



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

OVĚŘENÍ FUNKCE PIEZOELEKTRICKÉ KOMPOZITNÍ VRSTVY JAKO SENZORU PŘETVOŘENÍ

VERIFICATION OF OPERATION OF PIEZOELECTRIC COMPOSITE STRAIN SENSOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Juraj Kubiš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Juraj Kubiš**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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

Ověření funkce piezoelektrické kompozitní vrstvy jako senzoru přetvoření

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aktivní snímací prvky jsou důležité pro nízkopříkonové aplikace, především u autonomních průmyslových aplikacích internetu věcí. Úkolem práce je ověřit možnosti využití piezoelektrických kompozitních vrstev jako aktivního sensorického prvku a jejich porovnání s odezvou tenzometrů při dynamickém chování.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Rešerše aplikací piezoelektrických snímacích prvků ve strojírenské praxi.
- 2) Návrh parametrů experimentu pro aktivní snímání odezvy piezoelektrických kompozitních vrstev.
- 3) Verifikace výsledků a vyhodnocení měření z hlediska aplikací piezoelektrických kompozitů pro snímání vibrací.

Seznam doporučené literatury:

HADAS, Z., F. KSICA a O. RUBES, 2019. Piezoceramic patches for energy harvesting and sensing purposes. *European Physical Journal: Special Topics*. 228(7), 1589–1604.

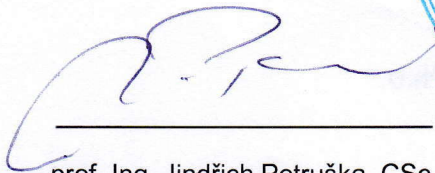
POZZI, M., CANZIANI, A., DURAZO-CARDENAS, I. a ZHU, M., 2012. Experimental characterisation of macro fibre composites and monolithic piezoelectric transducers for strain energy harvesting. In: Tribikram KUNDU, ed. *Smart Structures (NDE)*. s. 834832.

RUBES, O., P. TOFEL, R. MACKU, P. SKARVADA, F. KSICA a Z. HADAS, 2019. Piezoelectric Micro-fiber Composite Structure for Sensing and Energy Harvesting Applications. In: *Proceedings of the 2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, ME 2018*.

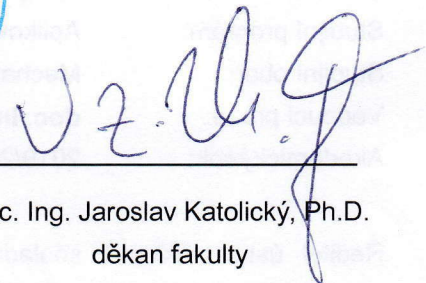
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20.

V Brně, dne 24. 10. 2019





prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu



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

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá využitím piezoelektrických prvkov ako prvkov snímacích pretvorenie v strojárnskej praxi. Práca sa dá rozdeliť do troch hlavných častí. V prvej časti je rozpísaná rešerš o aktuálnom využití týchto prvkov v praxi, či už ako snímacích prvkov alebo ako zdroj na získavanie energie (energy harvesting). Druhá časť sa zaoberá návrhom parametrov pre experiment, v ktorom budeme sledovať odozvu aktívneho snímania týchto piezoelektrických kompozitných vrstiev pri dynamickom chovaní. Táto časť obsahuje výber komponentov pre daný experiment, vytvorenie modelu pomocou MKP a priebeh merania experimentu. V tretej časti je zhodnotenie získaných výsledkov a následné porovnanie so získanými hodnotami s tenzometrom a ostatných snímačov.

Kľúčové slová

smart prvok, piezoelektrické kompozity, MKP, akcelerometer, tenzometer, PVDF vrstva, MFC vrstva

Abstract

The bachelor thesis deals with the use of piezoelectric elements as sensing elements in engineering practice. The work can be divided into three main parts. The first part describes the actual use of these elements in practice, either as sensing elements or as a source for energy harvesting. This section contains the selection of components for a given experiment, the creation of a model using FEM and the measurement process of the experiment. The third part is the evaluation of the obtained results and subsequent comparison with the obtained values from strain gauges and other sensors.

Keywords

smart component, piezoelectric composite, FEA, accelerometer, strain gauge, PVDF layer, MFC layer

Bibliografická citácia:

KUBIŠ, Juraj. *Ověření funkce piezoelektrické kompozitní vrstvy jako senzoru přetvoření*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124785>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Zdeněk Hadaš.

Prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu s názvom Overenie funkcie piezoelektrických kompozitných vrstiev ako senzor pretvorenia som vypracoval samostatne, pod vedením doc. Ing. Zdeňka Hadaše, Ph.D. s použitím odbornej literatúry a zdrojov uvedených v zozname použitých zdrojov.

