



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**ANALÝZA VYUŽITÍ SMART MATERIÁLŮ JAKO
AKTIVNÍCH PRVKŮ PRO SNÍMÁNÍ VIBRACÍ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Rabčan

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Bc. Jakub Rabčan**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

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

Analýza využití SMART materiálů jako aktivních prvků pro snímání vibrací

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vibrodiagnostika a snímání vibrací je součástí většiny kritických aplikací s točivými stroji (turbíny, generátory, motory, ložiska, atd.). Úkolem práce je analyzovat možnosti řešení snímání vibrací a případně vibrodiagnostiky s využitím SMART materiálů jako jsou piezoelektrické vrstvy či struktury.

Cíle diplomové práce:

- 1) Přehled vibrodiagnostických metod a analýza aplikovatelnosti těchto metod s využitím piezoelektrických struktur.
- 2) Měření výstupních elektrických veličin.
- 3) Zpracování naměřeného signálu.
- 4) Realizace snímání na zvolené technické soustavě, zpracování a vyhodnocení naměřeného signálu.

Seznam doporučené literatury:

JANOCHA, Hartmut, *Adaptronics and Smart Structures* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2007.

LE, Minh Quyen, Jean-Fabien CAPSAL, Mickaël LALLART, Yoann HEBRARD, Andre VAN DER HAM, Nicolas REFFE, Lionel GEYNET a Pierre-Jean COTTINET, Review on energy harvesting for structural health monitoring in aeronautical applications. *Progress in Aerospace Sciences* [online]. 79, 147–157. 2015.

SOOBUM LEE a Byeng D YOUN, A new piezoelectric energy harvesting design concept: multimodal energy harvesting skin. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control [online]. 58(3), 629–645. 2011.

AKBAR, M. a J.L. CURIEL-SOSA, Piezoelectric energy harvester composite under dynamic bending with implementation to aircraft wingbox structure. Composite Structures. 153, 193–203. 2016.

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práca sa zaoberá možnosťou riešenia snímania vibrácií a vibrodiagnostikou na základe využitia takzvaných „SMART“ materiálov ako sú napríklad piezoelektrické vrstvy či štruktúry. Rešeršné štúdie skúmali všeobecný prehľad vibrodiagnostických metód a ich analýzou možnosti použitia pri snímaní vibrácií pomocou piezoelektrických štruktúr. Potom nasledovalo samotné meranie a vyhodnotenie výsledkov s použitím rôznych vibrodiagnostických metód. Výsledky boli porovnané s výsledkami získané snímaním vibrácií pomocou akcelerometra. Ďalej sme riešili problematiku týkajúcu sa ohľadom zisťovania deformácie zariadenia pomocou snímania vibrácií s piezoelektrickými štruktúrami. Poslednou časťou bolo naprogramovanie zariadenia „Myrio“ na snímanie a vyhodnocovanie vibrácií pomocou programu Labview.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Vibrodiagnostika, piezoelektrický materiál, porovnanie akcelerometra a pieza, porucha materiálu, zmena frekvencie, NI myrio,

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the possibility of vibration sensing and vibrodiagnostics based on the use of so-called "SMART" materials such as piezoelectric layers or structures. Research studies have examined the general overview of vibrodiagnostic methods and their analysis of the possibility of sensing vibration by piezoelectric structures. This was followed by measuring and evaluating the results using various vibro-diagnostic methods. The results were compared with those obtained by sensing vibration using an accelerometer. We also dealt with the problem of detecting the deformation of the device by sensing vibration with piezoelectric structures. The last part was programming the "Myrio" to capture and evaluate the vibration using Labview.

KEYWORDS

Vibro-diagnosis, piezoelectric material, accelerometer and piezo comparison, material error, NI myrio

Bibliografická citácia mojej práce:

RABČAN, Jakub. *Analýza využití SMART materiálů jako aktivních prvků pro snímání vibrací*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116875>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Zdeněk Hadaš.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému „Analýza využitií SMART materiáľů jako aktivních prvků pro snímání vibrací“ vypracoval samostatne s pomocou odbornej literatúry a prameňov, ktoré sú uvedené v zozname, tvoriaci prílohu tejto práce.

V Brne dňa

.....

Jakub Rabčan

Pod'akovanie

Týmto by som rád poďakoval všetkým, ktorý mi pomáhali a prispeli k vypracovaniu tejto diplomovej práce. Predovšetkým moje ďakujem patri Ing. Filipovi Kšicovi, za odbornú pomoc, cenné rady a tiež za veľa trpezlivosti so mnou. Tiež by som poďakoval môjmu vedúcemu doc. Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D., za odbornú pomoc a cenné rady.

V Brne dňa

.....

Jakub Rabčan

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Formulácia problému a ciele riešenia	11
3. Metódy vibrodiagnostiky	12
3.1. Crest factor	12
3.2. Kurtosis.....	12
3.3. Skewness	13
3.4. Kepstralná analýza.....	14
3.5. Spektrálna analýza.....	15
3.5.1. Fourierová transformácia	15
3.5.2. Power Spectral Density – Welchová metóda	16
3.5.3. Spektrogram	17
3.6. Hilbert-Huang transformácia	18
4. Navrhnutie sústavy	19
5. Meranie dát a vyhodnotenie.....	25
5.1. Vyhodnotenie a kalibrácia	41
6. Analýza nosníku s dierou.....	43
7. Ni myrio a aplikácia.....	48
7.1 Čo je NI myrio.....	48
7.2 Tvorba aplikácie	49
8. Záver	57
Zoznam použitej literatúry	59
Zoznam použitých skratiek a symbolov	61
Zoznam obrázkov.....	63
Zoznam použitých tabuliek.....	64

1. Úvod

V minulosti sa považovalo, že jedinou úlohou prevádzky bola pripravenosť a schopnosť vyrábať pri minimálnych nákladoch. Údržba sa vykonávala až keď sa blížilo ku koncu životnosti súčiastok, čo bolo príliš neefektívne, pretože k poškodeniu mohlo dôjsť kedykoľvek. Čím súčasť bola staršia tým pravdepodobnosť poruchy bola väčšia.

Postupom času sa náklady na údržbu zvyšovali ale hlavne, že samotná odstávka zariadenia spôsobovala veľké finančné straty pre firmu. To viedlo k vytvoreniu rôznych metód, ktoré mali poskytnúť informácie o technickom stave zariadenia. Tieto informácie sa používajú pri plánovaní a riadení údržby. Týchto postupov je niekoľko, ich použitie závisí od rôznych podmienok použitia a merania.

Jednou z týchto metód je vibrodiagnostika, ktorá sa zaoberá skúmaním a vyhodnocovaním vibrácií a na základe týchto informácií sa zistí stav zariadenia. Na snímanie vibrácií sa používajú rôzne snímače výchylky, rýchlosti a zrýchlenia. V tejto práci bol použitý snímač zrýchlenia, čiže akcelerometer.

Súčasnej dobe máme široký výber z rôznych snímačov, ktoré sú pri vibrodiagnostike nevyhnutné. Ako príklad je tu akcelerometer, ktorý premieňa zrýchlenie na merateľný elektrický signál. Na to sa využívajú určité princípy ako sú: zmena kapacity, piezorezistívny jav alebo piezoelektrický jav. Tu sa nám pokladá otázka, bolo by možné akcelerometer nahradiť „SMART“ materiálom, využívajúci už spomínaný princíp. Touto otázkou sa zaoberá táto práca, ktorej hlavným cieľom je zistiť či je možné nahradiť akcelerometer piezoelektrickou štruktúrou. Táto náhrada by priniesla niekoľko prínosov, ale hlavnou výhodou by bola výrazne nižšia cena za materiál oproti cene za akcelerometer. Čo by viedlo zníženie nákladov na vibrodiagnostiku a bola by ešte viac dostupnejšia.

2. Formulácia problému a ciele riešenia

Vibrodiagnostika a snímanie vibrácií je súčasťou pri pozorovaní a určovaní poruchovosti rotujúcich zariadení ako sú napríklad ložiská, motory a pod.. Úlohou tejto práce je analyzovanie možnosti použitia takzvaných „SMART“ materiálov ako sú piezoelektrické štruktúry pri snímaní vibrácií a použitia metód vibrodiagnostiky, ktoré sú bežne pri použití snímania vibrácií pomocou akcelerometru.

Prvým krokom je vytvoriť prehľad vibrodiagnostických metód a analyzovanie ich aplikovateľnosti na použitie piezoelektrických štruktúr (piezo). Nasledovalo navrhnutie sústavy, na ktorú sa nalepia piezo materiály. Postupne sa urobili rôzne merania za použitia pieza a akcelerometru. Následne dáta sa porovnali a vyhodnotili pomocou vibrodiagnostických metód. Tiež sa skúmala problematika či je možné snímať deformáciu zariadenia s použitím piezoelektrických štruktúr. Ako posledná časť práce sa venovala vytvoreniu aplikácie pomocou programu Labview, ktorá by obsahovala vibrodiagnostické metódy.

3. Metódy vibrodiagnostiky

3.1. Crest factor

Crest factor alebo v preklade činiteľ kmitu patrí medzi základné vibrodiagnostické metódy na určovanie poškodenia súčiastok. Najčastejšie sa používa na určenie väd vo valivých ložiskách. Tento faktor dokáže vyhodnotiť iba vibrácie, ktoré okrem budiacich vibrácií, napríklad spôsobené otáčaním motoru, obsahujú aj prídavne vibrácie spôsobené nejakým poškodením.

Metóda je založená na výpočte pomeru medzi maximálnou špičkovou hodnotou signálu a efektívnou hodnotou signálu. Tento pomer sa vyhodnocuje pre nameraný časový záznam vibrácií vo frekvenčnom pásme s rozsahom 10Hz až 10kHz.

$$C_f = \frac{\max[y(t)]}{rms[y(t)]} \quad (3.1)$$

Účelom výpočtu faktora je poskytnúť analytikovi rýchle informácie o tom aké veľké poškodenie súčiastky nastalo. Poskytuje iba hrubý odhad stavu poškodenia, je veľmi jednoduchá a lacná, ale na druhej strane menej presná. V princípe funguje tak, že ak zariadenie nie je poškodené tak nedochádza k zmenám maximálnej a efektívnej hodnoty. Potom hodnota C_f pre signál bez poruchy, čo jednoduchá sínusová funkcia, je 1.41. Ale ak nastane poškodenie, tak hodnoty sa zmenia a C_f bude väčšie. So zvyšujúcim poškodením rastie maximálna hodnota a tým sa zväčšuje aj pomer. Jej nevýhoda spočíva v tom, že aj napriek narastajúcemu poškodeniu hodnota faktoru klesá na hodnotu bez poškodenia. Nastane to vtedy, keď defekt súčiastky je veľmi veľký. Vtedy maximálna hodnota sa ustáli, pričom efektívna hodnota sa neustále zvyšuje.

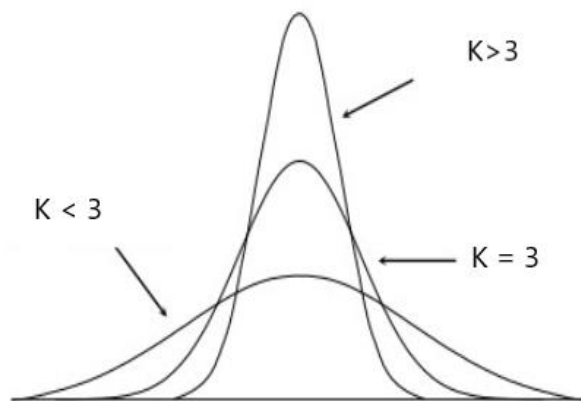
Hlavnou výhodou je to, že nezávisí skoro na žiadnych parametroch ako sú rozmery súčiastky alebo frekvencia budenia. Ma dostatočnú citlivosť na to aby dokázal rozoznať defekt v počiatočnom štádiu [2].

3.2. Kurtosis

Tato metóda oproti predošlej už nie je založená na pomeru maximálnej a efektívnej hodnote meraného signálu, ale na štatistickom procese, ktorý sa používa na charakterizovanie signálu. V podstate poskytuje meranie „peakedness / vrcholnosti alebo špicatosti“ náhodných vibrácií. Charakterizujúca veličina metódy Kurtosis je hodnota K, ktorá sa vypočíta z rovnice:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x(i) - \mu}{\sigma} \right)^4 \quad (3.2)$$

Kurtosis predstavuje mieru vyrovnania funkcie pravdepodobnosti hustoty v blízkosti priemernej hodnoty. Známa hodnota metódy pre normálne rozdelenie (Gaussovo) je 3, pre toto číslo platí, že sa nám v signálu nenachádza harmonické a ani vysokofrekvenčne pravidelne zložky. Zmenu krivky hustoty pravdepodobnosti pre prípad $K > 3$ alebo $K < 3$ môžeme vidieť na obrázku:



Obrázok 1 Krivka hustoty pravdepodobnosti a hodnota K [5]

Tiež sa využíva na diagnostiku porúch súčiastky, vyššia hodnota K ako 3 indikuje väčší defekt. Napríklad pri ložiskách sa pomocou hodnoty určuje stav poškodenia:

$K = 3 - 4$	dobrý stav
$K = 5 - 8$	počiatočne poškodenie
$K = 9-13$	vážne poškodenie
$K > 13$	riziko nehody

Rovnako ako Crest factor, tak aj Kurtosis je jednoduchý a poskytuje hrubý odhad o defekte. Pri tejto metóde tiež platí, že pri veľmi veľkých poškodeniach sa hodnota K začne postupne znižovať. Tiež sa používa na sledovanie ložísk nízkootáčkových rotačných hriadel'ov, kde sú obmedzené frekvenčné techniky. Alebo ju môžeme použiť pri neperiodických impulzov [3][4].

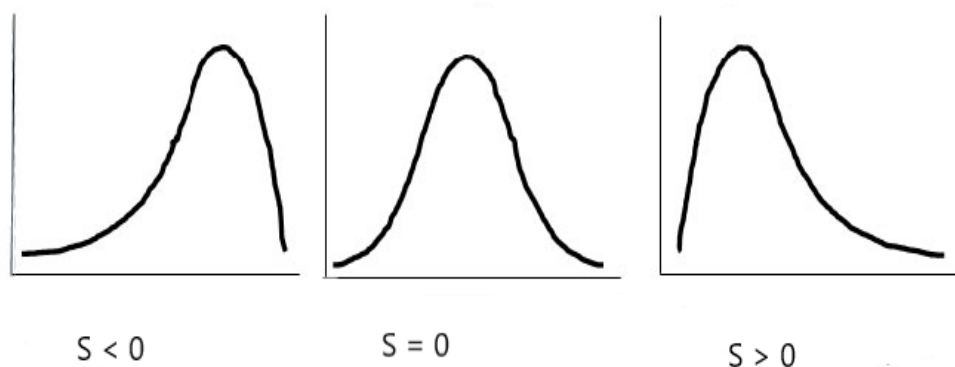
3.3.Skewness

Je podobný parameter ako Kurtosis, tiež sa používa na charakterizovanie signálu. Funguje na rovnakom štatistickom procese ako predošlá metóda, ale stým rozdielom, že využíva tretiu mocninu ako K veličina, tá má štvrtú mocninu. Hodnota metódy Skewness sa spočíta pomocou smerodajnej odchýlky a priemernej hodnoty ako:

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x(i) - \mu}{\sigma} \right)^3 \quad (3.3)$$

Táto hodnota indikuje asymetriu funkcie hustoty pravdepodobnosti, čo znamená stupeň odchýlky od symetrie distribúcie. Pokiaľ je signál symetrický, potom hodnota Skewness sa rovná nule. Pri niekoľkých náhodných signáloch vibrácií je hustota pravdepodobnosti symetrická okolo priemernej hodnoty, takzvané normálne rozdelenie.

Ak parameter S je rozdielny od nuly vo väčšine prípadov značí poškodenie, ktoré je možné zachytiť vo vibráciách. Prejaví sa to tak, že krivka hustoty pravdepodobnosti sa posunie smerom doprava ak hodnota S je záporná, na druhej strane ak je hodnota S kladná potom krivka pravdepodobnosti sa posunie doľava [3][6].



Obrázok 2 Krivka hustoty pravdepodobnosti a S [7]

3.4. Kepstralná analýza

Tato metóda patri medzi nelineárne techniky spracovania digitalizovaného signálu. Základom kepstralnej analýzy je použitie logaritmickéj funkcie na amplitúdové spektrum signálu a následne prevedenie tohto spektra inverznou Fourierovou transformáciou späť do časovej oblasti. Potom výsledkom kepstralnej analýzy je výkonové kepstrum.

$$C(\tau) = F^{-1}\{\log[|X^F(f)|^2]\} \quad (3.3)$$

Na základe či je Fourierov obraz $X^F(f)$ analyzovaného signálu $x(t)$ komplexný rozlišujeme dva typy kepstra: jedným je výkonové kepstrum a druhým je komplexné kepstrum. Obidva typy sú reálne hodnotené funkcie.

Výkonové kepstrum je inverzná Fourierová transformácia logaritmu výkonového spektra časového signálu. Používa sa na vyhľadávanie periodicity vo frekvenčnom spektre, podobne ako frekvenčné spektrum zisťuje periodicitu v časovom zazname signálu. Tiež tento typ môžeme použiť na detekciu echa a následne na jeho odstránenie. Ďalej sa používa na analýzu a rozpoznávanie reči. Okrem toho tiež aj na meranie vlastností odrazových povrchov.

Komplexné kepstrum je inverzná Fourierová transformácia logaritmu doprednej Fourierovej transformácie časového signálu. Používa sa vtedy, keď je potrebné upraviť signál v frekvenčnej doméne a následne vrátenie do časovej domény. Tento proces je možný, pretože komplexné kepstrum obsahuje informácie o rozsahu a fázy.

Vzhľadom k tomu, že kepstrum je frekvenčnou analýzou výkonového spektra, bude na vodorovnej osi kepstra čas. Kepstrálna analýza sa používa ako doplnková technika pre spektrálnu analýzu, pretože výsledky získané z kepstra nedávajú zmysel bez spektrálnej analýzy a z toho dôvodu nie je možné použiť samostatne.

Metóda je vhodná pre prípady, keď má frekvenčné spektrum niekoľko nosných frekvencií, na ktorých sú namodulované bočné pásma, keď je prehustený, tak je prakticky nemožné určiť postranné pásma použitím spektrálnej analýzy. Je tiež vhodná predovšetkým pre diagnostiku prevodoviek a pre identifikáciu technického stavu ozubeného kola.

Výhody kepstrálnej analýzy sú napríklad: multiplikatívne komponenty v spektre sa pomocou logaritmu menia na aditívne a ako také sa objavujú v spektre. Tiež zvýrazňuje akoukoľvek zmenu alebo periodicitu v spektre[2][8][9].

3.5. Spektrálna analýza

Spektrálna analýza je základná a najčastejšie sa používajúca metóda pri vibrodiagnostike. Jej princíp funguje na základe prevodu signálu z časovej oblasti do frekvenčnej oblasti. Potom je možné vo frekvenčnej oblasti jednoducho stanoviť veľkosť amplitúdy a frekvencie, ktoré sa v signáli nachádzajú. Najpoužívanejším algoritmom pri výpočte spektrálnej analýzy sa používa Fourierová transformácia.

3.5.1. Fourierová transformácia

Slúži na prevod signálu z časovej oblasti do frekvenčnej oblasti. Základným predpokladom je to, že vstupný signál musí byť periodický. Pokiaľ táto podmienka nie je splnená, potom musíme uvažovať, že vstupný signál je len jedna perióda periodického signálu. Táto transformácia je súčasťou mnohých zložitejších algoritmov. Preto existuje niekoľko variantov v spojitých a diskretnej podobe.

Spojité Fourierové transformácie:

je definovaná spojitým integrálom a využíva sa pre výpočet kmitočtových zložiek. Je vyjadrená nasledujúcim vzťahom:

$$X(\omega) = F[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.4)$$

A tiež sa používa inverzia, ktorá je vyjadrená ako:

$$x(t) = F^{-1}[X(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (3.5)$$

Kde $X(\omega)$ je Fourierov obraz a $x(t)$ je vstupný signál.

Diskrétna Fourierová transformácia:

je vhodná pre analýzu stacionárnych signálov. Má veľkú výhodu oproti spojitej transformácii, pretože častejšie pracujeme s diskretným signálom, pre ktorý nám poskytuje diskrétny vyjadrený výsledok, ten sa potom môže ďalej číslicovo spracovávať. Je definovaná nasledujúcim vzťahom:

$$X^f[f] = X^f[k_f \Delta f] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X(i) e^{-jk_f i \frac{2\pi}{N}} \quad (3.6)$$

Tiež sa používa aj jej inverzia:

$$x(i) = \Delta f \sum_{i=0}^{N-1} X^f[i] e^{jk_f i \frac{2\pi}{N}} \quad (3.7)$$

Pre jemnejšie frekvenčné rozlíšenie Δf Fourierových koeficientov predĺžime dĺžku analyzovaného okna. Výpočet diskretnej Fourierovej transformácie je časovo náročná, pretože dochádza k výpočtu N členov postupnosti X^f z N nameraných hodnôt $x(i)$. zo vzorca vyplýva, že je potrebné N^2 komplexne násobiť a tiež komplexne sčítať. Pre urýchlenie algoritmu sa používa rýchla Fourierová transformácia, jej počítačová zložitosť je nižšia $N \log(N)$. Ale je potrebné analyzované dáta upraviť tak, aby jej dĺžka bola $N = 2^n$. Rýchla Fourierová transformácia vypočíta jednotlivé frekvenčné zložky z nameraného časového signálu, podľa predom stanovených podmienok na frekvenčný rozsah a rozlíšenie. Počet hodnôt frekvenčného spektra je polovičný vzhľadom k počtu hodnôt časového signálu, pričom maximálna frekvencia sa rovná polovici vzorkovacej frekvencie [2][10].

3.5.2. Power Spectral Density – Welchová metóda

Výkonové spektrum opisuje rozdelenie energie časovo závislým dátam vo frekvenčnej oblasti. Existujú dve hlavné metódy, ktoré sa používajú na výpočet PSD. Jednou je parametrická a druhá je neparametrická. Medzi neparametrické metódy patri Welchov algoritmus.

Welchová metóda je vytvorená na základe Bartlettovej metódy vylepšená o dva aspekty. Prvým je, že dátové segmenty sa vo Welchovej metóde môžu prekrývať. Po druhé, každý dátový segment prejde cez algoritmus nejakého okna (napr. Hanning), predtým než sa vypočíta periodogram.

Welchová metóda je jedným z najčastejšie používaných prístupov pre analýzu frekvencie. Jeho hlavná výhoda spočíva v znížení počtu krokov potrebných vo výpočte. Algoritmus zahŕňa rozdelenie dát do niekoľkých kratších segmentov, následne sa získa periodogram, každého segmentu a potom sa výsledky spriemerujú. Najčastejšie sa používa Hanningovo okno na kalkuláciu modifikovaného periodogramu jednotlivých segmentov, aby sa znížili spektrálne úniky, ktoré sa vyskytujú pri použití obdĺžnikového okna. Hoci prekrývanie medzi segmentmi má tendenciu zavádzať nadbytočné informácie, tento efekt sa znižuje použitím iného okna ako je obdĺžnikové, čo znižuje váhu alebo dôležitosť, ktorá je daná koncovým vzorkám segmentov, ktoré sa prekrývajú.

