Xmean_value); hold on
% Offset values of peak heights for plotting
plot(f(locs),pks,'k.','markerfacecolor',[1 0 0]), hold off
strValues = num2str(OMEGA(:),4);
text(OMEGA,pks,strValues,'VerticalAlignment','cap', 'Rotation', 90, 'HorizontalAlignment', 'left');
xlabel('Frequency [Hz]');
ylabel('PWR [V^2]');
title('Average PWR spectrum');
axis([f_dolni f_horni 0 0.00125]);

% plot of averaged spectrum OMEGA
subplot(2,2,3);
plot(f, Xmean_value_omega);
xlabel('Frequency [Hz]');
ylabel('PWR [V^2]');
title({'Average PWR spectrum'; '+ weight function'});
axis([f_dolni f_horni 0 0.006]);

subplot(2,2,4);
bar(int, Xpr);
xlabel('Time [s]');
ylabel('Average X');
title({'Average value of magnitude'; 'in PWR spectra'});
axis([0 max(int) 0 0.0015]);

figure(2);
% Plot of average magnitudes in setted interval
subplot(2,2,1);
plot(int, Delta);
xlabel('Time [s]');
ylabel('\Delta [V^2]');
title(['Time dependance of value \Delta for last ', num2str(hodnotici_interval), ' s']);
axis([0 max(int) 0 0.0006]);
% Add a horizontal line
line('XData', [0 max(int)], 'YData', [zlom zlom], 'LineStyle', '--', 'Color','g');

subplot(2,2,2);
plot(int, vystup);
xlabel('Time [s]');
ylabel('output');
title('Logic output');
axis([0 max(int) 0 1.1]);

```