V Brne, 20. máj 2020

.....
Juraj Kubiš

Podakovanie

Týmto by som rád poďakoval môjmu vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Zdeňkovi Hadašovi, Ph.D. za veľmi odborný a priateľský prístup pri konzultáciách. Taktiež za jeho podnety k rozvíjaniu jednotlivých častí tejto práce a užitočné rady pri vypracovaní. Ďakujem, patrí aj Ing. Petrovi Krejčímu Ph.D. ktorý mi poradil pri výbere a meraní s tenzometrami.

Obsah

1. Úvod	9
2. Popis problémovej situácie a stanovenie cieľov	10
2.1 Formulácia problému	10
2.2 Ciel práce	10
3. Materiály	11
3.1 PZT	11
3.2 MFC (macro fiber composite).....	11
3.3 PVDF (polyvinylidénfluorid).....	12
3.4 Aplikácia jednotlivých materiálov	12
3.4.1. Vrstvy z PZT materiálu	13
3.4.2 Vrstvy z MFC materiálu	14
3.4.3 Vrstvy z PVDF materiálu	15
4 Tenzometre	17
5 Súčasný stav využitia v letectve.....	19
6. Návrh technickej sústavy so snímačmi.....	21
6.1 Konštrukcia	21
6.2 Modálna analýza	22
6.3 Výber dvojice snímacích prvkov	22
6.4 Umiestnenie snímačov	23
7. Meranie a vyhodnotenie	26
8. Záver	32
9. Zdroje	33
Zoznam obrázkov	34
Zoznam skratiek	35
Zoznam tabuliek	35

1.Úvod

Medzi smart materiály môžeme označiť materiály, ktoré sú schopné reagovať na zmeny okolia, v ktorom sa nachádzajú. Ide najmä o zmeny teplôt, tlaku, tvaru ale aj magnetického či elektrického poľa. Využitím týchto vlastností materiálu sme schopný nielen kontrolovať stav materiálov ale ich aj adekvátne využiť.

Tu sa otvárajú možnosti pre piezoelektrické materiály. Tieto materiály sú vďaka piezoelektrickému javu schopné generovať elektrické napätie ako odozvu na mechanické pretvorenie. Piezoelektrické materiály sa dajú použiť aj v obrátenom smere a to tak, že piezoelektrický jav vyvolá pretvorenie materiálu ako odozvu na privedené elektrické napätie.

Pri efektívnom využití týchto vlastností sme schopný získavať energiu z pretvorenia a vibrácií dostatočnú na to, aby poháňala nízkoenergetické zariadenia a navyše získavala informácie o stave tohto zariadenia. Piezoelektrické materiály je teda možné použiť pri získavaní energie z okolia (energy harvesting) ale aj ako snímacie prvky. Doteraz boli skúmané piezoelektrické prvky len ako snímače, alebo ako prvky na zber energie. Len málo autorov sa pokúšalo o kombináciu týchto dvoch vlastností súčasne.

V dnešnej dobe sa kladie veľký dôraz na bezpečnosť, takže je snímanie a analýza potrebná vo veľkej miere. Je teda žiadúce, aby dané snímacie prvky boli lacné, spoľahlivé a čo najpresnejšie. Preto sú piezoelektrické vrstvy vhodným adeptom. Či už z hľadiska aplikácie (jednoduché nalepenie vrstvy na snímaný prvok), možnej energetickej sebestačnosti alebo cenovej dostupnosti. Využitím týchto prvkov v čo najväčšom rozsahu môže byť veľmi užitočné či už z hľadiska bezpečnosti, ale aj finančnej náročnosti. Zo získaných informácií je teda možné predísť nečakaným stavom zariadenia alebo mu poskytnúť včasnú potrebnú údržbu na základe aktuálneho stavu.

2. Popis problémovej situácie a stanovenie cieľov

2.1 Formulácia problému

Problém je formulovaný nasledovne. Je potrebné zistiť súčasný stav využitia piezoelektrických vrstiev a tenzometrov ako snímacích prvkov. Vybrať najvhodnejšiu dvojicu piezo -vrstvy a tenzometru a pomocou navrhnutého experimentu demonštrovať možnosť využitia piezoelektrických vrstiev ako aktívnych senzorických prvkov. Taktiež porovnať odozvu pri dynamickom chovaní týchto prvkov s tenzometrami.

2.2 Ciel práce

Cieľom tejto práce je overiť možnosť využitia piezoelektrických kompozitných vrstiev ako aktívneho senzorického prvku a ich porovnanie s odozvou tenzometrov pri dynamickom chovaní.