V metóde Welch sa dátové úseky L s dĺžkou M prekrývajú a periodické záznamy sa vypočítavajú z údajových sekcií s oknami L . Periodogramy sú normalizované faktorom U , aby sa kompenzovala strata energie signálu v dôsledku procedúry okien[11].

$$U = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} w^2(n) \quad (3.8)$$

Potom Welch spectral density, $P_{WE}(f)$ je:

$$P_{we} = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} P_j(f) \quad (3.9)$$

3.5.3. Spektrogram

Je to metóda, ktorá vizualizuje reprezentovanú silu signálu v čase, v rôznych frekvenciách prítomných v určitom tvare signálu. Nielenže dokáže určiť či je viac alebo menej energie signálu napríklad pri 2Hz alebo 10 Hz, ale možno tiež vidieť, ako sa úroveň energie menia v čase.

Spektrogramy sú v podstate dvojrozmerné grafy s tretím rozmerom reprezentovaným farbami. Na súradnici x je vyobrazený čas trvania signálu a súradnicu y tvoria frekvencie obsiahnuté v signále. Tretím rozmerom sú farby, ktoré vyjadrujú silu, tu nadobúda signál s danou frekvenciou v určitom čase.

Používa sa preto, lebo jediná Fourierová transformácia celého priebehu vibrácií nedokáže zachytiť časovo premenlivý frekvenčný obsah. Na to nám slúži krátkodobá Fourierová transformácia segmentov signálu pod posúvajúcim oknom. Krátkodobá Fourierová transformácia je súčasťou spektrogramu, ktorý je daný:

$$S(\omega, \tau) = |X(\omega, \tau)|^2 \quad (3.10)$$

Kde $X(\omega, \tau)$ reprezentuje krátkodobú Fourierovú transformáciu signálu a $S(\omega, \tau)$ je ten náš spektrogram[12],[13].

3.6. Hilbert-Huang transformácia

Je výkonný nástroj na analýzu kompozitného, nelineárneho a nestacionárneho signálu. Transformácia je založená na lokálnej characteristickej časovej škále signálu a môže rozložiť komplikovaný signál na niekoľko IMF funkcií, z ktorých každý je pásmovo obmedzený a predstavuje vlastnosti signálu. Skupiny frekvencií môžu byť efektívne rozdelené podľa charakteristík signálu a opisujú ho v spoločnej časovej frekvenčnej analýze. Môže sa vypočítať okamžitá frekvencia a rozdelenie energie signálu, čo môže poskytnúť jasnejší rozklad frekvencie ako tradičné Fourierovo spektrum. HHT zahŕňa EMD a Hilbertovú spektrálnu analýzu.

EMD takzvaný empirický rozklad, rozkladá signál do IMF funkcií. Každý signál obsahuje konečný počet IMF, z ktorých, každý musí spĺňať nasledujúce kritéria: 1. v celom súbore údajov sa počet extrémov a počet kríženia nulou musí byť rovnaký alebo sa môže odlišovať najviac o jeden. 2. V každom bode je priemerná hodnota obálky definovaná lokálnymi maximami a obálka definovaná lokálnymi minimami je nula.

Hilbertovú transformáciu využívame vo vibrodiagnostike pre vyhodnotenie obálok amplitúdovo modulovaných signálov v časovej oblasti. Výsledkom je analytický signál, ktorý sa skladá z reálnej časti reprezentujúci pôvodne dáta a imaginárnej časti, ktorá predstavuje Hilbertovú transformáciu. Pôvodný a imaginárny signál sú vzájomne vo fázy posunuté o 90° . Signál vytvorený Hilbertovou transformáciou si zachováva amplitúdu a frekvenciu. HT sa výživa k získaniu okamžitých vlastností signálu, hlavne okamžitej amplitúdy a frekvencie. Okamžitá frekvencia vyjadruje pomer zmeny uhlu na okamžitej fázy. Napríklad pri sínusovej krivke je okamžitá frekvencia a amplitúda konštantná. Hilbertová transformácia je vyjadrená nasledujúcim vzťahom:

$$H\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{\tau - t} d\tau \quad (3.11)$$

Ak použijeme konvolúciu potom predošli vzťah môžeme zjednodušiť a dostaneme:

$$H\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} x(t) * \frac{1}{t} \quad (3.12)$$

Následne ešte vzorec môžeme upraviť pomocou Furierovej transformácie a dostaneme:

$$H(if) = \frac{1}{\pi} F\{x(t)\} F\left\{\frac{1}{t}\right\} = \frac{1}{\pi} X(if) \pi(-j \operatorname{sgn}(f)) \quad (3.13)$$

HT pracuje vo frekvenčnej oblasti tak, že zložkám zo zápornou frekvenciou posúva fázu o $\pi/2$ a pri kladných zložkách je to o $-\pi/2$ [2],[10].

4. Navrhnutie sústavy

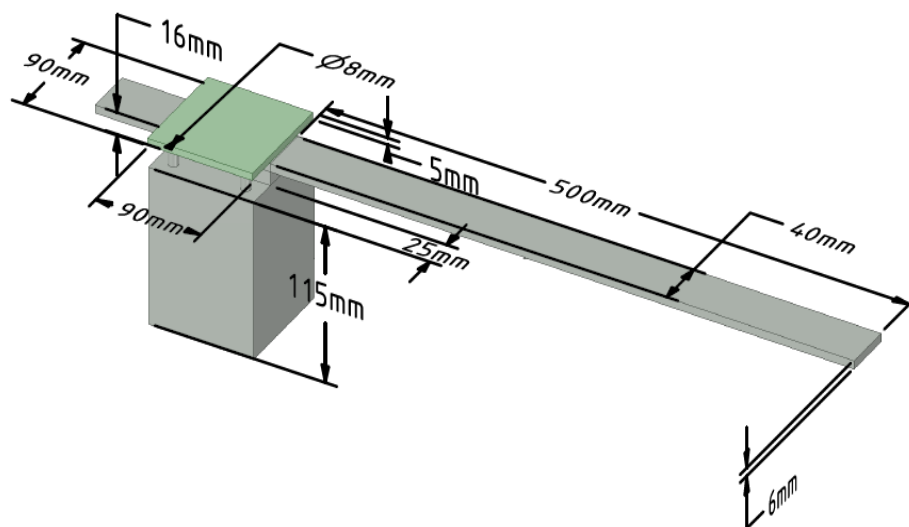
Druhý krok bolo navrhnuť celú sústavu, na ktorú sa nalepia piezoelektrické štruktúry. Sústava potom bude využívaná pri meraní vibrácií. Celo sústava musela byť jednoduchá aby bolo možné v prípade potreby zmeniť jej rozmery a vlastnosti. Tiež sa muselo dbať na to, aby bolo možné ju rýchlo nahradiť novou, ktorá by mala rovnaké alebo aspoň približne rozmery a vlastnosti ako tá predchádzajúca. Preto sa učinilo rozhodnutie, že sústava bude tvorená dlhým nosníkom, ktorý je na jednom konci upevnený k základu čiže je votknutý. Nosník bol vybraný z toho dôvodu, pretože je jednoduchý a dajú sa ľahko meniť rozmery a je nahraditeľný, ale ako hlavný dôvod bolo to, že väčšina zložitých sústav má komplikované a nepriehľadné riešenie a preto sa nahrádza jednoduchou sústavou tvorenou nosníkom, ktoré má ľahké a priehľadné riešenie.

Ako sústavu sa vybral nosník, bol vytvorený z ocele a je ho rozmery môžeme nájsť v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 1 Parametre sústavy

Materiál		
ρ – hustota	7800	kg/m ³
E – Youngov modul	$2,1 \cdot 10^{11}$	Pa
μ - Poissonovo číslo	0,3	
Nosník		
Dĺžka	500	mm
Šírka	40	mm
Výška	6	mm
Prebytočná dĺžka	150	mm
Konzola		
Šírka	90	mm
Výška podstavca	115	mm
Dĺžka	90	mm
Výška plátu	5	mm
Priemer šróbu	8	mm
Výška medzi podstavcom a plátom	16	mm

Tieto údaje sa použili pri vytvorení samotnej sústavy a tiež boli použité na vytvorenie modelu, pre použitie na výpočty v programe. Následne na obrázku môžeme vidieť ako vyzerá naša namodelovaná sústava a jej rozmery.



Obrázok 3 Nosník

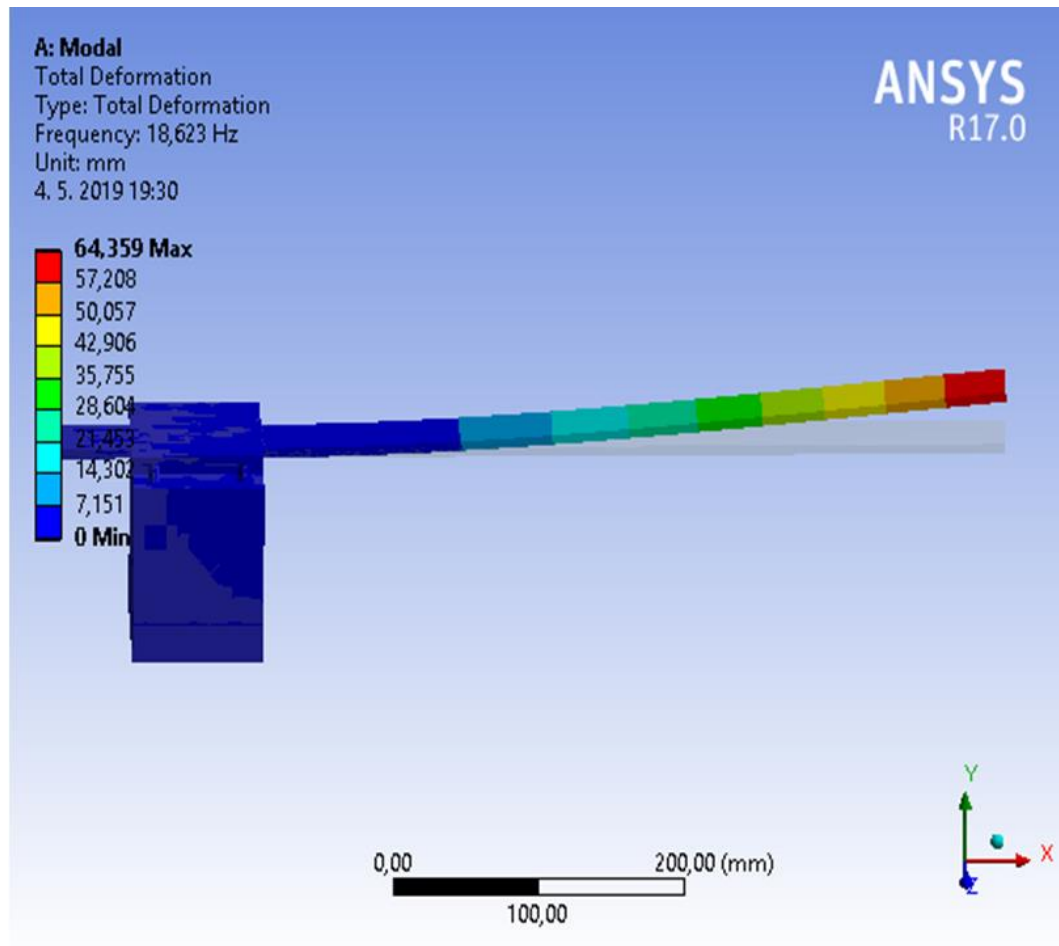
Teraz, keď už máme sústavu navrhnutú je potrebné zistiť harmonické frekvencie nosníku. Tieto hodnoty zistíme buď, experimentálne alebo pomocou programu ANSYS, ktorý sa používa na rôzne simulácie fyzikálnych dejov, ako je v našom prípade modálna analýza. Táto analýza sa rieši pomocou metódy konečných prvkov a slúži na nájdenie vlastných frekvencií modelu. Bol použitý ANSYS WORKBENCH, čo je prostredie, v ktorom sa nachádzajú rôzne programy. Napríklad pre náš prípad je to ANSYS Mechanical, ktorý v sebe obsahuje modálnu analýzu. Následne bol nami vytvorený model vložený do ANSYS-u, kde sa nastavili potrebné parametre ako je materiál. Nastavila a vytvorila sa potrebná „mesh“, ktorá nám rozdelí celý model na niekoľko veľmi malých častí, na ktoré sa aplikujú rovnice modálnej analýzy. Tiež je potrebné zadať rôzne podmienky. Získané frekvencie vidíme v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 2 Harmonické Frekvencie

Tvar	frekvencia [Hz]
1	18,307
2	114,63
3	320,81
4	423,96
5	628,45
6	1038,7

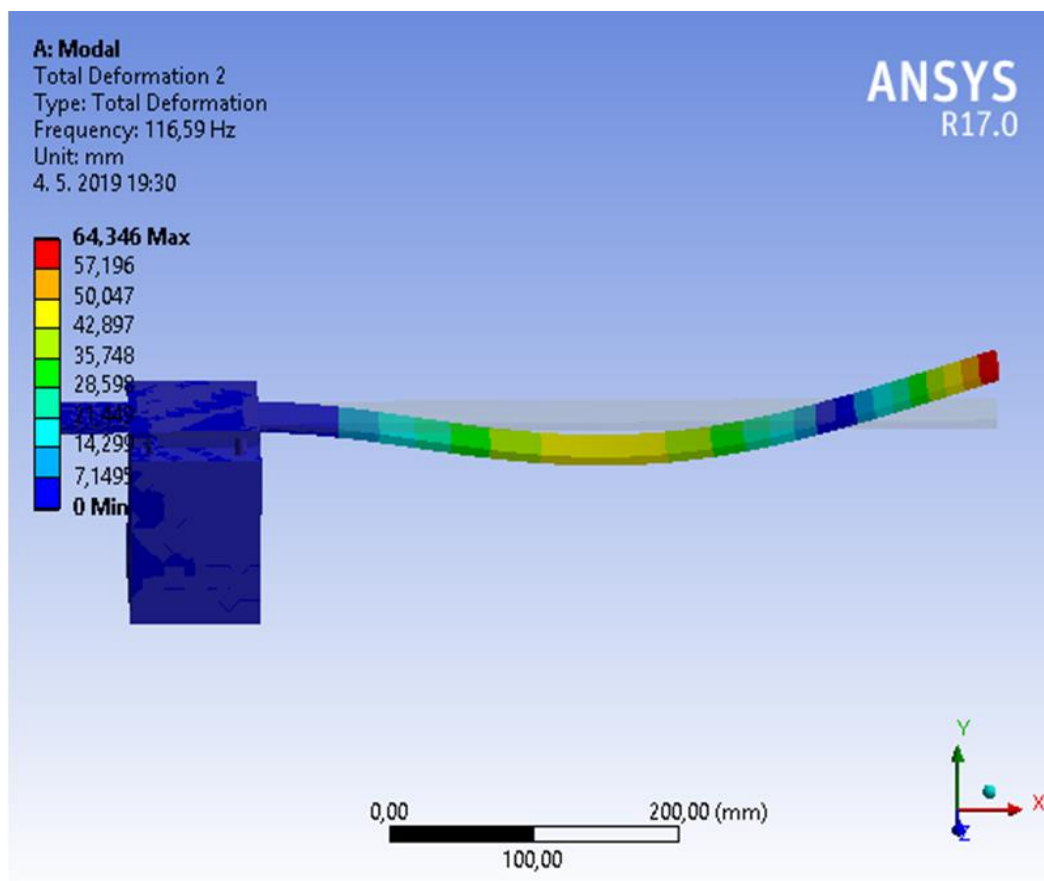
Získanú frekvenciu pomocou programu ANSYS bude potrebné ešte porovnať s výsledkami, ktoré boli získané experimentom. Porovnanie bude až v nasledujúcej kapitole.

Okrem toho sa získali aj prvé dva vlastné tvary harmonickej frekvencie, ktoré nám neskôr pomohli pri určovaní miesta, kam sa nalepia piezoelektrické materiály.



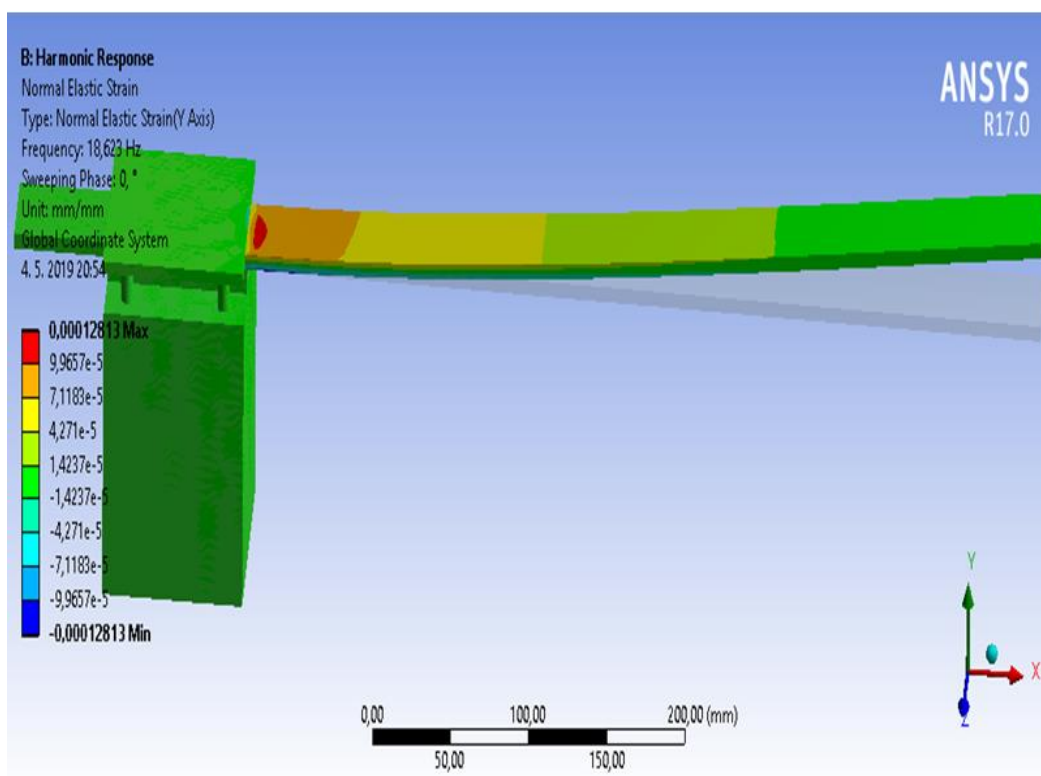
Obrázok 4 Prvý vlastný tvar

Na obrázku 4. môžeme vidieť prvý vlastný tvar harmonickej frekvencie, čo môžeme vidieť ako jednoduchý priehyb, tento výsledok na základe znalosti bol očakávaný. To isté sa môže povedať aj pri druhom vlastnom tvare harmonickej frekvencie, čiže nie je nič čo by sa nepredvídalo.



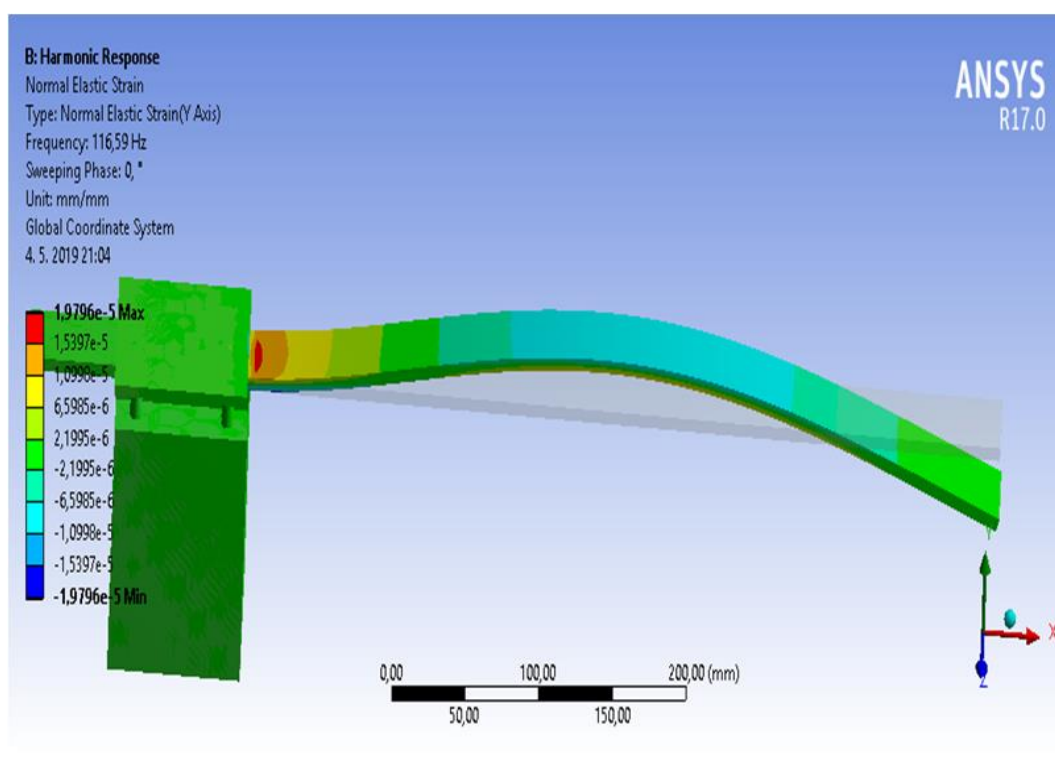
Obrázok 5 Druhý vlastný tvar

Keď už boli zistené vlastné frekvencie, tak teraz je potrebné stanoviť miesto na nosníku, kde by sa mohol nalepiť piezoelektrický materiál. Keďže sa budú nalepovať dva pieza, tak je potrebné určiť dva miesta. Už zo získaných obrázkov pre vlastné tvary harmonických frekvencií môžeme stanoviť, že to bude niekde pri votknutí a niekde v strede nosíku. Ale je potrebné určiť presnejšie miesto. Na to je potrebné zistiť, kde je najväčšie pretvorenie pre dva vlastné tvary frekvencie, pretože čím väčšie pretvorenie tým viac sa bude deformovať piezoelektrický materiál a z toho vyplýva to, že sa bude generovať viac náboja v pieze a tým bude väčšie generované napätie. Na stanovenie pretvorenia nám posluží algoritmus „Harmonic response“, ktorý sa tiež nachádza v programe ANSYS. Na riešenie harmonickej odozvy poslužia výsledky získane modálnou analýzou, tiež je potrebné nastaviť rôzne podmienky plus treba pridať budenie. To sa pridá na voľný koniec nosníku a budenie bude tvorené harmonicky sa opakujúcou silou o 1 N.



Obrázok 6 Pretvorenie na 1. harmonickej

Na obrázku je vidieť, že najväčšie pretvorenie nastáva vo votknutí (znázornené červenou farbou). Hodnota najväčšieho pretvorenia podľa simulácie je okolo $1,2 \cdot 10^{-4}$ mm/mm.



Obrázok 7 Pretvorenie pre 2. harmonickú

Ako je vidieť na obrázku tak pre druhú harmonickú frekvenciu sa získalo najväčšie pretvorenie tiež vo votknutí, ale je tam aj druhé najväčšie pretvorenie, ktoré sa nachádza 260 mm od votknutia. Z výsledkov sa stanovilo miesto, kde boli nalepene piezoelektrické materiály. Prvé bolo nalepene 1 cm od votknutia, pretože tam je najväčšie pretvorenie ako pre prvú harmonickú frekvenciu tak aj pre druhú a ešte sa výsledky robili aj pre 3,4,5 a 6 harmonickú frekvenciu, kde sa tiež ukázalo, že aj tam je vo votknutí pretvorenie maximálne. Druhé piezo bolo nalepene do oblasti 260 mm od votknutia, pričom pre 3,4,5 a 6 harmonickú frekvenciu už nebolo rovnaké, ale bolo na každom tvare frekvencie inde a ich hodnoty boli menšie. Následne sa piezoelektrické štruktúry nalepili na nosník, na miesta určenia, môžeme vidieť na obrázku č. 8, pomocou epoxidového lepidla. Toto lepidlo má dobré vlastnosti pri používaní piezoelektrických materiálov, je tiež rýchlo tuhnúce, doba tvrdnutia je 24hodín.

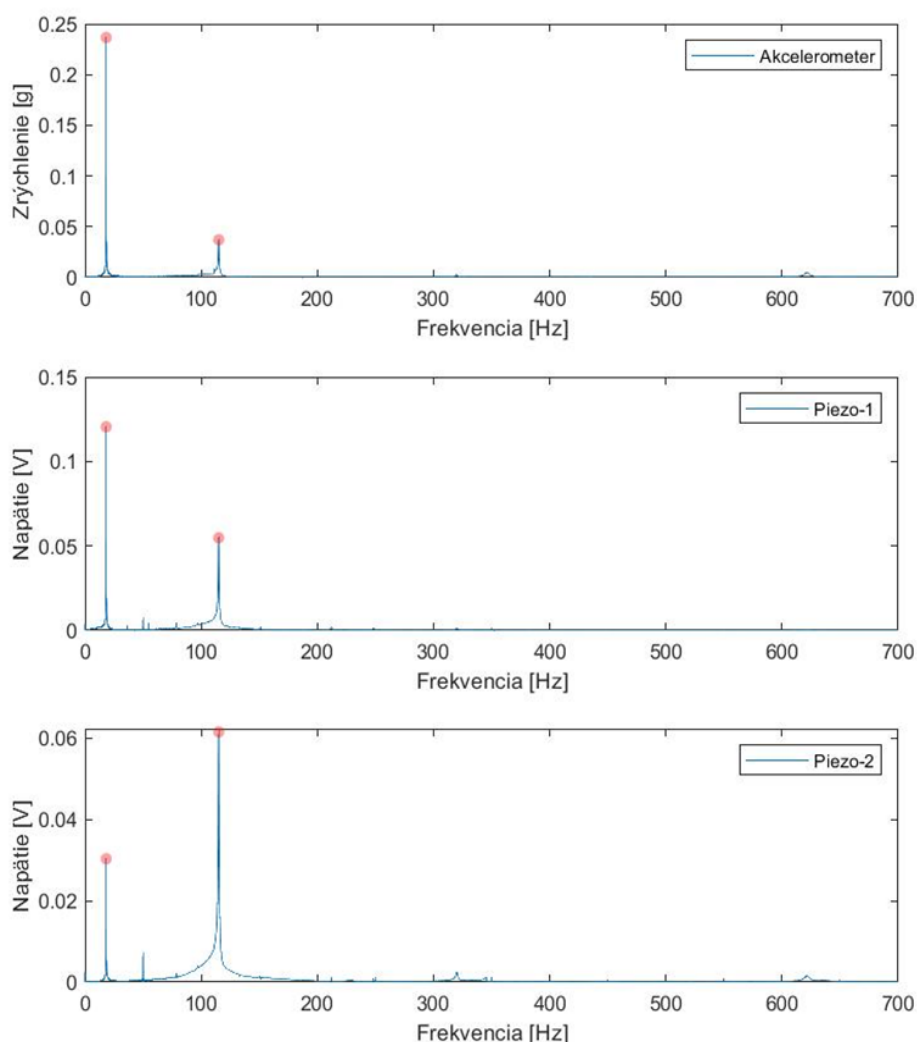


Obrázok 8 Nosník + piezo

5. Meranie dát a vyhodnotenie

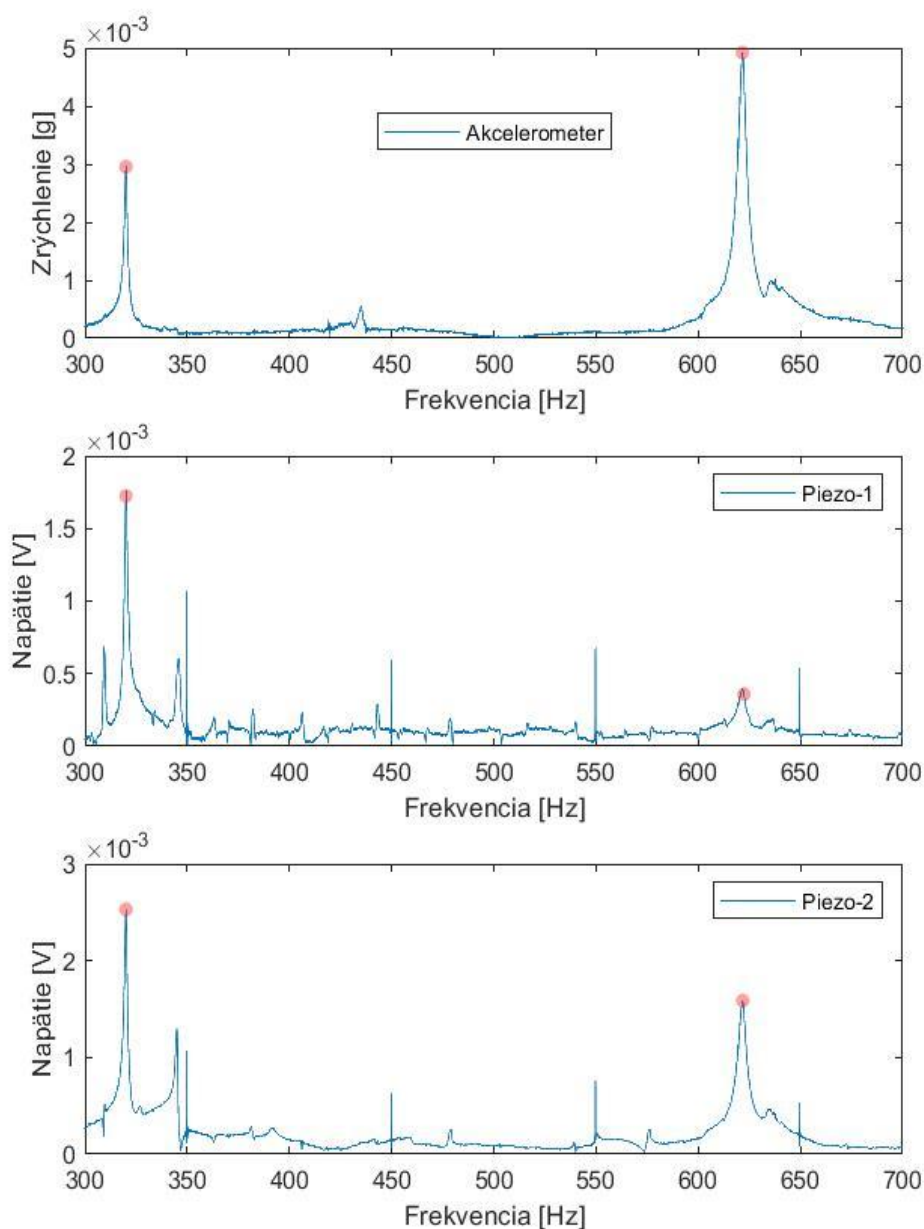
V tejto časti sa budeme venovať meraniu dát nami zvolenej sústavy, ktorú tvorí nosník, na jednom konci votknutí. Merat' sa budú vibrácie nosníku pomocou piezoelektrických materiálov, ktoré boli nalepené na nosníku, a tiež pomocou akcelerometru, ten nám pomôže pri vyhodnocovaní a porovnaní výsledkov s výsledkami získaných z pieza. Na meranie bola použitá meracia DAQ zbernica od National Instruments. Dáta boli zaznamenávané cez program NI Singnal Expres. Samotne vyhodnotenie sa robilo pomocou programu Matlab.

Ako prvé bolo potreba experimentálne overiť výsledky, ktoré sa získali pri simulovaní pomocou ANSYS-u. Tieto výsledky sa overili tak, že sme spustili meraciu sústavu a začali merat' dáta. Následne sa na nosník jednoducho kleplo a počkalo sa pokým sa hodnoty ustálili a celý proces bol zopakovaný. Získane dáta boli spracované pomocou Matlab-u, respektíve bola použitá funkciu „fft“, čo predstavuje rýchlu Fourierovú transformáciu. Výsledky sa vyobrazili do nasledujúceho grafu.



Obrázok 9 Amplitúdo-frekvenčná charakteristika

Tak z výsledkov, ktoré sa získali meraním, bola vytvorená amplitúdo-frekvenčná charakteristika, ktorá je vyobrazená na predchádzajúcom obrázku. Kde si môžeme všimnúť, že navyše sa prejavili prvá a druhá vlastná frekvencia. Po priblížení grafu sa zistilo, že sa prejavili aj ostatné vlastné frekvencie, ale ich amplitúdy sú malé. A tiež aj to, že štvrtá harmonická frekvencia nebola zachytená piezom, pretože tvar kmitania nosníku pre štvrtú harmonickú frekvenciu je iný ako pri ostatných a nami používané piezo nie je schopné zachytiť vibrácie v tomto smere.



Obrázok 10 Amplitúdo-frekvenčná charak. zväčšenie

Okrem vlastných frekvencií sa v charakteristike nachádza aj zložky iných frekvencií, čo predstavuje šum, ktorý tam vznikol.

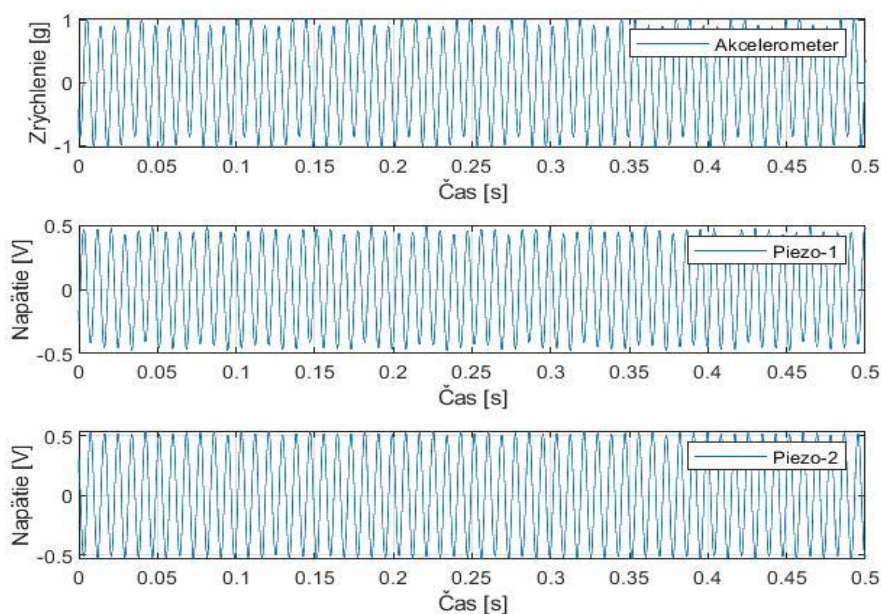
Výsledky získane meraním, sú zobrazene v tabuľke.

Tabuľka 3 Frekvencie výsledky

Tvar	frekvencia [Hz]	
	Experimentálne	Výpočtom
1	18,21	18,307
2	115,1	114,63
3	320	320,81
4		423,96
5	621,5	628,45

Pri porovnaní výsledkov dôjdeme k záveru, že hodnoty sa navzájom odlišujú len veľmi málo. Čo je pre nás veľmi dobré a nemusia sa riešiť rôzne príčiny, kde by mohla nastať chyba.

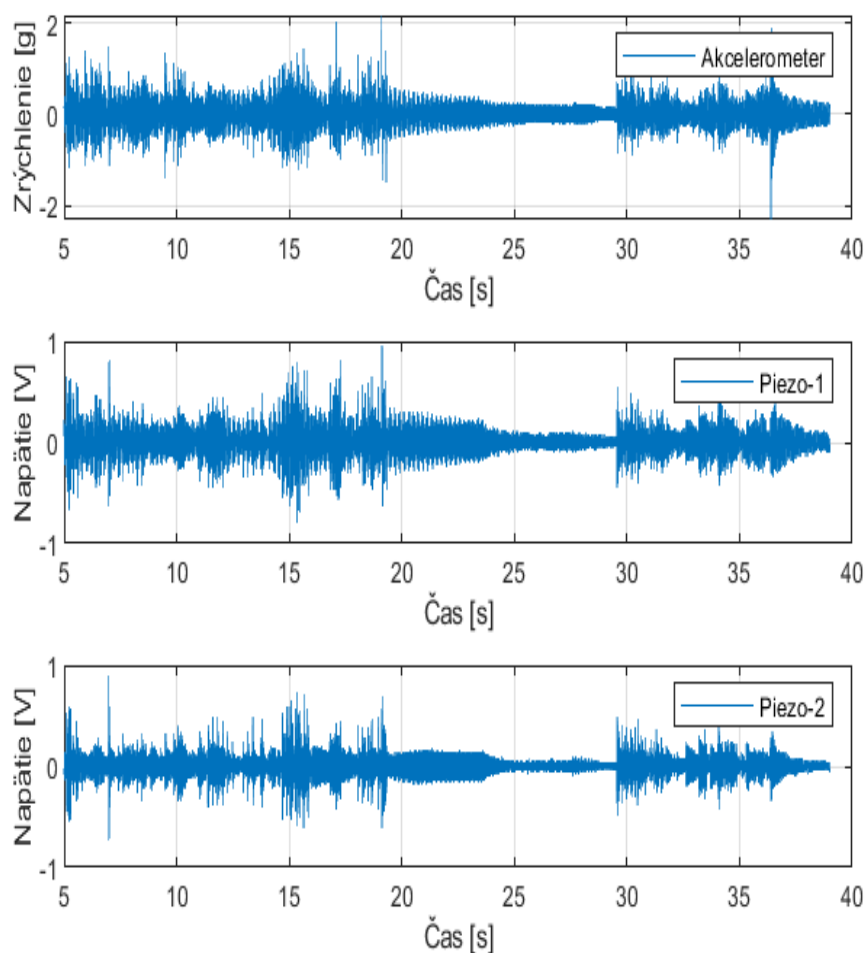
Po zistení vlastných frekvencií sa pokračovalo v meraní tak, že teraz bol nosník budení harmonickou silou. To sa docielilo pomocou elektromagnetu, ktorý pôsobil na voľný koniec nosníku. Ten bol nabudený na druhú vlastnú frekvenciu, čo je 115,1 Hz. Odmerali sa dáta a pomocou vibrodiagnostických metód sa analyzovali a navzájom porovnali. Následne sa celé meranie zopakovalo, ale s tým rozdielom, že na kmitajúci nosník boli pridané i ďalšie nepravidelné vibrácie. Potom sa pokračovalo rovnakým spôsobom ako predtým, to znamená, že sa dáta znova analyzovali pomocou vibrodiagnostických metód. Vibrácie boli vyhodnotene pomocou programu Matlab, kde sa použila knižnica „Signal procesing toolbox“. V tejto knižnici už boli jednotlivé metódy naprogramované v podobe rozličných funkcií. Na konci bolo ešte potrebné tieto výsledky porovnať s výsledkami, ktoré boli získané pri budením nosníku bez prídavných vibrácií.



Obrázok 11 Vibrácie nosníku

Pri budenom nosníku na druhú vlastnú frekvenciu sa získalo harmonické kmitanie, ktoré je vyobrazené na obrázku 11. Budení nosník na danú frekvenciu sa dostaval do rezonancie, vtedy dochádzalo k maximálnemu kmitaniu. Pomocou akcelerometru bol získaný signál o amplitúde 1g a pri piezoelektrických materiáloch zasa signál o amplitúde 0.5 V.

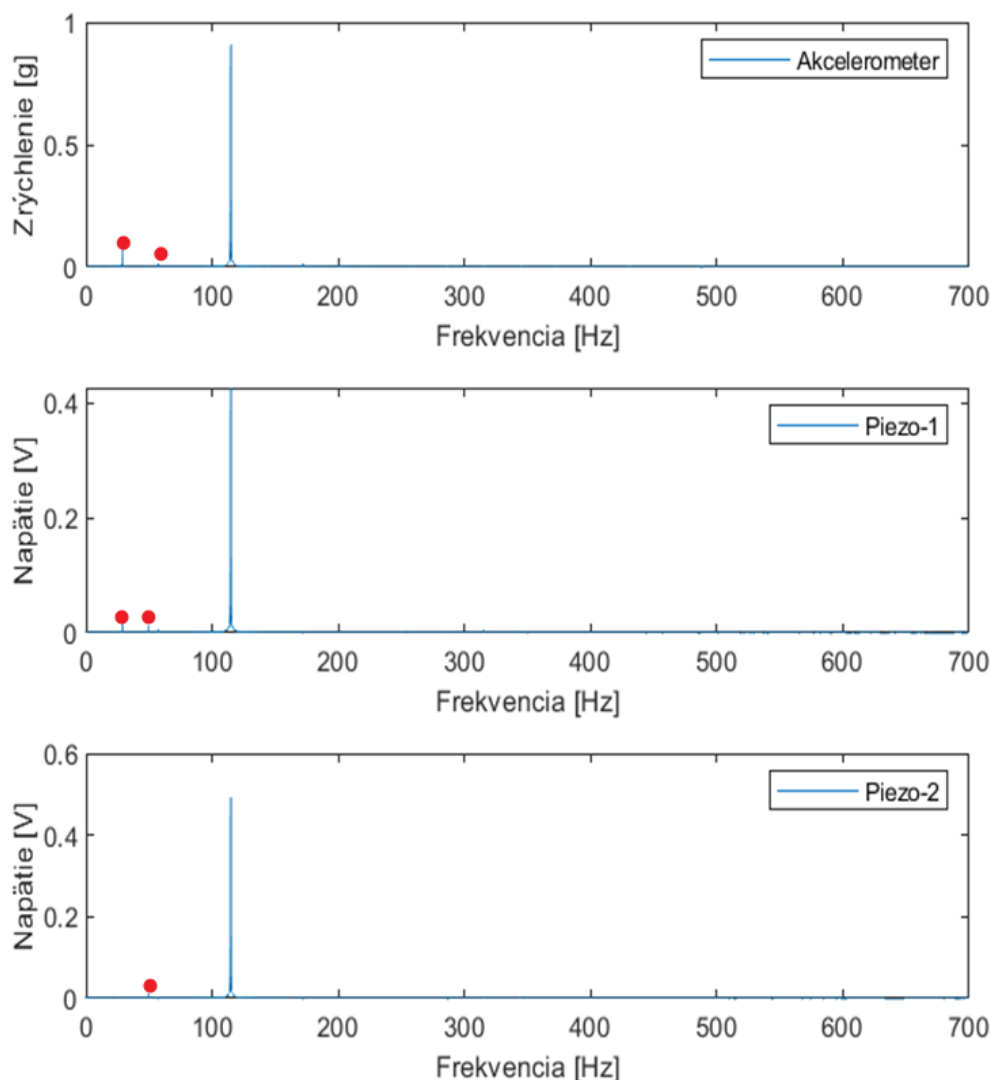
Následne boli na kmitaví nosník pridané nepravidelne vibrácie, čo môžeme vidieť na nasledujúcom obrázku.



Obrázok 12 Vibrácie nosníku s pridávnym kmitaním

Z obrázka si môžeme všimnúť, že vibrácie, ktoré boli na nosík pridané spôsobovali, že na určitých miestach vystúpila amplitúda signálu, pri akcelerometri až na 2g a pri piezoch do 2V. Čo predstavuje dvojnásobok oproti vibráciám bez pridávných otrasov.

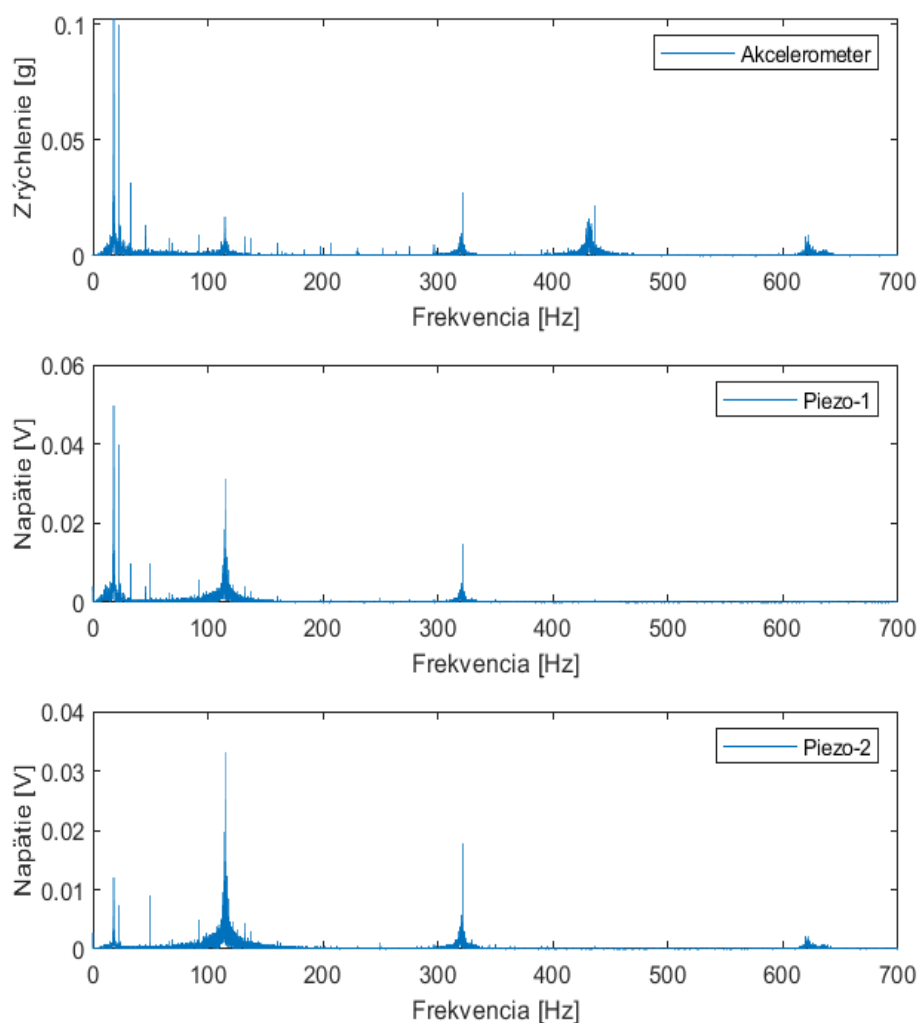
Po získaní signálu pokračovalo na rad jeho vyhodnotenie pomocou vibro-diagnostických metód, ktoré boli vysvetlené v kapitole 3. Tak začalo sa tým čo je nám známe a to je rýchla Fourierova transformácia, čiže získala sa amplitúdo - frekvenčná charakteristika.