- analýza súčasného stavu snímania pomocou piezoelektrických vrstiev a tenzometrov
- návrh parametrov experimentu pre aktívne snímanie odozvy piezoelektrických kompozitných vrstiev a tenzometrov
- vytvorenie modelu pre správne umiestnenia snímacích prvkov na host'ujúcej štruktúre
- uskutočniť laboratórne meranie na získanie informácií zo senzorov
- zhodnotenie a porovnanie výsledkov piezoelektrických vrstiev a tenzometrov

3. Materiály

Pred tým ako sa zameriame na to, kde a ako sa dnes používajú piezoelektrické vrstvy si objasníme výhody a nevýhody jednotlivých materiálov z ktorých sa dané vrstvy vyrábajú. Zameriame sa len na tie, ktoré budú ďalej spomínané v tejto práci.

3.1 PZT

Medzi najrozšírenejší a najpoužívanější piezoelektrický materiál patrí PZT (zirkoničitan titaničitan olovnatý). Má síce vysokú krehkosť a malú flexibilitu ale jeho cenová dostupnosť a dobrý elektromechanický coupling napredujú oproti ostatným.



Obr.3.1: PZT vrstva

3.2 MFC (macro fiber composite)

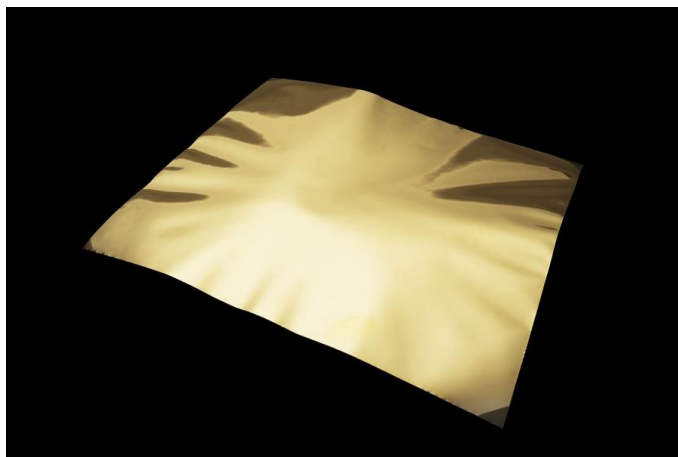
Nedostatky ktoré sú pri PZT vrstvách, výborne nahrádza MFC, ktorý je tvorený vláknami z PZT epoxidovou matricou a medenými elektródami, ktoré sú od seba navzájom oddelené. Vrstva MFC je teda flexibilnejšia a menej krehká. To znamená, že sa lepšie prispôbuje povrchu meraného prvku.



Obr.3.2: MFC vrstva

3.3 PVDF (polyvinylidénfluorid)

Je jedným z najznámejších piezo-polymérov. Materiál je dobre tvárny, vykazuje silnú piezoelektrickú a pyroelektrickú odozvu. Má akustickú impedanciu, ktorá je oveľa bližšia k vode ako tradičné piezo-keramické materiály. Vďaka týmto vlastnostiam je vysoko žiadaná pri výrobe ultrazvukových senzorov. Tento materiál je chemicky aj mechanicky dobre odolný. Medzi jeho nevýhody však patrí citlivosť na zmenu teploty. Pri vystavení zvýšeným teplotám sa jeho piezoelektrické vlastnosti začnú zhoršovať. Zvýšená teplota totiž začne odblokovávať polarizáciu, ktorá je potrebná pre piezoelektrické vlastnosti filmu. Ide o teploty nad 60°C. Pri teplotách prekračujúcich 100°C dochádza k strate piezoelektrických vlastností.



Obr.3.3: PVDF vrstva

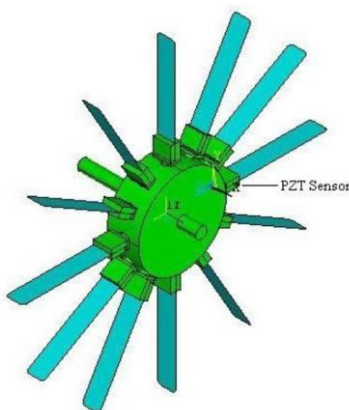
3.4 Aplikácia jednotlivých materiálov

Piezo prvky majú široký rozsah využitia. Pri rôznych experimentoch sa vždy využijú iné vlastnosti týchto materiálov z ktorých sú dané prvky vyrobené. Tieto vlastnosti ako bolo spomenuté v kapitole 3 sú rôzne od materiálu. Inak povedané, na každý experiment sa hodí vrstva z iného materiálu.