Obrázok 13 Amplitúdo - frekvenčná charakteristika.

Po získaní charakteristiky môžeme vyčítať frekvenciu 115 Hz. Hodnota popisuje frekvenciu signálu, na ktorú bol budení nosník pomocou elektromagnetu. Okrem budiacej frekvencie si môžeme všimnúť, že pri meraní sa prejavili aj iné hodnoty, na obrázku sú označené červenými bodkami. Tieto údaje sa javia ako nežiaduce zložky pri jednoduchom budení nosníku. Ich amplitúdy sú veľmi malé oproti amplitúde budiacej frekvencie, z toho vyplýva, že sa môžu zanedbať. Porovnanie grafov medzi jednotlivými snímačmi naznačuje, že sú rovnaké.

Postupne bola urobená Fourierová transformácia i u vibrácii, ktoré obsahujú aj otrasy. Táto charakteristika je vyobrazená v nasledujúcom obrázku.

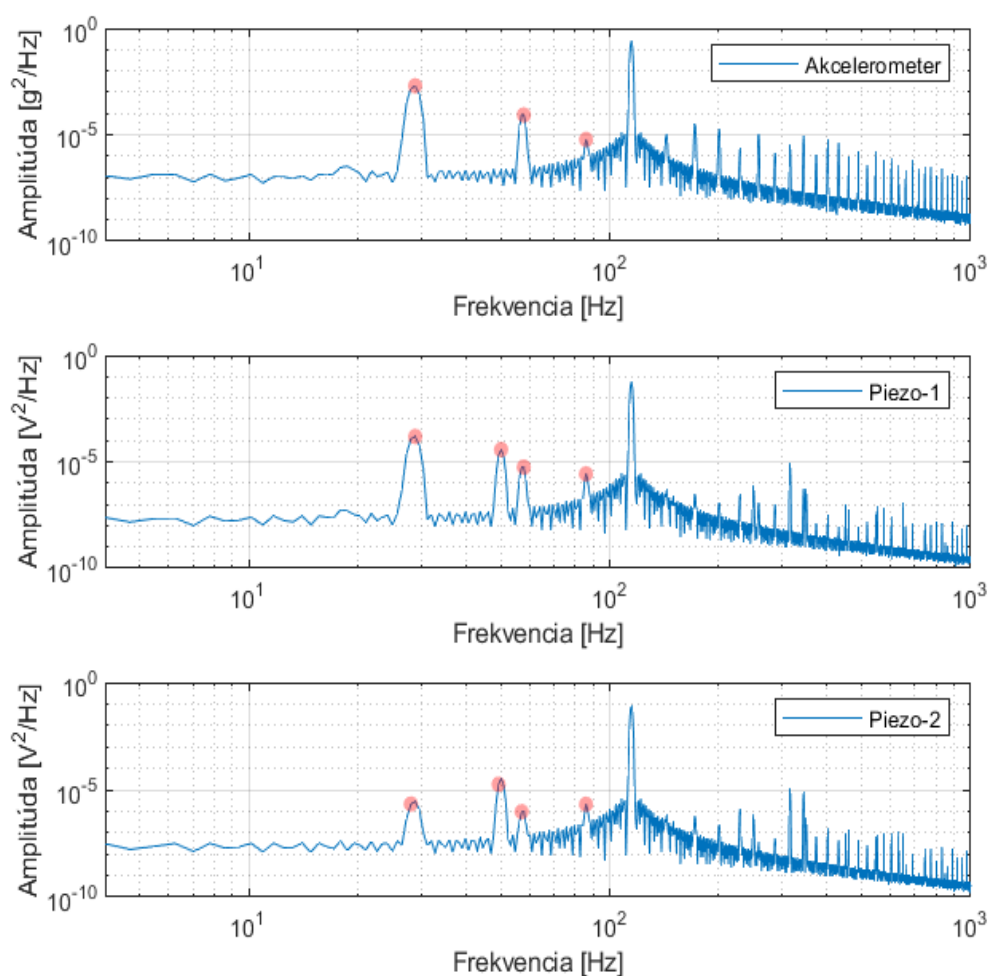


Obrázok 14 Amplitúdo-frekvenčná charak.. s pridávnym kmitaním

Po získaní charakteristiky sa zistilo, že okrem druhej vlastnej frekvencie na, ktorú bol nosník budený, sa prejavila aj prvá, tretia a dokonca bolo pomocou akcelerometra a druhého pieza zachytiť aj piatu frekvenciu. A tiež pri akcelerometri bolo možné odhaliť aj štvrtú vlastnú frekvenciu. Čo pri piezoelektrických snímačov pravdepodobne nie je možné, pretože tvar a smer kmitania nosníku pri tejto frekvencii je odlišný ako pri ostatných tvarov. Naše piezo nie je schopné zachytiť vibrácie v tomto smere. Aby bolo možné merať v inom smere, muselo by sa použiť druhé piezo pre druhý smer.

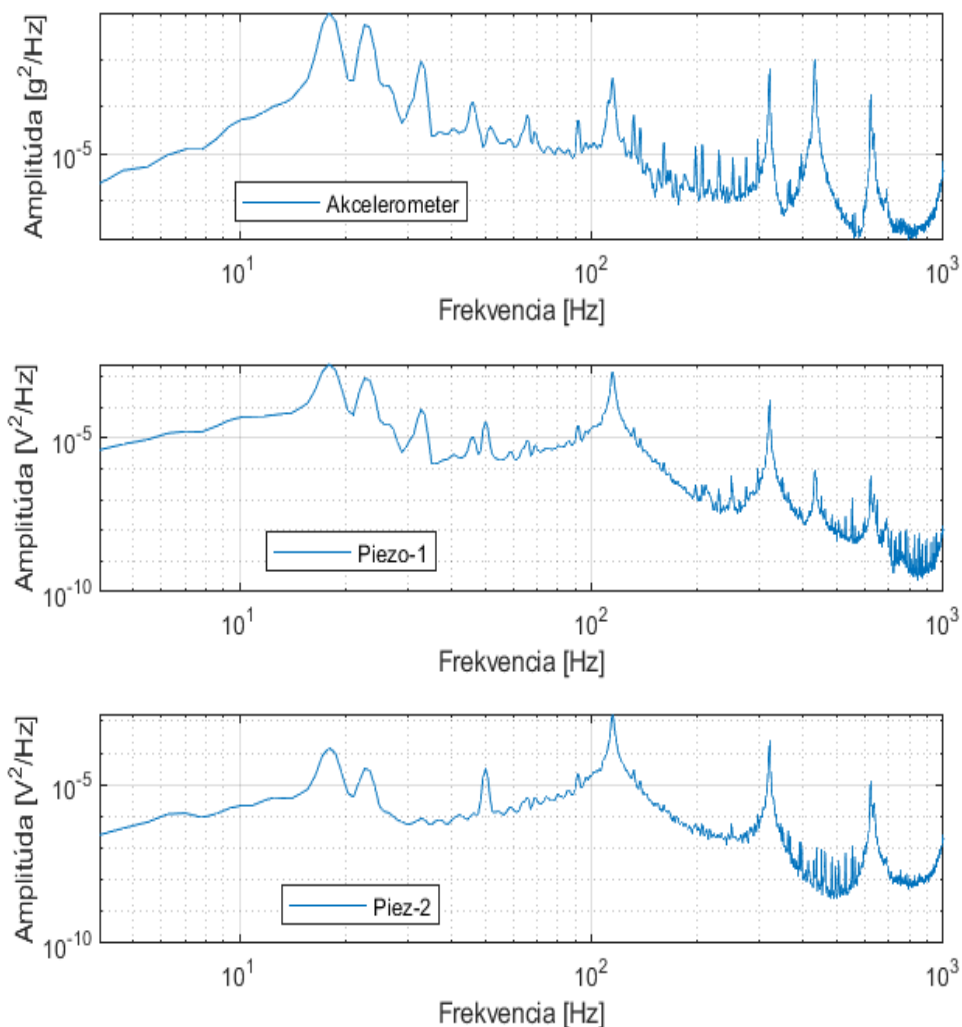
Ďalšou možnosťou spektrálnej analýzy je pomocou „Power spectral density“(PSD) metódy, ktorá vyjadruje závislosť sily signálu na frekvencii. Na výpočet PSD bola použitá Welchová metóda, ktorá sa aplikovala na namerané dáta.

Na nasledujúcom obrázku č. 15 je vidieť výsledky, získane výpočtom PSD pre dáta, ktoré boli len budené. Hneď si môžeme všimnúť, že budiaca frekvencia bola 115 Hz, pretože v grafe je vyjadrený najväčší výkon frekvencie prejavujúcej sa vo vibrácii. Okrem toho tiež pozorujeme, že aj frekvencie, ktoré boli zaznamenávané pomocou FFT (obr. 13, červené bodky), ale pre tieto frekvencie bola amplitúda veľmi malá až nedetekovateľná. No pomocou PSD bolo zistené, že frekvencie zasahujú do signálu dostatočne veľkým signálom aby boli zaznamenané, hlavne pri akcelerometri a piezu-1. Tiež je vidieť aj výkon šumu, ktorý sa v signáli prejavuje.



Obrázok 15 PSD - budený nosník

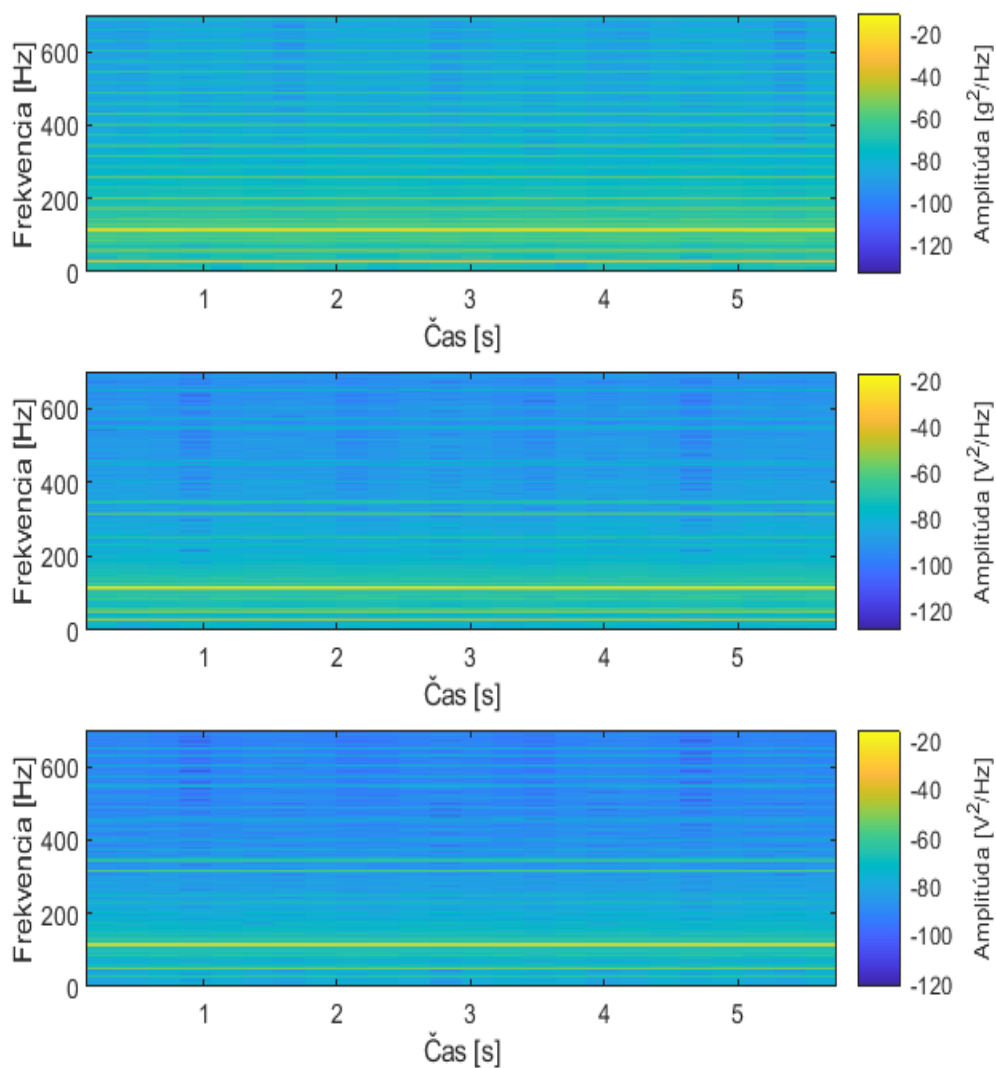
Po výpočte PSD pre dáta, ktoré boli len budené, nasleduje kalkulácia „power spectral density“ pre dáta, ktoré sme budili na danú frekvenciu a plus sme pridali prídavné vibrácie vyjadrujúce nejakú vadu.



Obrázok 16 PSD - budenie s otrasmi

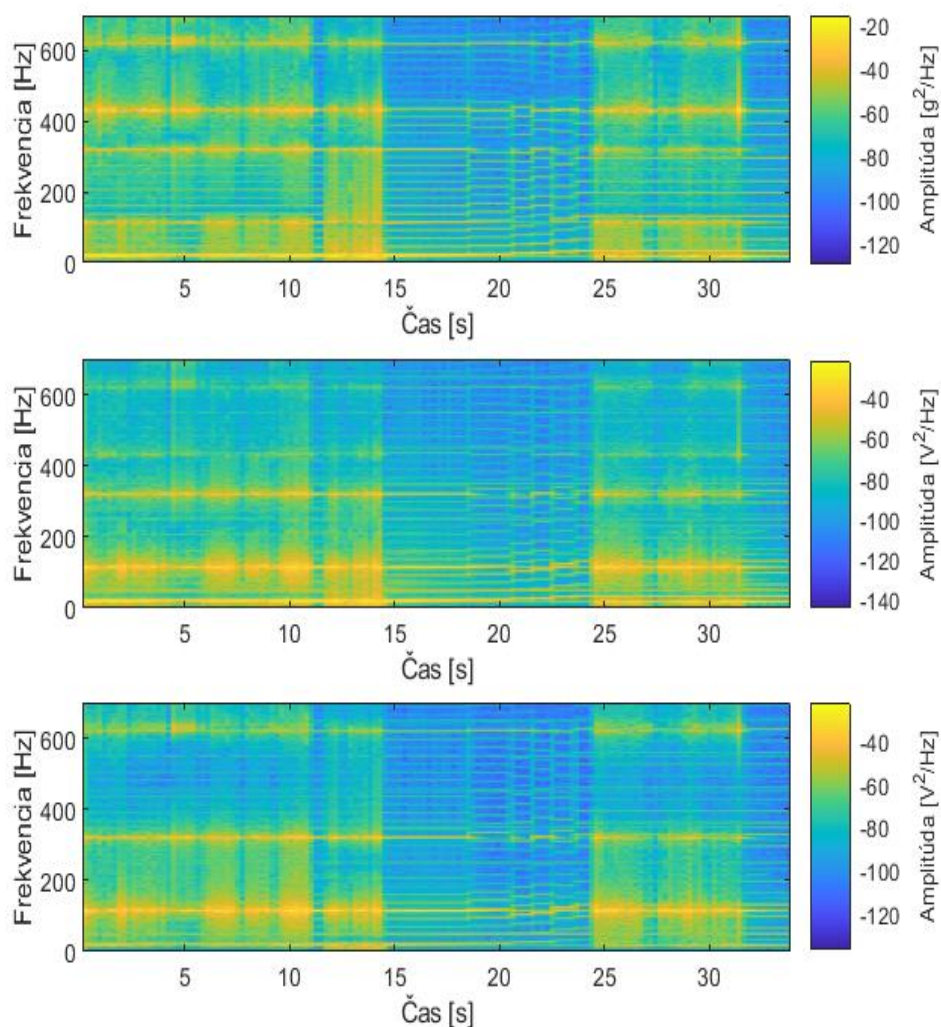
Po výpočtu PSD bol získaný výkon jednotlivých frekvencií signálu (obr. 16). Ako prvé si je možné všimnúť, že budiaca frekvencia má menší výkon ako frekvencie prídavných vibrácií. Platí iba pre akcelerometer, pre piezo-1 sú rovnaké, ale na druhej strane pre piezo-2 je to naopak. Tiež je vidieť, že štvrtá frekvencia je vyobrazená na grafe pre piezo-1, čo pri FFT nebolo vidieť ale jej výkon je malý, to tiež platí pre piatu frekvenciu. Na druhej strane pre dáta získané akcelerometrom majú tieto frekvencie vyšší výkon, dokonca väčší než budiaca frekvencia 115 Hz.

Okrem už použitých metód pre spektrálnu analýzu sa použil aj Spektrogram, vyjadruje závislosť frekvencie signálu na čase, pričom farby určujú aký výkon je pre určitú frekvenciu.



Obrázok 17 Spektrogram - budený nosník

Po získaní spektrogramu, ktorý môžeme vidieť na obrázku 17., sme došli k výsledkom. Tieto hodnoty boli očakávané, pretože nosník bol iba budený na harmonickú frekvenciu. V spektrograme môžeme vidieť, že budiaca frekvencia bola 115 Hz a je počas celého merania rovnaká, na obrázku 17. je to žltá priamka. Tiež sa tam prejavil aj šum, ktorý tam vznikol ako slabé zelené priamky. Spektrogram je podobný PSD, ale ešte je tam pridaná tretia osa a tou je čas.



Obrázok 18 Spektrogram - budený nosník + otrasy

Následne bol vytvorený spektrogram z dát, meraných pri budenom nosníku s prídavnými otrasmi. Na spektrograme sa vyobrazili frekvencie získané predošlými metódami. Ale ich sila nie je konštantná v časovom úseku, mení sa s časom. V celom časovom úseku máme oblasť od 15 do 25 sekúnd, kde sila vibrácií je menšia oproti ostatným oblastiam. To je spôsobené tým, že v tento časový úsek boli otrasy malé. V spektrograme, pri akcelerometri prevláda frekvencia 18 Hz a pri piezoch prevláda frekvencia 115 Hz, sú znázornené jasnými žltými pruhmi. Okrem hlavných frekvencií sú znázornené na obrázku 18. zelenými pruhmi aj iné frekvencie, ktoré už nemajú takú veľkú silu.

Ďalšími metódami ako spracovať a analyzovať vibrácie sú Crest factor, Kurtosi a Skewnes. Tieto metódy oproti ostatným sú jednoduché a rýchle na spracovanie. Nie je potrebné nad nimi veľmi uvažovať, pretože výsledkom je len hodnota, ktorá nám udáva či sa v signále nachádzajú vibrácie spôsobené nejakým defektom. Na druhej strane nám tieto metódy poskytujú len hrubé výsledky, to znamená, že nepopisujú frekvencie a amplitúdu ani ich silu. Pre presnejšie výsledky musíme použiť ostatné metódy.

Ako prvé, aby sme mohli použiť tieto metódy, musíme zistiť maximálnu amplitúdu signálu a tiež je potrebné dopočítať efektívnu hodnotu signálu.

Tabuľka 4 Výsledky metód

Výsledky	
Maximálna amplitúda akcelerometra	1,064
Maximálna amplitúda pieza 1	0,506
Maximálna amplitúda pieza 2	0,558
RMS akcelerometra	0,693
RMS pieza 1	0,325
RMS pieza 2	0,375
Crest faktor akcelerometra	1,54
Crest faktor pieza 1	1,56
Crest faktor pieza 2	1,49
Kurtosis akcelerometra	1,53
Kurtosis pieza 1	1,51
Kurtosis pieza 2	1,49
Skewness akcelerometra	-0,003
Skewness pieza 1	-0,002
Skewness pieza 2	-0,004

Získané výsledky týchto metód pre budenie nosníka vidíme v tabuľke 4. Bola dopočítaná maximálna amplitúda a efektívna hodnota akcelerometra a pieza 1 a 2, čo nám pomohlo pri výpočte metód. Hodnoty pre Crest faktor vychádzajú približne rovnako s menšími odchýlkami. Najviac sa odlišuje hodnota pre piezo-2. Výsledky môžeme porovnať s teoretickou hodnotou, čo je hodnota 1.4 sínusového signálu. Naše hodnoty sú o 0.1 väčšie, čo je prijateľné, pretože sa stále nachádzame v danom rozsahu. Tento údaj nám hovorí, že v signálu sa nenachádzajú iné vibrácie spôsobené nejakým poškodením, ale vyjadruje, že vibrácie sú sínusové.

Pre Kurtosis to platí podobne ako pre Crest faktor. Hodnoty sa navzájom odlišujú iba o 0.02, čo je málo. Ideálna hodnota je 3, čo predstavuje Gaussovo rozdelenie signálu. V našom prípade hodnota menšia ako 3, čo je podstate tiež prijateľné, horšie by bolo keby hodnota bola väčšia ako 3. Nami vypočítaná hodnota ukazuje, že náš signál nie je Gaussovo rozdelenie a že tiež neobsahuje nežiaduce vibrácie spôsobené poškodením.

Posledné hodnoty sú pre metódu Skewnes. Tieto hodnoty sú tiež dostatočne presne a sú podstate rovno k nule. Kontrolný údaj pre Skewness je hodnota 0. V našom prípade hodnoty vyšli záporne a to znamená, že rozdelenie signálu je posunuté v grafe o 0.003 do pravá ale len o veľmi málo, z toho je možné konštatovať, že všetko je v poriadku.

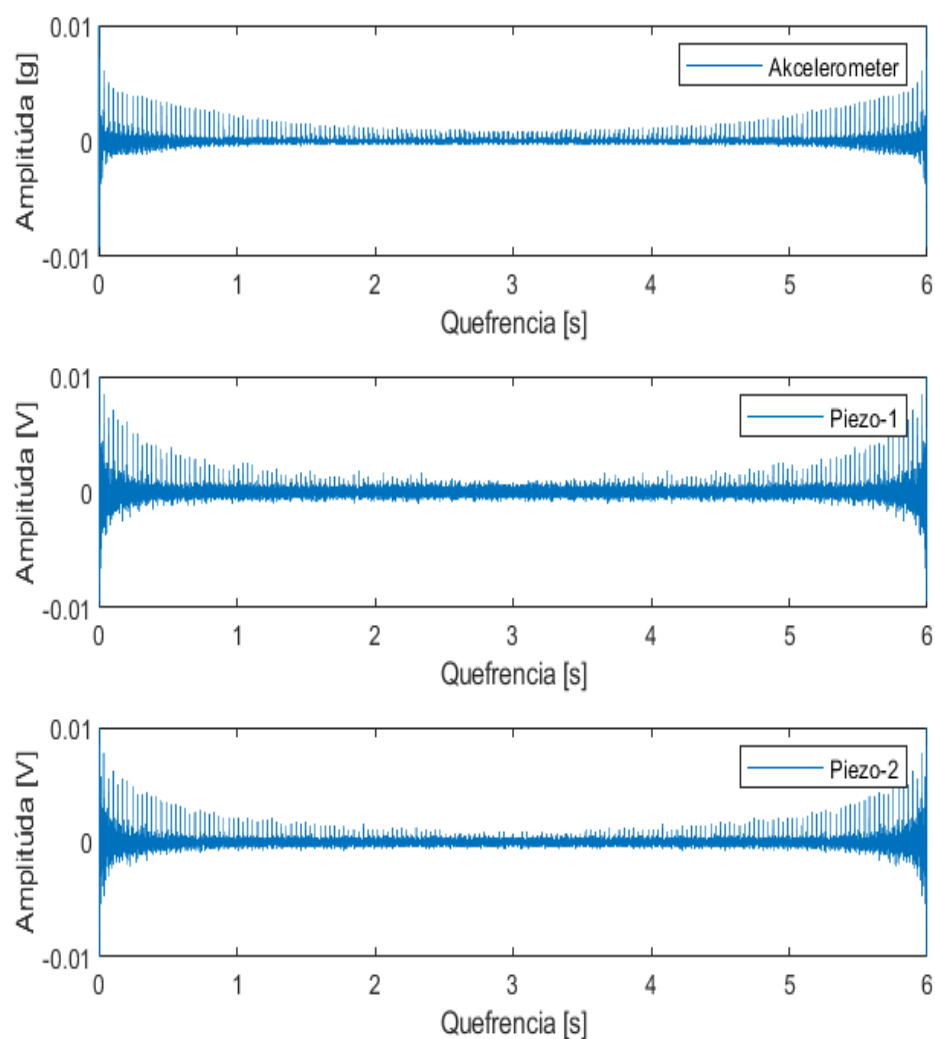
Následne sa pokračovalo aj pre prípad, kde do budenia nosníku boli pridané prídávne vibrácie, čo predstavovali poškodenie. Výsledky sú zobrazené v tabuľke 5.

Tabuľka 5 Výsledky budení nosníka s otrasmami

Výsledky	
Maximálna amplitúda akcelerometra	2,311
Maximálna amplitúda pieza 1	0,966
Maximálna amplitúda pieza 2	0,897
RMS akcelerometra	0,229
RMS pieza 1	0,119
RMS pieza 2	0,09
Crest faktor akcelerometra	10,08
Crest faktor pieza 1	8,11
Crest faktor pieza 2	9,99
Kurtosis akcelerometra	5,15
Kurtosis pieza 1	5,92
Kurtosis pieza 2	7,34
Skewness akcelerometra	0,096
Skewness pieza 1	0,182
Skewness pieza 2	0,123

Tak pre všetky tri metódy je vidieť, že výsledky sa zväčšili oproti predošlým hodnotám, čo bolo spôsobené prídavnými vibráciami. Pre Crest faktor vyšla hodnota priemerne 9, čo je v porovnaní s predšlou hodnotou o 8 viac, čo je pomerne dosť veľa, keby sme to porovnali z oblastami, ktoré určujú stav ložiska, tak by sa zistilo, že ložisko je veľmi poškodené a je potrebné ho vymeniť inak dôjde k havárii. Priemerná hodnota pre Kurtosis nám vyšla 6, čo je dvakrát viac ako je hodnota pre Gaussovo rozdelenie, tiež hodnota indikuje, že v signáli sa nachádzajú poškodzujúce vibrácie. Rovnako to platí aj pre Skewness, výsledok sa oproti predchádzajúcemu veľmi líši dokonca aj hodnoty sú kladné, čo spôsobuje posunutie rozdelenia do ľavá od nulovej hodnoty.

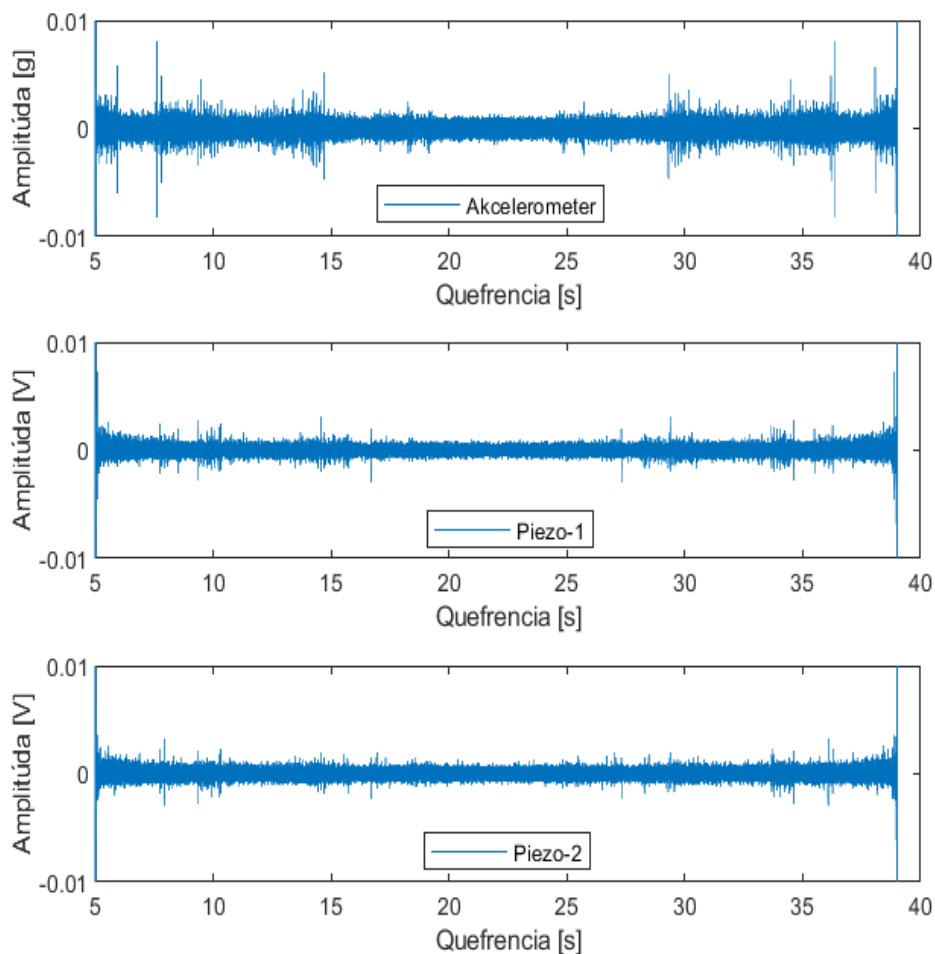
Predposlednou metódou na vyhodnotenie vibrácií je Kepstralna analýza. V predchádzajúcej kapitole 3.5. sme túto metódu popísali a povedali, že je to vlastne inverzná Fourierová transformácia logaritmovaného spektra, a že sa delí na výkonové a komplexne kepstrum. V našom prípade budeme používať „power“- reálne kepstrum, pretože sa využíva na nájdenie periodicky sa opakujúcich zložiek vo frekvenčnom. Pre túto metódu platí, že je vlastne doplnkovou metódou pre spektrálnu analýzu. Používa sa na porovnanie frekvenčných zložiek a následne nájdenie ich v časovom intervale. Výsledné hodnoty kepstra pre dáta namerané iba na budenom nosníku, boli vyobrazené v grafe, ktorý je na nasledujúcom obrázku.



Obrázok 19 Real kepstum - budený nosník

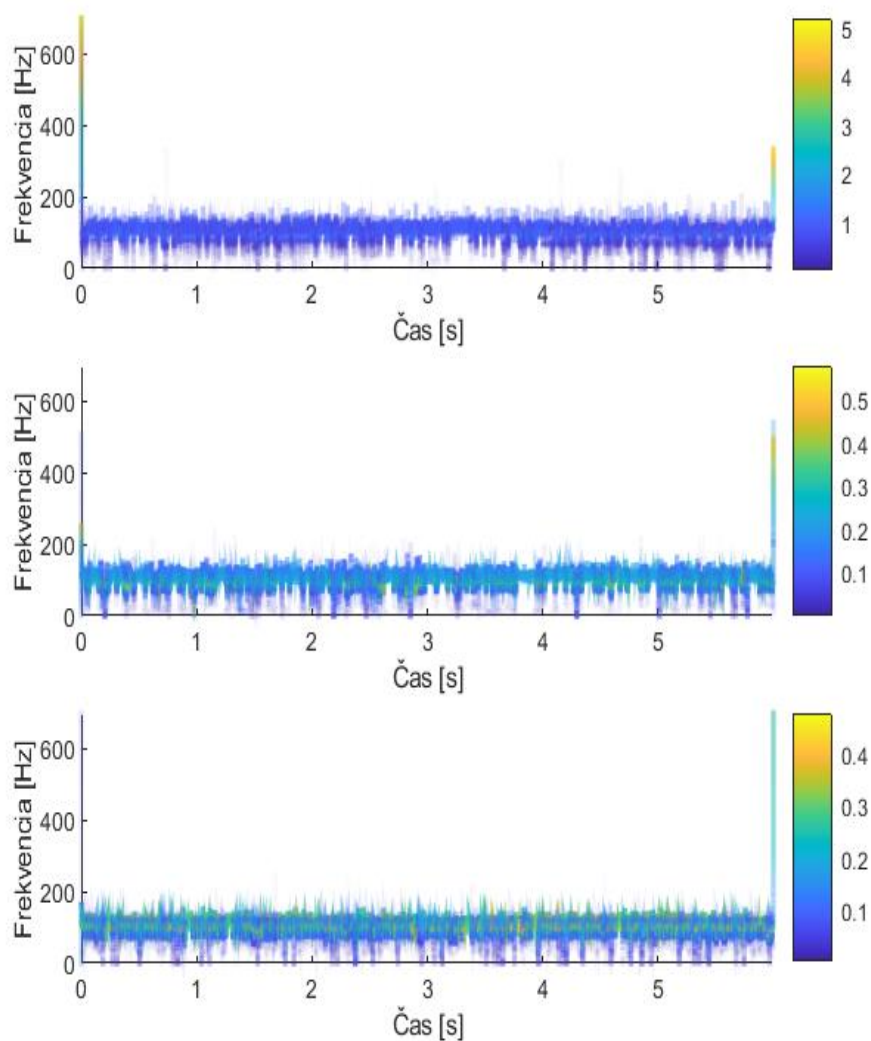
Vieme, že nosník bol budený na druhú vlastnú frekvenciu, to môžeme s pozorovať na obrázku ako kmitanie okolo hodnoty nula. Tiež je vidieť, že sa v grafe pre všetky snímače nachádzajú rôzne kmity, ktoré sú na kladnej strane hodnôt a tiež iba v úseku od 0s je maximálna hodnota a postupne klesajú do 1.5 s, potom sú hodnoty malé a zase sa to prejavuje 4.5 s, kde sú minimálne a postupne sa zväčšujú do konca. Pravdepodobne je to spôsobené ďalšími vonkajšími vibráciami, ktoré do merania vstupovali. Tieto frekvencie sa našli pomocou predchádzajúci metód, môžeme vidieť v amplitúdo-frekvenčnej charakteristike.

Keď sa porovnajú výsledky s tými, kde vibrácie obsahujú prídávne otrasy, môžeme vidieť na obrázku č. 20. V predchádzajúcimi metódami sme dokázali určiť aké frekvencie vstupujú do merania ako nežiaduce. Nasledujúcim grafe vidíme prejaví týchto periodických zložiek s danou frekvenciou ako jednotlivé piky. Pri porovnaní akcelerometra a piezoelektrických snímačov je vidieť, že najviac periodických zložiek je zachytené pomocou akcelerometra, kde aj tieto piky majú dostatočne výraznú amplitúdu aby ich bolo pekne rozoznať. Pričom pri piezo snímačoch si všimneme, že nie všetky výkyvy sú zachytené. Tie, ktoré sa podarilo zachytiť tak nemajú tak výraznú amplitúdu ako pri akcelerometri.



Obrázok 20 Real kepstrum - budený nosník s otrasmí

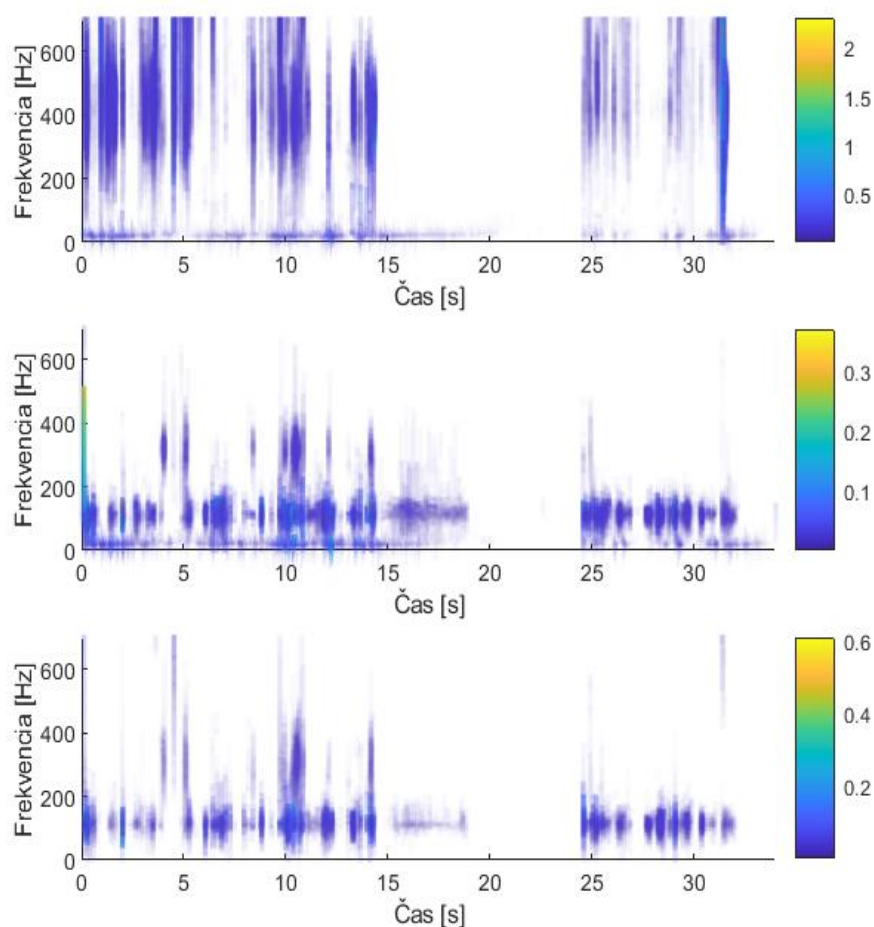
Poslednou metódou bola Hilbert-Haung transformácia, ktorá pomocou algoritmu EMD rozloží signál na niekoľko IMF funkcií a potom sa urobí Hilbertovo spektrum. Prakticky funguje podobne ako Spektrogram ale namiesto krátkodobej Fourierovej transformácie využíva EMD a Hilbertovo spektrum. V nasledujúcich obrázkoch bola urobená HHT pre dáta budeného nosníku a dáta, ktoré obsahovali aj otrasy.



Obrázok 21 HHT budený nosník

Na grafe vidíme výsledky HHT pre nosník budený na druhú harmonickú frekvenciu. Pri kalkulácii bolo pomocou EMD signál rozdelený na 10 IMF funkcií. Z výsledkov HHT môžeme povedať, že grafy sú podobné so spektrogramom. Tiež vyjadruje závislosť frekvencie na čase a tretím rozmerom sú farby, ktoré určujú výkon frekvenčnej zložky signálu. Na obrázku je iba znázornená frekvencia 115 Hz, ktorá je iba konštantná po celý čas. Ostatné nežiaduce frekvencie neboli vyobrazené.

Následne sa výpočet aplikoval na dáta s otrasmi. Výsledky sa tiež zhodovali z výsledkami pri spektrogramu, len to nie je tak presne vyobrazené. Tiež môžeme vidieť frekvencie, ktoré majú najväčšiu silu pri jednotlivých senzoro. Okrem toho môžeme pozorovať oblasť, kde nie sú zobrazené frekvencie, ale bola posunutá oproti spektrogramu, tam začínala od 15s ale pri HHT začína od 19s. Okrem už spomínaných vecí si môžeme všimnúť, že pri piezoch sa prejavuje vo väčšine úseku iba druha vlastná frekvencia a ostatne sa prejavujú len malo alebo vôbec. Napríklad pri frekvencii 320 Hz, ktorá sa prejavuje iba okolo 5,10 a 15 sekundy. Tiež môžeme pozorovať, že sú vyobrazené frekvencie, ktoré majú dostatočne veľký výkon. Na druhej strane môžeme skonštatovať, že spektrogram je o niečo presnejší ako HHT, pretože tam sú aj frekvencie s menším výkonom.



Obrázok 22 HHT budený nosník s otrasmi

5.1. Vyhodnotenie a kalibrácia

V predchádzajúcej časti piatej kapitoly sme sa zaoberali meraním vibrácií nosníku, kde sa najprv na nosníku potrebovali experimentálne zistiť vlastne frekvencie a to tým, že sa do nosníku udrelo. Dáta boli pomocou FFT vyhodnotené a odtiaľ sa následne určili vlastne frekvencie. Potom nasledovala sadá meraní, kde nosník bol najprv budený na vlastnú frekvenciu. Pre zaujímavosť sa na nosník ešte popri kmitaní pridali, jednoduchým klepkáním, vibrácie predstavujúce poškodenie. Vibrácie boli pomocou metód vibrodignostiky spracované a porovnané medzi snímačmi. Tieto metódy, ktoré boli najprv určené na vyhodnotenie vibrácií namerané pomocou akcelerometru. Sa pri meraní a vyhodnocovaní zistilo, že je ich možné použiť i na spracovanie dát získaných pomocou piezoelektrických štruktúr. Nadobudnuté hodnoty sa pri všetkých troch snímačoch približne zhodovali. Rozdiel bol v tom, že amplitúdy zachytených vibrácií pri piezoch boli menšie ako amplitúdy vibrácií snímaných pomocou akcelerometru a to malo za následok zmenšenie amplitúd i pri výsledkoch. Pri meraní pomocou akcelerometru boli dosiahnuté dáta v jednotkách zrýchlenia čiže v „g“, pričom dáta pri piezo snímačoch boli v jednotkách napätia, čiže v voltoch(V). Nasledujúcou úlohou bolo získať hodnoty vibrácií pomocou pieza v jednotkách zrýchlenia a dosiahnuť toho aby sa aj amplitúdy zhodovali, je to možné pomocou kalibrácie pieza.

Kalibrácia sa bežne robí pri akcelerometroch a iných snímačoch. Taký hlavný dôvodom je to, že sa vyrobí nový snímač alebo potrebujeme aby daný senzor meral dáta pri iných podmienkach, než sú bežné. Základná myšlienka je taká, že určité vlastnosti snímača sa určia pomocou rovníc, ktoré sa na to používajú, ale je potrebné tieto výpočty experimentálne overiť a určiť ďalšie vlastnosti. To sa robí pomocou rôznych meraní zo senzorom pri rôznych podmienkach a následne sa tieto dáta vyhodnocujú.

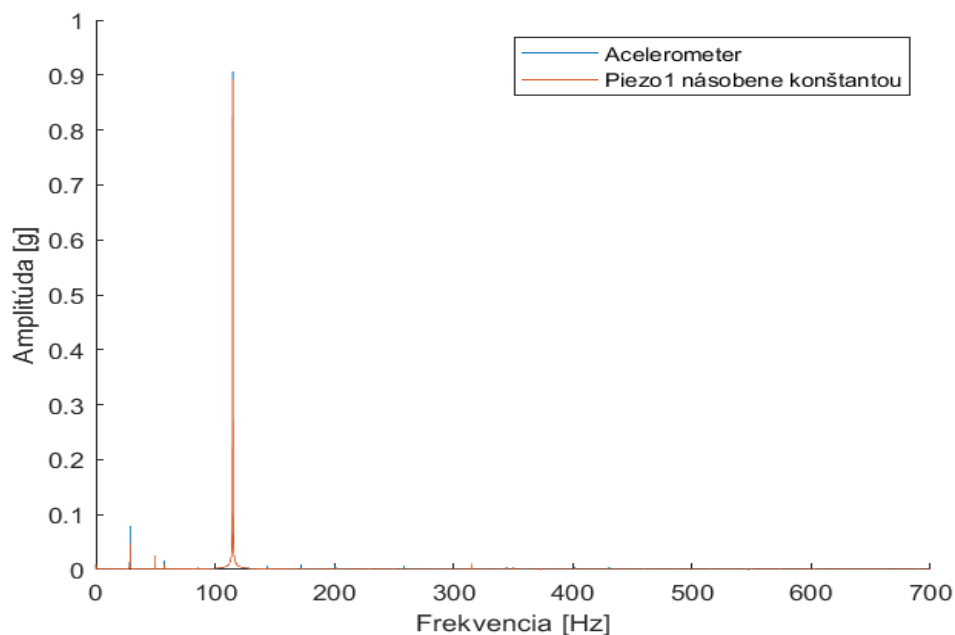
Jednou z vlastností, ktorú je pri akcelerometroch kalibrovať je aj konštanta prevodu. Táto hodnota nám pomáha previesť namerané dáta vo voltoch na dáta v jednotkách zrýchlenia. Bežne na to potrebujeme nejaký budič kmitov, druhý akcelerometer zo známymi vlastnosťami a tiež akcelerometer, ktorý chceme kalibrovať. Sústavu vytvoríme tak, že budič vibrácií umiestnime na pevnú podložku a na budič následne položíme známi akcelerometer a naň upevníme akcelerometer, ktorý chceme kalibrovať. Následne sa urobí sada merania a vyhodnotia sa výsledky. Potom pomocou rovnice získame konstantu prevodu.

$$S_a = S_{ref} \frac{V_a}{V_{ref}} \quad (5.1)$$

Kde S_{ref} a V_{ref} je konštanta a namerané napätie známeho akcelerometra a V_a je namerané napätie pomocou akcelerometra, ktorého chceme kalibrovať. S_a je konštanta prevodu[16].

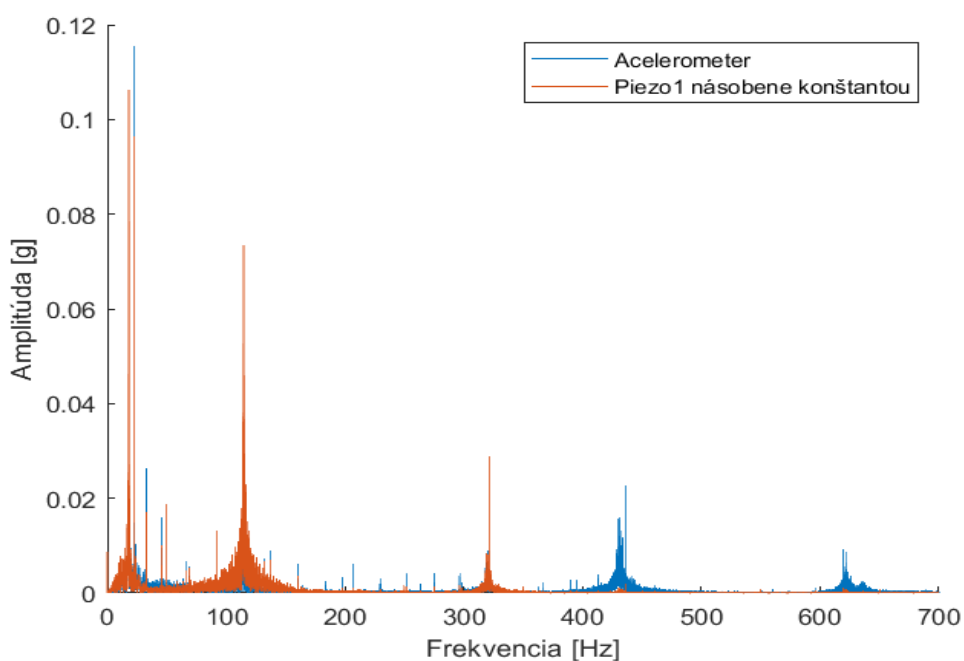
Pre náš prípad, sa bude kalibrovať piezo pomocou známeho akcelerometra. Postupovať budeme rovnakým spôsobom aký bol popísaný v predchádzajúcom odstavci. Budil sa nosník, na ktorom boli namerané dáta vibrácií a následne sa použil už spomínaný vzorec a vypočítala sa konštanta prevodu K. Pre piezo-1 je $K_1 = 2.09 \text{ g/V}$ a pre piezo-2 to je $K_2 = 1.89 \text{ g/V}$.

Pre overenie výpočtu sme dáta vynásobili konštantou K , hodnoty vo voltoch sme previedli na zrýchlenie, urobili sme FFT a získali sme.



Obrázok 23 FFT - dáta násobene K

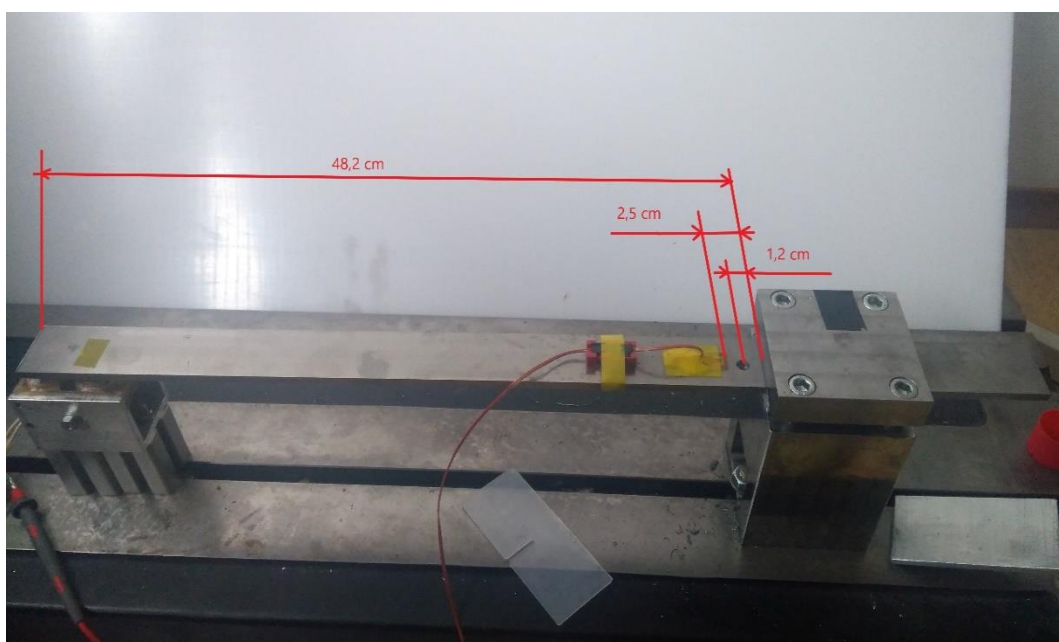
Z obrázka je vidieť, že sa hodnoty prekrývajú a to je čo sme chceli kalibráciou dosiahnuť. Na overenie sa ešte násobili údaje, získane pri budení nosníku s prídavnými otrasmi. Potom sa vypočítalo FFT. Výsledky sa prekrývali pri prvej, druhej a tretej harmonickej frekvencii aj ostatne frekvencie sa dostatočne prekrývali ale pri štvrtej a piatej sa neprekryli, pretože sa nemohli lebo tieto hodnoty neboli piezom-1 zachytené.



Obrázok 24 FFT dáta s otrasmi násobene K

6. Analýza nosníku s dierou

V tejto kapitole sa bude analyzovať vplyv poškodenia na nosník. Ako prvé je potrebné vytvoriť novú sústavu, ktorá bude deformovaná. Rovnako ako v predošlej to bude znova nosník rovnakého materiálu, z kalenej oceli. Na nosník znova nalepíme piezo snímač, no teraz nám postačí už iba jedno. Miesto nalepenia bolo znova pri votknutí, ale trochu ďalej od nej, približne 2,5 cm, čo je stále dobré miesto, kde bude pôsobiť dostatočná deformácia na to aby piezo ju dokázalo zachytiť. Posunutie bolo potrebné vzhľadom na to, že do miesta medzi piezom a väzbou, sa bude vrtáť diera. Stred vrtania bol umiestnený 1,2 cm od votknutia a 2,25 cm od bočnej hrany. Dĺžka nosníku bola skrátená oproti predhadzujúcemu modelu. Celú sústavu aj s dierou môžeme vidieť na nasledujúcom obrázku.



Obrázok 25 Nosník s dierou

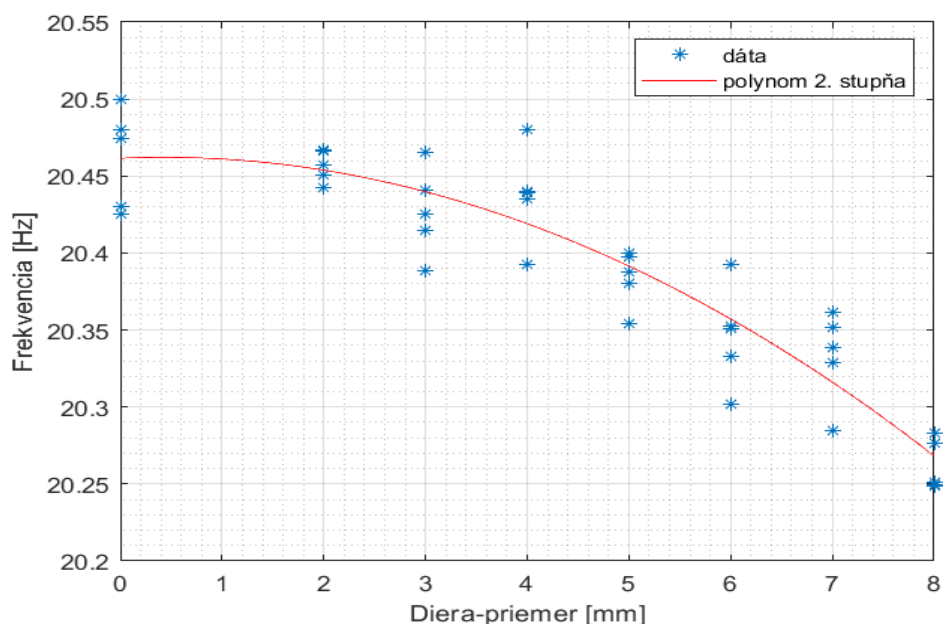
Diera bola vrtaná pomocou vŕtačky, kde bola k dispozícii sada vŕtákov pre priemer diery od 2-8 mm. Ešte predtým než sme celé meranie uskutočnili bolo potrebné znova určiť vlastné frekvencie, pretože sme zmenili dĺžku nosníku. Urobíme rovnakým postupom ako pri predchádzajúcej sústave, čiže výpočtom a experimentálne.

Tabuľka 6 Frekvencie

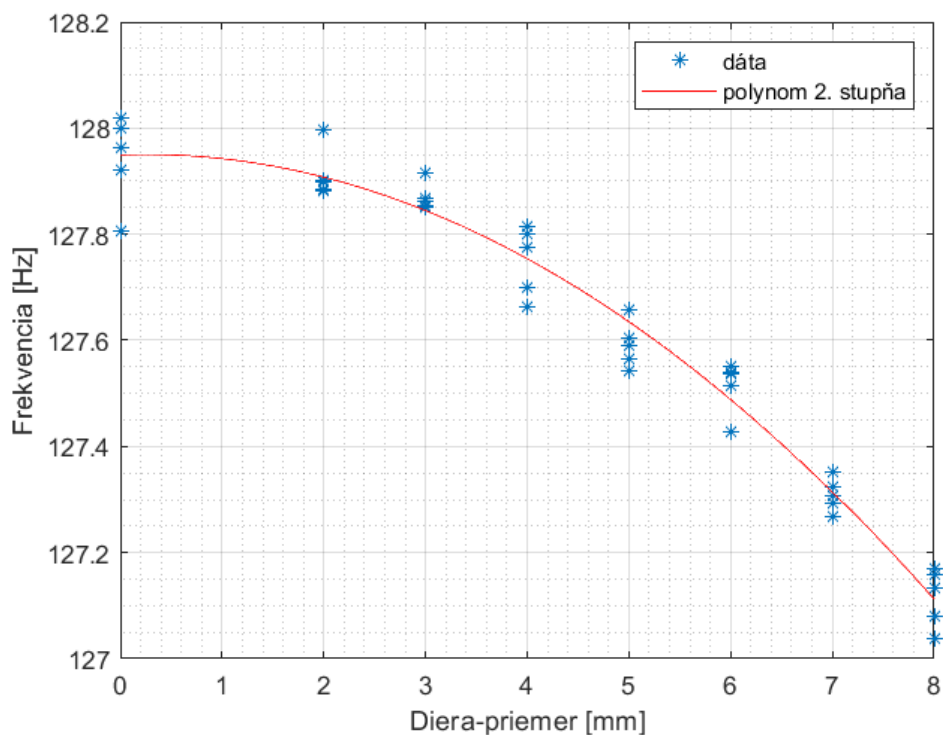
Tvar	Experimentálne	Výpočtom
1	20,5	20,508
2	128	128,42
3	358,65	359,39

Získané frekvencie sa približne rovnajú, čo pri druhej a tretej vlastnej frekvencie sa frekvencie získane výpočtom a experimentálne odlišujú o pol herca.

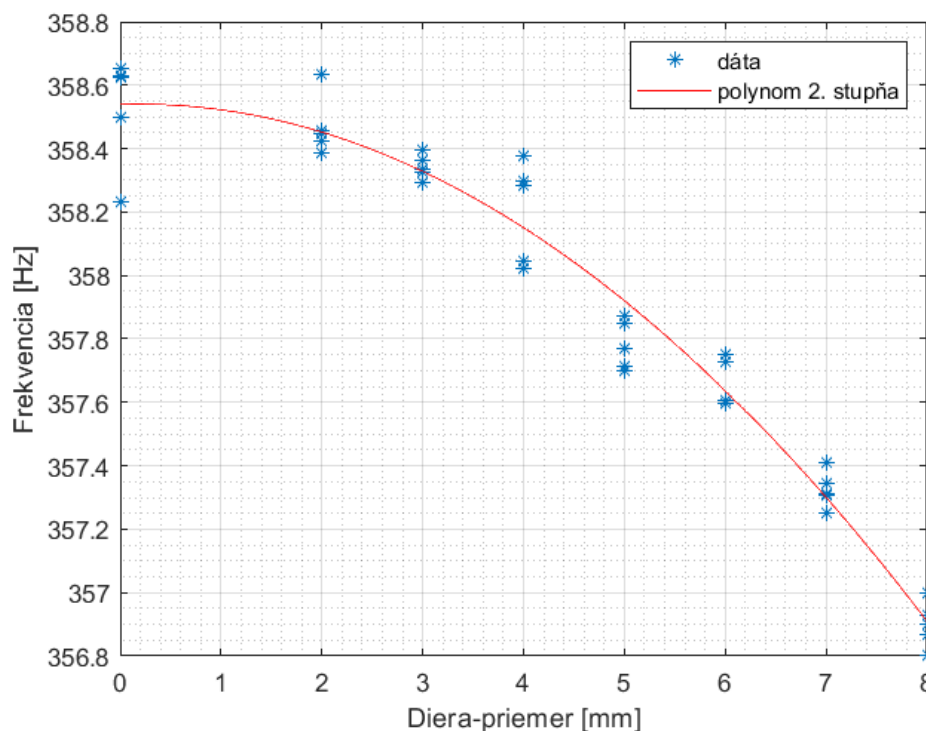
Po určení vlastných frekvencií môžeme prejsť k samotnému experimentu. Postupne sa do nosníku vyvrtala diera o veľkosti 2 mm. Nasledovne sa modálnym kladivkom buchlo po nosníku do určitého miesta. Celé meranie bolo opakované aspoň 5 krát. Potom sa postupne zväčšila diera a meranie bolo opakovane. Toto bolo robené pre každú dieru do priemeru 8mm. Dáta boli upravené a vypočítala sa amplitudo-frekvenčná závislosť, pomocou FFT. Kde sa analyzovali prejaví frekvencie.



Obrázok 26 Prvá vlastná frekvencia – experiment



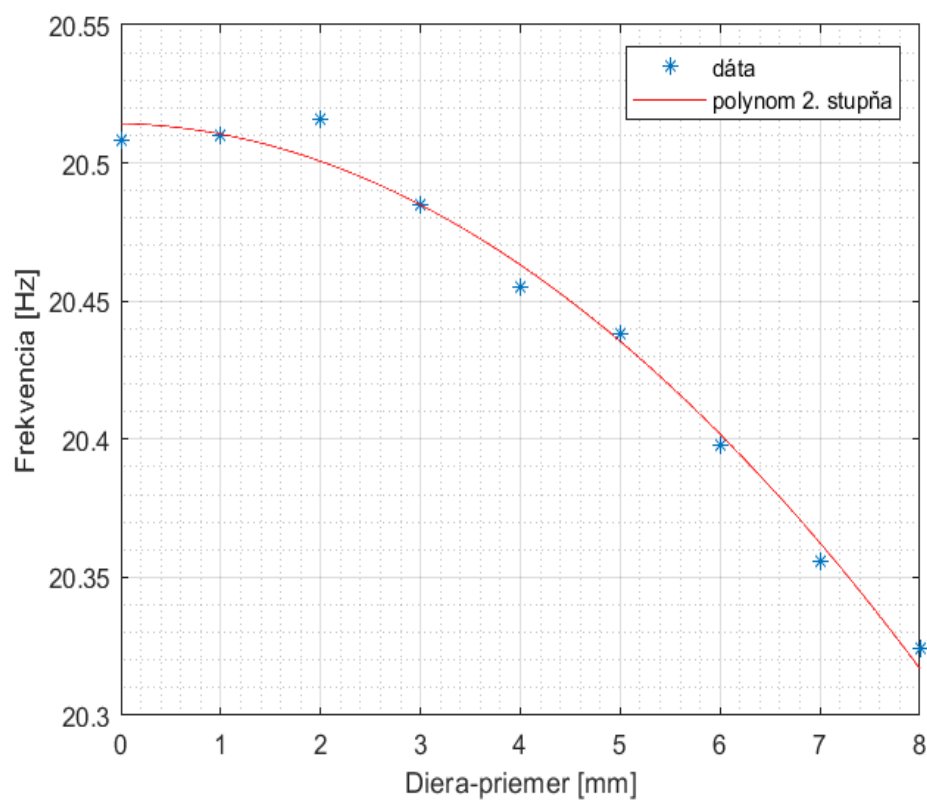
Obrázok 27 Druhá vlastná frekvencia – experiment



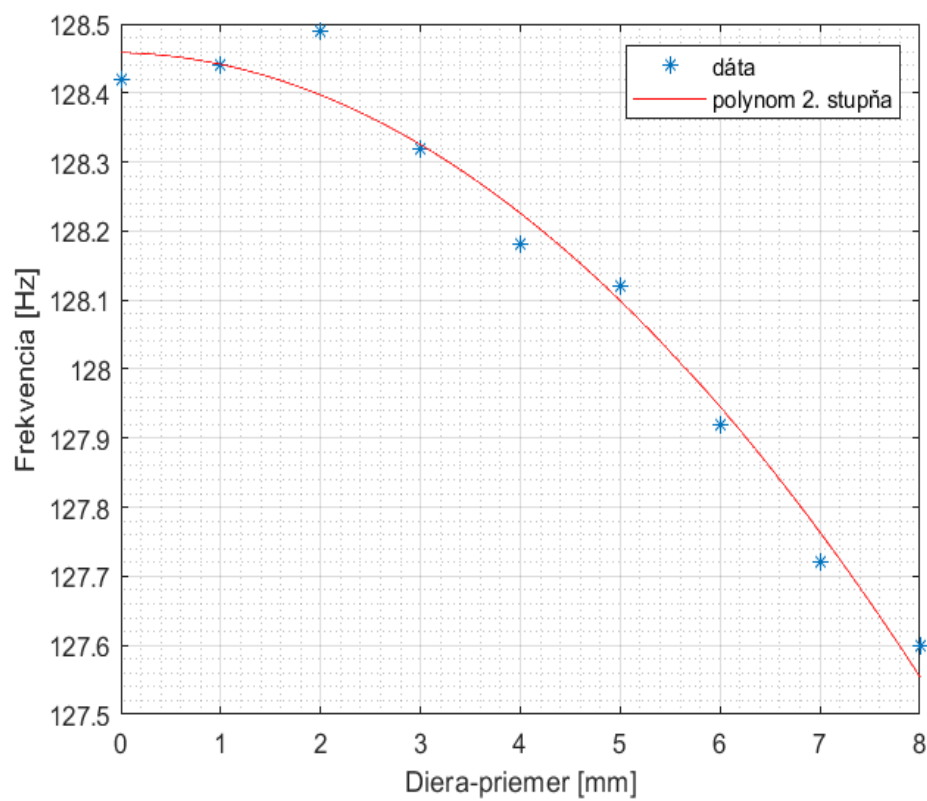
Obrázok 28 Tretia vlastná frekvencia – experiment

Predchádzajúcich grafoch pozorujeme ako sa menia frekvencie pri veľkosti diery. Dochádza k posuvom vlastných frekvencií smerom k nižším hodnotám. Je to spôsobené tým, že keď vyvrtávame dieru do nosníku, ktorú následne zväčšujeme, spôsobujeme to, že dochádza k zmene tuhosti nosníku. To potom ovplyvňuje vlastné frekvencie. Ako je vidieť na obrázkoch, že klesanie nie je lineárne ale klesá polynómom druhého stupňa. Tiež pozorujeme, že klesanie pri druhej a tretej frekvencii je rýchlejšie oproti prvej frekvencii. Prvá poklesne len o 0.25 Hz a pri druhej to je skoro o 1 Hz a pri tretej to je o 1.5 Hz. Podľa hodnôt je vidieť, že hodnoty pri 1. harmonickej sú viacej roztrúsené okolo trendovej spojnice, môže to byť spôsobené aj tým, že 1. vlastná frekvencia je citlivejšia na zmeny.

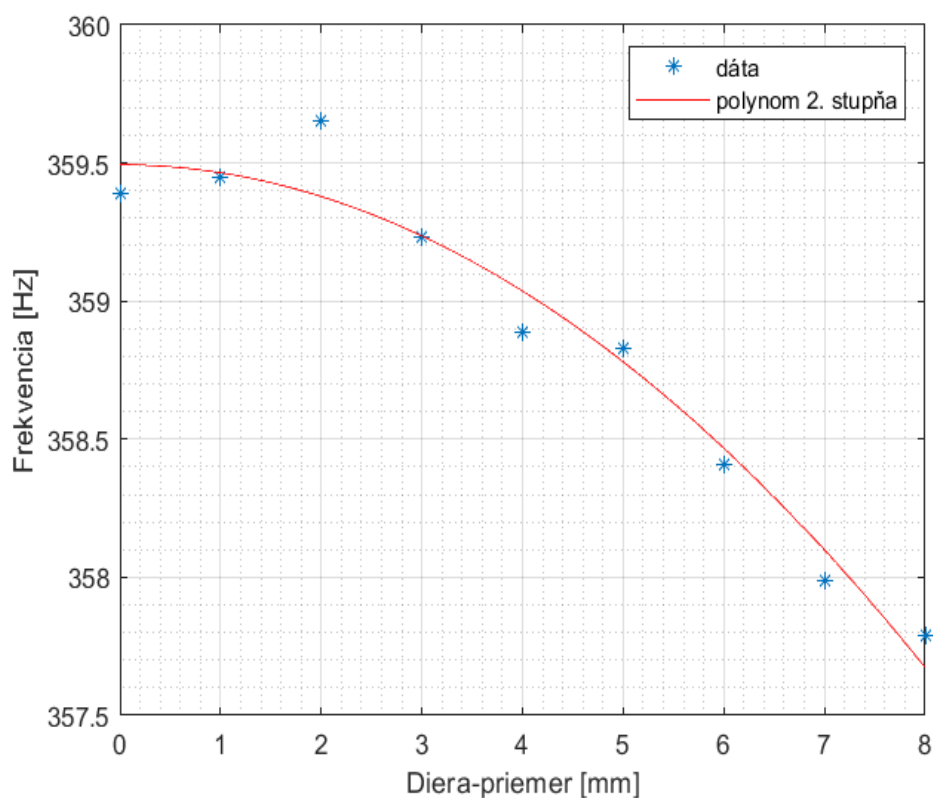
Získané hodnoty experimentálne sme sa pokúsili porovnať s hodnotami určenými výpočtom. Kalkulácia sa robila tiež pomocou programu ANSYS Workbench, kde bola sústava namodelovaná a urobila sa do modelu diery s podobnými parametrami ako na reálnej sústave a následne bola zväčšovaná. Hodnoty sa vyobrazili do nasledovných grafov.



Obrázok 29 Prvá vlastná frekvencia - výpočet



Obrázok 30 Druhá vlastná frekvencia – výpočet



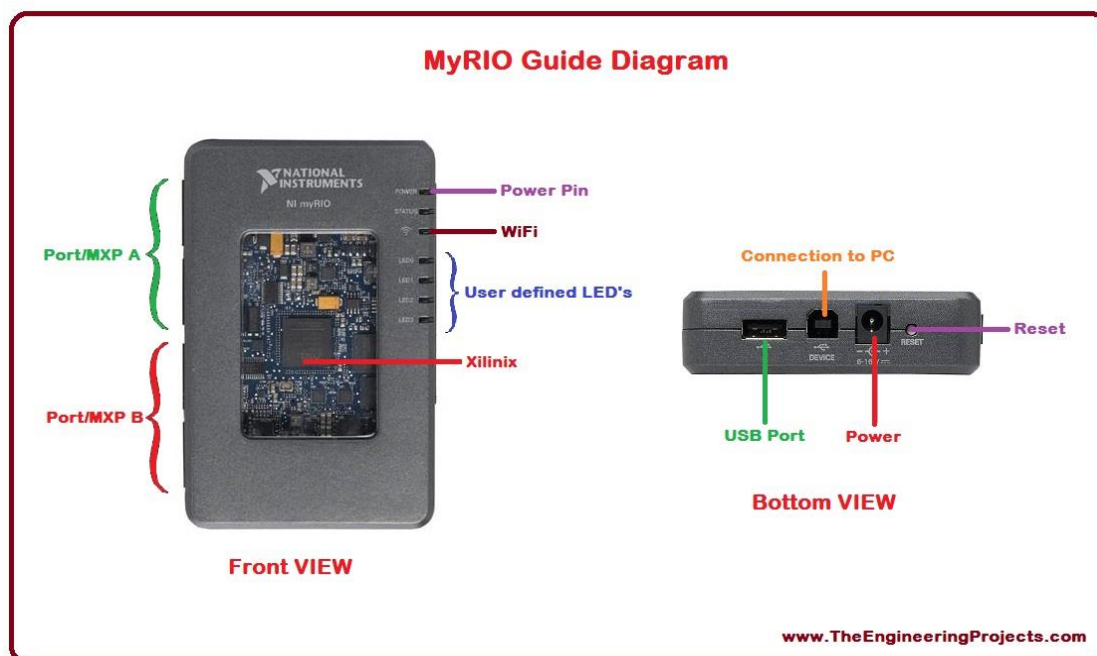
Obrázok 31 Tretia vlastná frekvencia – výpočet

Tieto výsledky pri porovnaní s hodnotami z experimentu sa zhodujú. Môžeme povedať, že sklon klesania údajov je tiež polynóm druhého stupňa a tiež majú rovnaký pokles. Pri výpočte hodnoty frekvencie s dierou priemeru 2 mm došlo k nepresnosti, čo spôsobuje, že táto hodnota je trochu mimo. Pozorovalo sa, že pokles frekvencie zo zvyšujúcim radom je väčší, ako už bolo povedané, pri 1. je to 0.25, pri 2. je to 1 a pri 3. je to 1.5. Toto sme sa pokúsili výpočtom overiť, tak sa spočítali vyššie harmonické frekvencie, pri zmene priemeru diery a dostali sme, že pri 4. harmonickej to je o 1.5 Hz, pri 5. to je 2 Hz a pri 6. vlastnej frekvencie je to 2.5 Hz pri priemeru diery 8mm. Len škoda, že jedným piezo snímačom nie je možné ich zachytiť pre experimentálne overenie týchto hodnôt.

7. Ni myrio a aplikácia

7.1 Čo je NI myrio

NI myrio je prenosné vstavané zariadenie. Vytvorila ho spoločnosť National Instrument. Zariadenie obsahuje dvojjadrový ARM Cortex-A9 programovateľný mikroprocesor a tiež FPGA modul. Pomocou tohto zariadenia je pre študentov pomerne jednoduché navrhnuť zložité systémy a riešiť reálne problémy pomerne rýchlo a efektívne. Rýchlosť spracovania zariadenia je takmer desať násobok štandardných mikroprocesorov. Toto zariadenie sa používa v systémoch, kde je potrebná rýchla reakcia, napríklad CNC stroje, dvojkoľosové samovyvažovacie roboty a ďalšie. NI myrio podporuje rôzne programovacie jazyky ako sú napr. C/C++, ale firma National Instruments najčastejšie podporuje programovanie pomocou grafického jazyka „LabVIEW“, ktorý je vytvorený tou istou spoločnosťou. Myrio je znázornené na nasledujúcom obrázku.



Obrázok 32 Ni Myrio [14]

Zariadenie obsahuje 10 vstupov a 6 výstupov pre analógový signál, tiež má 40 pinov pre digitálny I/O vstup a výstup. Pripojiť zariadenie k počítaču alebo k inému zariadeniu môžeme prostredníctvom USB pripojenia alebo pomocou vstavanému WIFI zariadeniu. Okrem už spomínaného, tiež obsahuje porty na vstup a výstup pre audio a aj USB port. Zaujímavé je, že ma zabudovaný akcelerometer, ktorý meria v ose x, y a z. Môžeme na zariadení nájsť aj štyri programovateľné LED svetla a jedno programovateľné tlačidlo.

Hlavne výhody používania myrio je, že je multifunkčné, cenovo dostupné a prenosné. Je vhodné pre používanie pri rôznych úrovni znalosti v programovaní. Je tiež kompatibilné s rôznymi zariadeniami a má možnosť rozširovať sa o iné zariadenia. Jeho výhoda je aj použiteľnosť v rôznych odvetviach ako robotike, v kontrolných systémoch, mechatronických systémoch a tiež aj auto motíve a mnoho ďalších [14],[15].

7.2 Tvorba aplikácie

Poslednou úlohou bolo vytvorenie aplikácie, ktorá obsahovala všetky spomenuté metódy vibrodiagnostiky. Aplikácia bola používaná spolu s myrio zariadením, do ktorého sa napojili piezoelektrické snímače a pomocou nich sa merali vibrácie sústavy. Vibrácie sa automaticky analyzovali a pri potrebe sa ukladali na úložisko.

Aplikácia bola vytvorená preto, aby sa mohlo používať myrio zariadenie a teoreticky by dokázalo nahradiť iné zariadenia, ktoré sa na meranie vibrácií bežne používajú. Myrio by mohlo pracovať samostatne bez zásahu osoby. To znamená, že vyhodnocuje prijaté dáta a následne posiela užívateľovi informácie o stavu vyhodnocovaného zariadenia. Výhodou by bola aj jednoduchosť v používaní, stačilo by nám samotné zariadenie a sústavu na meranie, v prípade potreby počítač.

Cely kód aplikácie sa programoval pomocou jazyka LabVIEW od spoločnosti National Instruments. Jedná sa graficky programovací jazyk, to znamená, že algoritmus nie je písaný ako sme zvyknutý pri iných programovacích jazykoch, napríklad pri C. Namiesto toho sa program tvorí pomocou bločkov, kde sú už predprogramované jednotlivé funkcie.

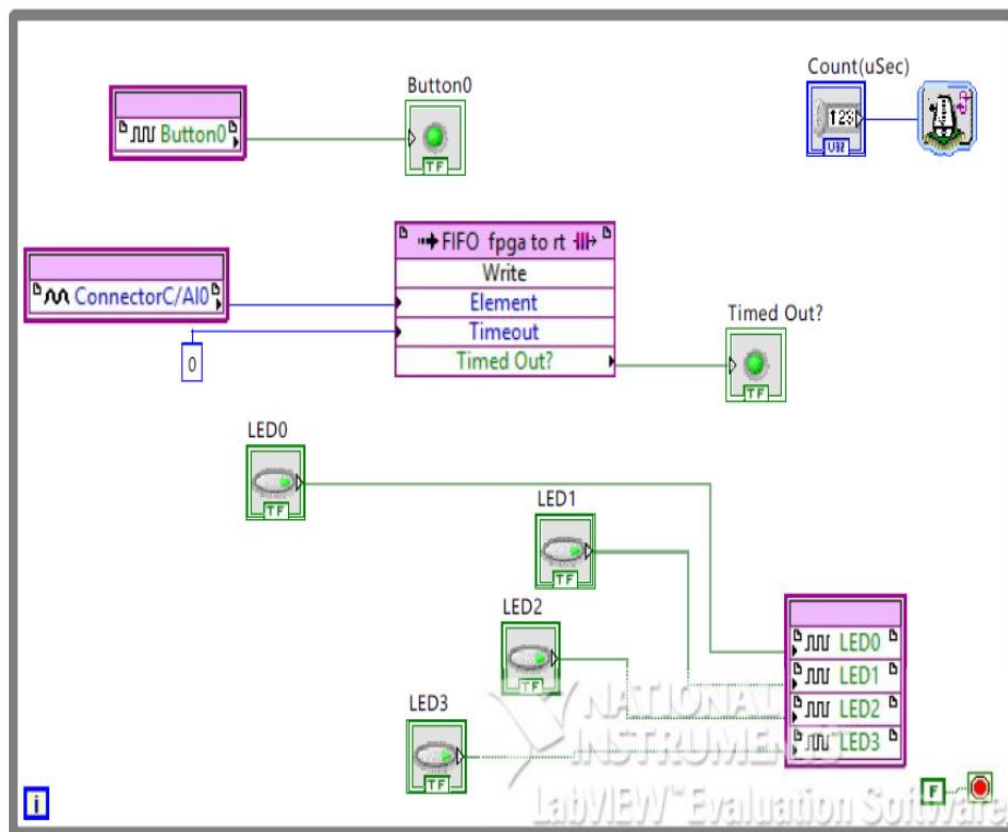
Základnou myšlienkou bolo rozdelenie programu na dve časti. Prvá časť, tak zvaná základná bola schopná po nahratí do myrio pracovať samostatne a poskytovať nám základne informácie. Druhá časť bola tvorená aj s užívateľským prostredím, kde sa mohli podľa potreby vykonávať aj zložitejšie analýzy.

Pri tvorbe prvej časti aplikácie bolo potrebné uvažovať ako by sa informácie o vyhodnotení vibrácii dostali k užívateľovi čo najjednoduchšou cestou. Naskytla sa nám možnosť použiť LED žiarovky alebo wifi. Najprv bolo uvažované použiť wifi sieť ale po preskúmaní návodu sa zistilo, že to nie je vhodná voľba. Tak nám zostalo iba použitie LED svietidiel. K dispozícii boli iba 4 žiarovky jednej farby. Potom bolo potrebné vybrať jednoduchú metódu vibrodiagnostiky, ktorá nám poskytla jednoduchú hodnotu o stave vibrácii. S predošlých kapitol môžeme použiť buď Crest factor, Kurtosi alebo Skewnes, vybrali sme Crest factor,

Postup pri tvorbe prvej časti bol nasledovný. Ako prvé bolo potrebné vytvoriť kód, ktorý tvorí samotný základ, ten sa následne nahral do myrio. Tento kód nám umožňoval pracovať s FPGA modulom a s konektormi, v ktorých bolo zapojené piezo. Použili sme port MSP C, kde sme zapojili piezo do konektorov AI0+ a AI0-, ktoré sa využívajú pri meraní signálu s rozsahom $\pm 10V$. Zapojilo sa iba jedno piezo, ale pri potrebe je možné ešte zapojiť druhé piezo.

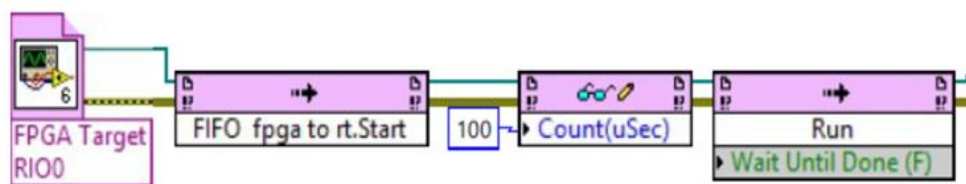
Na nasledujúcom obrázku je vidieť naprogramovaný kód pre FPGA modul. Kde sa ako prvé vložil bloček „I/O mode“, v ktorom sa nastavil konektor pre snímanie dát z pieza, pre náš prípad sa nastavilo konektor C a pin AI0. Tento bloček bol napojený na bloček „FIFO fpga to rt“, umožňuje prenášať dáta z FPGA modulu do „Real Time“. Okrem konektoru C, bola zapojená konštanta 0 do „Timeout“ a tiež sa zapojil indikátor, ktorý nám oznamuje, že došlo k prekročeniu limitu. Následne sa do kódu vložil bloček pre tlačidlo a pre LED svietidla, k nim bol pripojený indikátor a kontrolne bločky pre LED, v našom prípade tlačidla. Ako posledné tam bol vložený bloček pre časovanie cyklu, do ktorého sa pripojil kontrolný bloček, na zadávanie hodnoty v mikrosekúnd.

Tento kód slúži na prepojenie konektoru, tlačidla a LED žiaroviek so softvérom. Ukončenie bolo nastavené tak, že cyklus má fungovať do nekonečna.



Obrázok 33 Program v FPGA

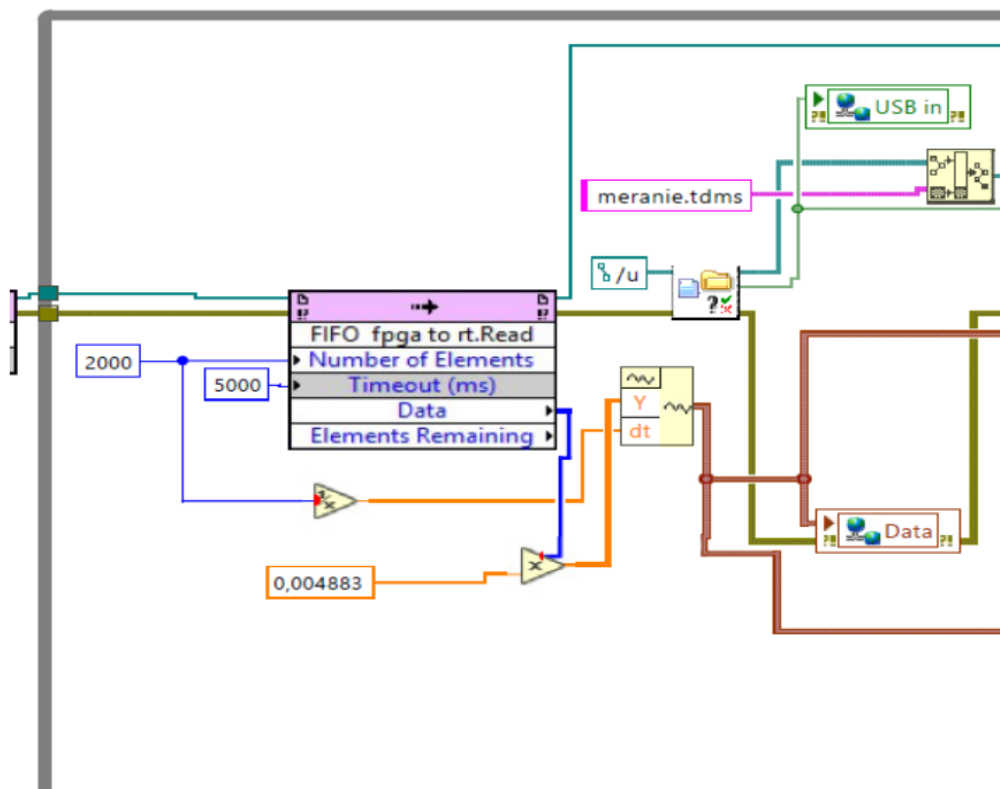
Potom bolo potrebné naprogramovať kód v „Real Time“. V ňom sa vytvorilo nové VI okno, kde sa postupne programovala prvá časť aplikácie. Kód je zobrazený na nasledujúcich obrázkoch.



Obrázok 34 Prvá časť programu v Real Time

Ako prvé sa musel prepojiť FPGA program s programom v „Real Time“, na to nám poslužil bloček „Open FPGA reference“, kde bol nastavený náš program. Ďalej sa pokračovalo zapnutím „FIFO“ bločku, zadala sa hodnota 100 μ s pre nastavenie časovania cyklu v FPGA, potom následne bolo FPGA spustené. Toto všetko sa spraví pred spustením samotného cyklu.

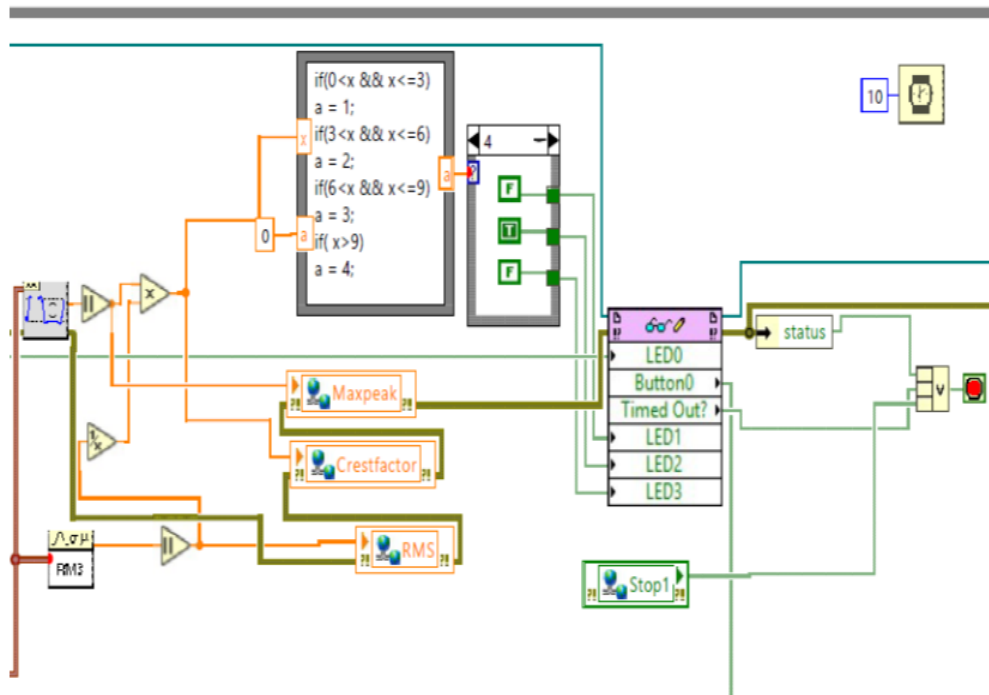
Nasleduje programovanie samotného cyklu, kde ako prvé nastavíme FIFO bloček, ktorý posiela dáta. Nastavuje sa počet prvkov čítania, tiež časovú hodnotu v milisekundách. Získané hodnoty vibrácií sú v surovej podobe a je ich potrebné prepočítať. V „datasheet-e“ pre myrio sme našli rovnicu prepočtu a vypočítala sa hodnota 0.004883. Po vynásobení konštanty s dátami, získame hodnoty napätia v rozsahu ± 10 V. Následne z dát bol vytvorený „waveform“ signál, ten pokračuje ďalej v cyklu a tiež je ukladaný do globálneho parametru „Data“.



Obrázok 35 Druhá časť programu v Real Time

Okrem už spomínaného, v tomto úseku cyklu kontroluje, či je USB port „/u“ aktívny alebo nie. Tato informácia je posielaná ďalej. Tiež tu vytvárame cestu „/u/meranie.tdms“.

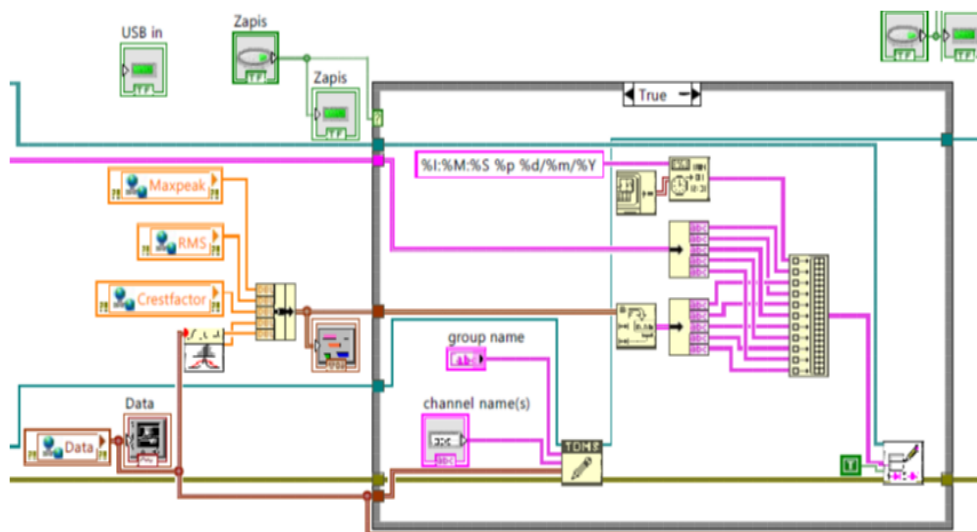
Nasleduje úsek kódu, kde sa budeme zaoberať popisom ukladania dát. Táto časť tvorená dvoma „case“ funkciami, sú to rozhodovacie funkcie. Vonkajšia rozhoduje o tom či je do zariadenia myrio pripojený USB kľúč. Ak je pripojený, funkcia sa spustí a začne sa počítať stlačenie tlačidla na myriu. Pri každom párnom čísle stlačenia sa zapne vnútorná funkcia „case“. Tam sa otvorí súbor TDMS pod názvom „meranie.tdms“, kde sa následne uložia naše dáta a daný súbor sa zavrie. Tiež sa zapne indikátor v podobe svetla na LED0, ktorý nám signalizuje ukladanie dát. Pri nepárnom stlačení tlačidla sa ukladanie zastaví. Pokiaľ USB kľúč nie je pripojený, funkcia sa nezapne a informácie a dáta budú pokračovať v cyklu ďalej bez zmeny. Ani tlačidlo na myrio nebude potom fungovať. Úsek kódu môžeme vidieť na nasledujúcom obrázku.



Následne sa celý program konvertuje do aplikácie a tá sa nahrá do zariadenia. Na takýto princíp fungujú detekčné prístroje, ktoré sa bežne používajú pri vyhodnocovaní vibrácií strojov vo firme. Prístroj je neustále zapojený a pomocou semaforu upozorňuje zamestnancov na daný stav zariadenia.

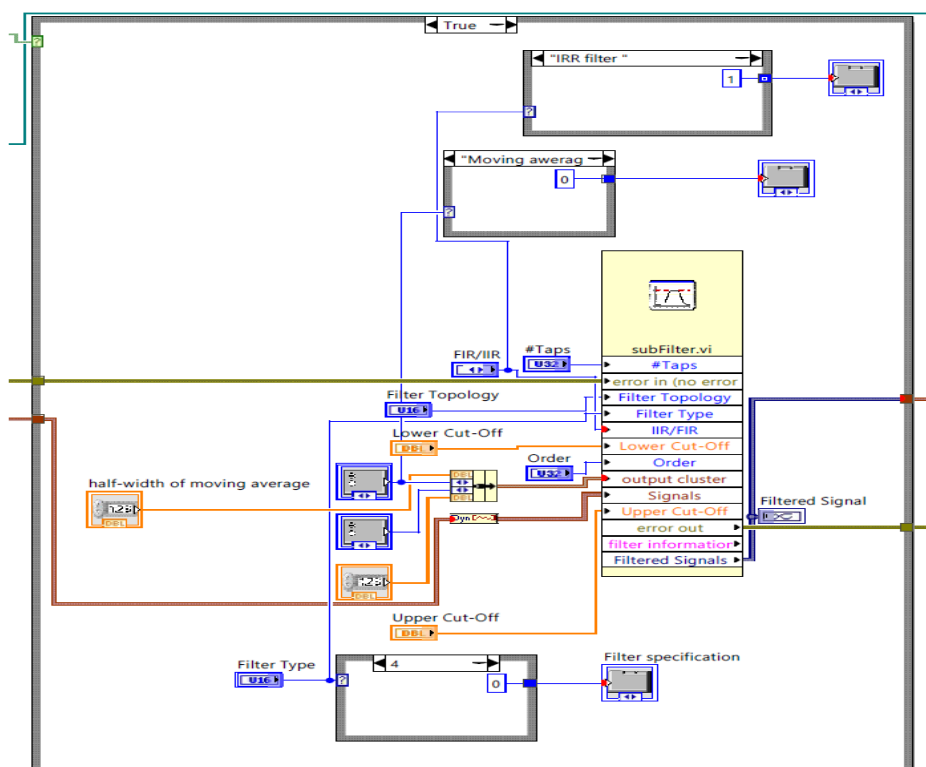
Po vytvorení prvej časti programu sme pokračovali v tvorbe druhej časti. Tá bola tvorená užívateľským prostredím, ktoré obsahovalo viac funkcií než len ukladanie dát a počítanie hodnoty pre Crest faktor. Na tvorbu sa použili predom vytvorené programy v prvej časti, kde sa do programu pridali globálne parametre. Tiež sa vytvorilo nové VI okno, kde sa naprogramovali ostatné funkcie a upravil sa front panel pre prácu s užívateľom. Celá táto časť aplikácie je určená pre prácu s užívateľom, to znamená, že počítač musí byť pripojený k zariadeniu myrio.

Ako prvé si vytvoríme kód v paneli pre programovanie. Začneme tým, že nastavíme parametre, ktoré vstupujú do cyklu, to je cesta uloženia dát. Otvorí sa nám v danej ceste súbor, kde sa budú ukladať dáta podľa potreby. Vytvorí sa cyklus, v ňom sa na začiatok definujú globálne parametre, ktoré obsahujú dáta získané z „Real Timu. Vytvoríme funkciu „case“, ktorá sa po stlačení tlačidla vo front panely začnú ukladať dáta a hodnoty Crest faktoru, efektívna hodnota, Kurtosis a Skewness do zvoleného súboru v počítači. Môžeme to vidieť v nasledujúcom obrázku.



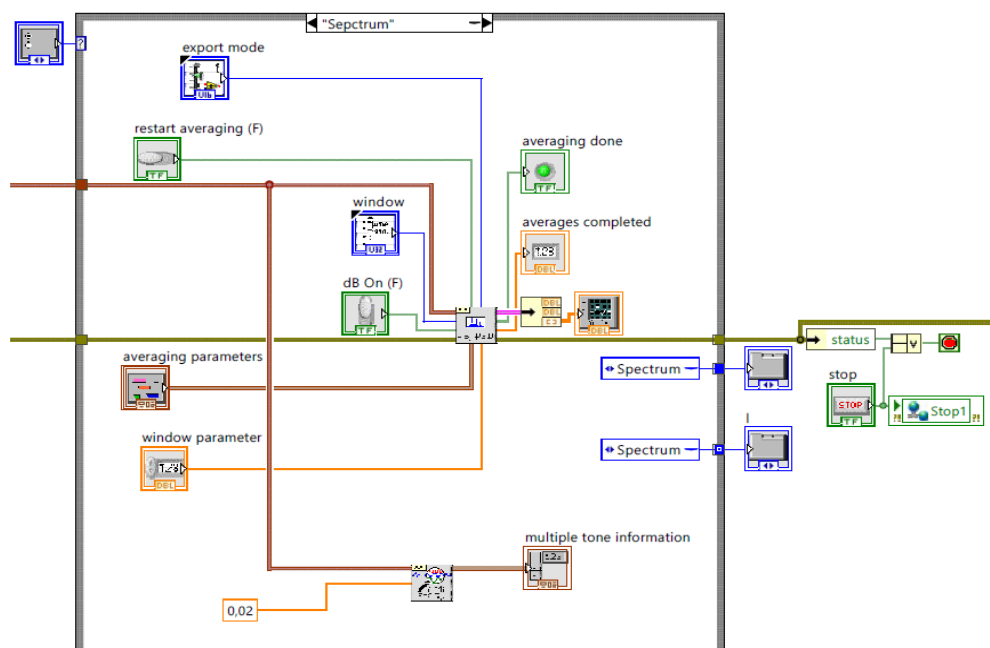
Obrázok 38 Prvá časť užívateľského programu

Nasledujúcej časti cyklu boli naprogramované funkcie pre filtrovanie dát. Tiež bola tvorená funkciou „case“, kde po stlačení tlačidla sa zapla. Tam sa museli vložiť kontrolné bločky, kde zadávame rôzne parametre, ktoré sú pre filtre potrebné, ako napríklad spodná hranica frekvencie a horná frekvencia atď.. Tiež sa muselo zadať zoznam, ktorý obsahuje výber rôznych filtrov ako je Lowpass, Bandpass, atď.. Všetko to môžeme vidieť na obrázku.



Obrázok 39 Druhá časť užívateľského programu

Ďalšou časťou cyklu bolo vytvorenie funkcie, ktorá obsahovala ostatné metódy vibrodiagnostiky, ako napríklad „Spectrum“, ktorú môžeme vidieť na nasledujúcom obrázku. Táto funkcia sa prepína pri výbere metódy, ktorú v danej chvíli potrebujeme. Tiež obsahuje rôzne kontrolné bločky pre zadávanie potrebných parametrov a tiež indikátorov na zobrazovanie hodnôt. Po výpočte jednotlivých metód sa výsledky zobrazia do grafov.

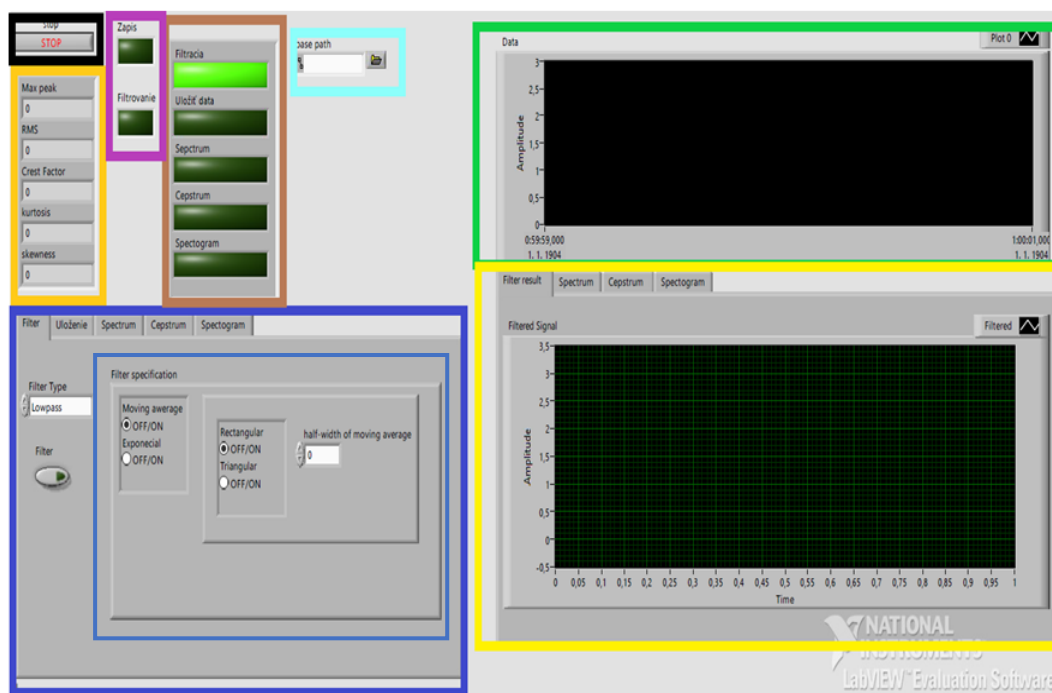


Obrázok 40 Tretia časť užívateľského programu

Ukončenie programu môžeme docieľiť pomocou stop tlačidla, pri stlačení sa vypne aj program vytvorený v „Real Time“. Druhý spôsob je v prípade ak v programe nastane chyba, tá ukončí program. Po skončení programu sa zavrie TDMS súbor a v prípade chyby sa vypíšu informácie o nej.

Po vytvorení programu sa nám automaticky vytvoril front panel, kde sú uložené rôzne grafy, tabuľky a tlačidlá. S programom je to prepojené pomocou programovacích bločkov a tiež pomocou indikátorov. Celý front panel môžeme vidieť na ďalšom obrázku, kde je popísané ako to funguje.

Hneď ako prvé než spustí celý program musí najprv nastaviť základná cesta, kam by sa mali pri potrebe ukladať dáta, nenastavujeme meno, v ktorom to bude uložené. To na obrázku vidíme vo svetlomodrom rámečku. Teraz je možné program spustiť. Následne sa nám v grafe v zelenom rámečku objavia merané dáta. Postupne sa vypočítavajú hodnoty ako je maximálna amplitúda, RMS a tiež sú analyzované dáta pomocou metód ako je Crest faktor, Kurtosis a Skewness. Hodnoty sú vyobrazené v oranžovom rámečku.



Obrázok 41 Front Panel užívateľského programu

Postupne sa môžeme presunúť k hnedému rámcčku, kde sú tlačidlá. Tieto tlačidlá sa používajú na zapínanie funkcií podľa potreby. Napríklad na obrázku svieti tlačidlo Filtrácia automaticky sa prepne okná v modrom rámcčku, pre nastavenie parametrov pre filtrovanie dát. Nastavovať sa môže typ filtru, ako Lowpass, Highpass, Bandpass, Bandstop a Smoothing. Po vybratí typu filtra sa nám v druhom modrom rámcčku automaticky objavia parametre, ktoré je potrebné zadať pre daný typ filtra. Po definovaní filtra máme možnosť zapnúť filtrovanie tlačidlom v modrom rámcčku. Hneď na to sa nám rozsvieti svetlo Filtrovanie vo fialovom rámcčku a tiež aj filtrované dáta v grafe, ktorý sa nachádza v žltom rámcčku. V prípade potreby môžeme filtrovanie jednoducho vypnúť rovnakým tlačidlom.

Tento postup platí aj po stlačení tlačidla Uložiť dáta v hnedom rámcčku. Automaticky sa nám prepne pole v modrom rámcčku, kde môžeme zadať meno dokumentu a názov pre dáta, kde sa zapisujú namerané hodnoty. Aby došlo k zápisu stlačíme tlačidlo, pokiaľ bude tlačidlo stlačené, tak sa hodnoty budú ďalej zapisovať. O ukladaní nás informuje indikátor vo fialovom rámcčku.

Potom môžeme v hnedom rámcčku vyberať medzi jednotlivými metódami vibrodiagnostiky. Pri tejto časti už nefunguje tak ako pri filtrovaní a ukladaní dát. Pri výbere napríklad metódy Spektrum, sa nám automaticky prepne pole pre nastavenia parametrov metódy a tiež sa nám prepne aj zobrazenie do grafe v žltom rámcčku. Súčasne naraz môže byť zapnutá iba jedna metóda, ktorá je počítaná, ostatné sú vypnuté.

Na ukončenie celého programu použijeme tlačidlo stop v čiernom rámcčku alebo môže sa vypnúť v prípade ak nastane nejaká chyba.

8. Záver

Tato diplomová práca sa zaoberala možnosťou použitia piezoelektrických štruktúr na snímanie vibrácií a tiež sa riešil problém použitia vibrodiagnostických metód na dáta zaznamenané pomocou piezoelektrických štruktúr. Toto sa bežne používa pri meraní s akcelerometrom a hlavným cieľom bolo zistiť či je možná náhrada akcelerometra použitím piezoelektrických vrstiev.

Ako prvé sa riešili rešeršné štúdiá, kde najprv bolo potrebné naštudovať aké metódy sa používajú na analýzu vibrácií. Následne sa na základe vlastností piezoelektrických snímačov, ktoré sa pri meraní vibrácií používali, sa určili jednotlivé metódy na analýzu vibrácií. Tieto metódy boli postupne vysvetlené.

Po spracovaní teórie nasledovalo experimentálne meranie a spracovanie dát. Ale ešte než k tomu došlo bolo potrebné stanoviť sústavu na, ktorej sa experiment mal uskutočniť. Rozhodovalo sa o tom, čo by bolo vhodné použiť ako sústavu, muselo to byť niečo čo by bolo možné jednoducho zostrojiť a v prípade potreby nahradiť inou sústavou, ktorá by mala rovnaké rozmery a vlastnosti. Najvhodnejším riešením bolo použitie nosníku na jednej strane bol votknutý a na druhej mal voľný koniec. Ďalej sa riešilo učenia vlastných frekvencií. Na to bol použitý program ANSYS s modálnou analýzou. Ako posledné v tomto kroku bolo určenie miest nalepenia piezoelektrických snímačov.

Sústava bola zostrojená, mohlo sa pristúpiť k experimentálnemu meraniu. Ako prvé sa experimentálne určili vlastné frekvencie a následne boli porovnané s frekvenciami získané na základe výpočtu. Z porovnania sa zistilo, že hodnoty frekvencií sú rovnaké alebo sa odlišujú len veľmi málo. Potom nasledovali rôzne merania, kde bola sústava budená elektromagnetom na druhú vlastnú frekvenciu. Pre zaujímavosť sa do merania budením ešte vložili prídavné vibrácie, ktoré mali simulovať nejaký defekt na sústave. Po niekoľkých meraniach, sa dáta analyzovali pomocou vibrodiagnostických metód. Následne sa porovnali výsledky pri meraní s piezom a s meraním akcelerometrom. Na základe výsledkov sa došlo k záveru, že je možné použiť piezoelektrický snímač na meranie vibrácií. Ako posledné v tomto kroku bolo potrebné piezoelektrický snímač na kalibrovať, tak aby bolo možné dostať rovnakých výsledkov ako pri snímaní akcelerometrom. Urobilo sa to pomocou jednoduchšej metódy, ktorá sa bežne používa pri kalibrácii akcelerometrov. A tým sa získala kalibračná konštanta K .

Ďalšom kroku sa riešilo, či by piezoelektrický snímač bol schopný zachytiť deformáciu nosíku. Na základe toho sa vytvorila nová sústava, kde sa nalepil snímač a určili vlastné frekvencie. Potom sa nosník postupne deformoval, tak že sa do neho vyvrátala diera o priemeru 2 mm. Nasledovala sada meraní, kde sa diera zväčšovala a za každým sa meranie opakovalo 5 krát. Dáta boli vyhodnotené, z toho sa zistilo, že dochádza k posuvom vlastných frekvencií smerom k nižším hodnotám. Výsledok vyvrátil našu teóriu o tom, že frekvencie klesajú so zväčšujúcou sa dierou lineárne, pretože hodnoty vlastných frekvencií klesali polynómom druhého stupňa. Tiež sa zistilo, že pri vyšších vlastných frekvenciách nosníku, dochádza k vyšším posuvom frekvencií. Na overenie sa ešte vytvoril model v ANSYS-e kde sa spočítala modálna analýza pre každú dieru. Výsledky pri porovnaní boli približne rovnaké s výsledkami získanými experimentom.

Posledným krokom bolo naprogramovanie aplikácie, ktorá by sa nahrála do zariadenia myrio. Aplikácia bola programovaná pomocou jazyka LabVIEW. Vytvorená aplikácia sa

skladala z dvoch častí. Kde prvá bola takzvaná základná, tá obsahovala iba zbieranie dát, následne ich menila na napätie. Potom pomocou jednoduchej metódy akou Crest faktor vyhodnocovala vibrácie a následne poskytla informácie o stave zariadenia. Tie boli signalizované pomocou LED svietidiel. Tiež obsahovala algoritmus na ukladanie dát do USB, ktoré bolo pripojené do zariadenia myrio. Táto časť sa potom nahrala do zariadenia. Druhá časť obsahovala už prvú časť, ktorá bola doplnená o užívateľské rozhranie. Tu už pri používaní je potrebné, používať zariadenie spolu s počítačom. Táto časť obsahovala funkcie, ktoré už boli komplikovanejšie ako je filtrovanie dát, okrem toho bola doplnená o ostatné metódy vibrodiagnostiky. Druhá časť musela byť nahratá spolu s prvou časťou.

Celkové zhrnutie je také, že na základe vykonaných rôznych meraní a analyzovaní týchto dát, sa došlo k záveru, že použitie piezoelektrických štruktúr na snímanie vibrácií je teoreticky možné a mohlo by nahradiť akcelerometer. Ale na stanovenie definitívneho záveru, by bolo potrebné urobiť komplikovanejšie merania a rôzne výpočty.

Zoznam použitej literatúry

- [1] KOUKOLÍK, Václav. *Využití piezoelektrického jevu v praxi* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/10094/1/DIPLOMKA.pdf>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [2] VOLAVKA, Martin. *Metody detekce stavu valivých ložisek v rotačních strojích* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/17958>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [3] DE ALMEIDA, Rui Gomes Teixeira, Silmara Alexandra DA SILVA VICENTE a Linilson Rodrigues PADOVESE. New technique for evaluation of global vibration levels in rolling bearings. *Shock and Vibration* [online]. 2002, **9**(9), 225–234 [cit. 2019-04-30]. ISSN ISSN 1070-9622/02/\$8.00. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/299090506_New_technique_for_evaluation_of_global_vibration_levels_in_rolling_bearings
- [4] PAŘÍK, Zdeněk. Měření a analýza vibrací systémem OCTAVIS. Brno, 2011. 88 s. Diplomová práce. VUT Brno
- [5] Glen_b (<https://stats.stackexchange.com/users/805/glen-b>), How is the kurtosis of a distribution related to the geometry of the density function?, URL (version: 2017-04-13): <https://stats.stackexchange.com/q/143522>
- [6] BRANDT, Anders. *Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures*. Verlag: John Wiley & sons, 2011. ISBN 978-0-470-97811-5.
- [7] [-]. *Aisource: What is Skewnes* [online]. [cit. 1.5.2019]. Dostupný na WWW: <https://www.managedfuturesinvesting.com/what-is-skewness/>
- [8] NORTON, M. P. *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*. New York: Cambridge University Press, 1989. ISBN 0521349419.
- [9] Tavner, Peter Ran, Li Penman, Jim Sedding, Howard. (2008). *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*. Institution of Engineering and Technology. Retrieved from https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCMREM001/condition_monitoring/condition-monitoring
- [10] PROKOP, Tomáš. *Metody vyhodnocování elektrofyzilogických experimentů* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/7590/1/Diplomová_práce_Prokop.pdf. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [11] RAHI, Pranay Kumar a Rajesh MEHRA. Analysis of Power Spectrum Estimation Using Welch Method for Various Window Techniques. *International Journal of Emerging Technologies and Engineering* [online]. 2014, 31.8.2014, (2), 106-109 [cit. 2019-05-10]. ISSN 2348–8050. Dostupné z: <http://www.ijete.org/wp-content/uploads/2014/09/IC-97.pdf>

[12] Du, Ke-Lin Swamy, M. N. S.. (2010). *Wireless Communication Systems - From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies - 16.3.1.1 Spectrograms*. (pp. 663). Cambridge University Press. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009BKKD2/wirelesscommunication/spectrograms>

[13] What-is-a-spectrogram. *PNSN - Pacific Northwest Seismic Network* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://pnsn.org/spectrograms/what-is-a-spectrogram>

[14] NASIR, Syed Zain. Introduction to myRIO: A complete step by step tutorial on Introduction to myRIO. *The Engineering Projects The Engineering Projects - Tutorials & Projects for Engineers*. [online]. 19. August 2017 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.theengineeringprojects.com/2017/08/introduction-to-myrio.html>

[15] MOHAMED, Hussain. INTRODUCTION TO NI myRIO. *Prezi* [online]. 3. Marec 2015 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://prezi.com/nmc4aigolcqg/introduction-to-ni-myrio/>

[16] *The Basics of Accelerometer Calibration* [online]. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://modalshop.com/filelibrary/Basics%20of%20Calibration.pdf>

Zoznam použitých skratiek a symbolov

Piezo	– piezoelektrický snímač
$y(t)$	– meraný signál
C_f	– hodnota pre Crest faktor
$x(i)$	– meraný signál
μ	- priemerná hodnota signálu
σ	– efektívna hodnota signálu
K	– hodnota pre Kurtosis
N	– dĺžka signálu
S	- hodnota pre Skewness
$X^F(f)$	- Fourierov obraz
$C(\tau)$	– Cepstrum
F^{-1}	– Inverzná Fourierová transformácia
f	– frekvencia
t	– čas
ω	- uhlová frekvencia
π	– pi = 3,14
U	– faktor normalizácie
L	– dátový úsek
M	– dĺžka dátového úseku
$X(\omega, \tau)$	– krátkodobá Fourierová transformácia
$S(\omega, \tau)$	– Spectrogram
IMF	– intrinsic mode function
EMD	– empirical mode decomposition
HHT	– Hilbert-Huang transformácia
Mode	– vlastné frekvencie
fft/FFT	– Rýchla Fourierová transformácia
PSD	– power spectral density
RMS	– root mean square – efektívna hodnota

S_{ref} – konštanta známeho akcelerometra

V_{ref} – napätie merané známym akcelerometrom

V_a – napätie merané akcelerometrom, ktorý bude kalibrovaný

S_a - konštanta akcelerometra, ktorý bude kalibrovaný

K – konštanta prevodu

FPGA – programovateľné hradlové pole

FIFO – first in - first out

Zoznam obrázkov

Obrázok 1 Krivka hustoty pravdepodobnosti a hodnota K [5]	13
Obrázok 2 Krivka hustoty pravdepodobnosti a S [7].....	14
Obrázok 3 Nosník	20
Obrázok 4 Prvý vlastný tvar	21
Obrázok 5 Druhý vlastný tvar	22
Obrázok 6 Pretvorenie na 1. harmonickej	23
Obrázok 7 Pretvorenie pre 2. harmonickú	23
Obrázok 8 Nosník + piezo	24
Obrázok 9 Amplitúdo-frekvenčná charakteristika	25
Obrázok 10 Amplitúdo-frekvenčná charak. zväčšenie	26
Obrázok 11 Vibrácie nosníku	27
Obrázok 12 Vibrácie nosníku s prídavným kmitaním	28
Obrázok 13 Amplitúdo - frekvenčná charakteristika.	29
Obrázok 14 Amplitúdo-frekvenčná charak. s prídavným kmitaním	30
Obrázok 15 PSD - budený nosník.....	31
Obrázok 16 PSD - budenie s otrasmi	32
Obrázok 17 Spektrogram - budený nosník	33
Obrázok 18 Spektrogram - budený nosník + otrasy	34
Obrázok 19 Real kepstrum - budený nosník	37
Obrázok 20 Real kepstrum - budený nosník s otrasmi	38
Obrázok 21 HHT budený nosník	39
Obrázok 22 HHT budený nosník s otrasmi.....	40
Obrázok 23 FFT - dáta násobene K	42
Obrázok 24 FFT dáta s otrasmi násobene K	42
Obrázok 25 Nosník s dierou	43
Obrázok 26 Prvá vlastná frekvencia – experiment	44
Obrázok 27 Druhá vlastná frekvencia – experiment.....	44
Obrázok 28 Tretia vlastná frekvencia – experiment	45
Obrázok 29 Prvá vlastná frekvencia - výpočet	46
Obrázok 30 Druhá vlastná frekvencia – výpočet.....	46
Obrázok 31 Tretia vlastná frekvencia – výpočet	47
Obrázok 32 Ni Myrio [14]	48
Obrázok 33 Program v FPGA	50
Obrázok 34 Prvá časť programu v Real Time	50
Obrázok 35 Druhá časť programu v Real Time.....	51
Obrázok 36 Tretia časť programu v Real Time	52
Obrázok 37 Štvrtá časť programu v Real Time	53
Obrázok 38 Prvá časť užívateľského programu.....	54
Obrázok 39 Druhá časť užívateľského programu	54
Obrázok 40 Tretia časť užívateľského programu	55
Obrázok 41 Front Panel užívateľského programu	56

Zoznam použitých tabuliek

Tabuľka 1 Parametre sústavy.....	19
Tabuľka 2 Harmonické Frekvencie	20
Tabuľka 3 Frekvencie výsledky.....	27
Tabuľka 4 Výsledky metód.....	35
Tabuľka 5 Výsledky budený nosník s otrasmi.....	36
Tabuľka 6 Frekvencie	43