3.4.1. Vrstvy z PZT materiálu

V článku [1] sa rieši experiment, ktorý sa zaoberá návrhom, modelovaním, simuláciou a testom vibračného mechanického nosníku s nalepenými PZT vrstvami za účelom získavania energie a snímania stavu nosníku. Tento experiment mal taktiež rozšíriť znalosti v oblasti snímania.

V experimente [2] sa autor pokúšal zistiť vhodnosť senzoru z PZT na kontrolu vibrácií lopatiek uložených na rotačnej hriadeli. Keďže pri týchto rotačných strojoch dochádza k poškodeniu najmä vďaka vibráciám a únave lopatiek, rozhodli sa otestovať PZT vrstvu ako jeden z možných snímačov.



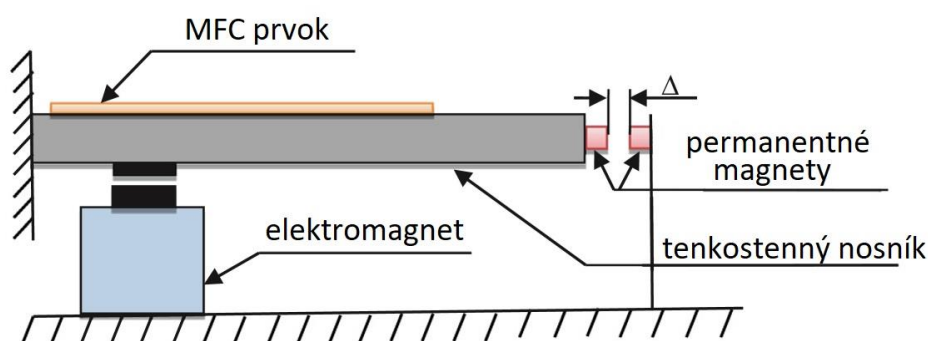
Obr.3.4: Model hriadeľu s lopatkami [2]

Z modelu [2] je vidieť, že autor umiestil PZT vrstvu na koreň lopatky, kde dochádza k najčastejšiemu porušeniu. Experiment ukázal, že PZT vrstva vykazovala dobré výsledky pri zisťovaní vibrácií aj v porovnaní s výsledkami z tenzometru.

3.4.2 Vrstvy z MFC materiálu

Pri získavaní informácií a nameraných hodnôt je však potrebné ich správne spracovanie. Na vyriešenie tejto problematiky je potrebné do obvodu pridať riadiacu elektroniku, ktorá má za úlohu spracovanie signálu, spravovať energiu či už do snímacieho zariadenia alebo na zber energie. Týmto sa zaoberali v už spomínanom experimente [1], kde cieľom bolo získať kľúčové parametre pre spracovanie signálu, navrhnúť vhodný spôsob pre jeho spracovanie a riadenie spotreby pre aplikácie snímania a zberu energie. Na „vyladenie“ tejto elektroniky bolo použitá v tomto experimente práve MFC vrstva.

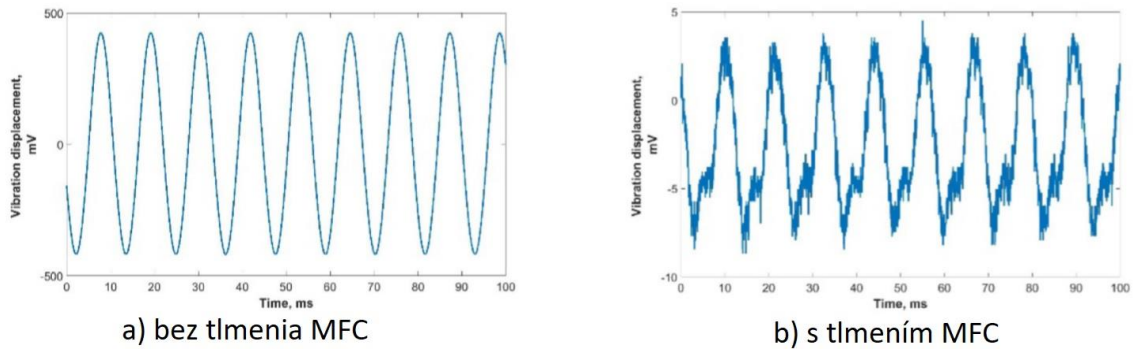
V experimente [3] sa zase skúmalo aktívne a pasívne riadenie vibrácií na tenkostennom nosníku (obr.3.5) pomocou MFC prvku spolu s dvomi permanentnými magnetmi (na pasívne riadenie).



Obr.3.5: Model meracej zostavy [3]

V prvej časti experimentu sa zisťoval vplyv vzdialenosti (Δ) permanentných magnetov na rezonančnú frekvenciu. Ak je vzdialenosť medzi permanentnými magnetmi menšia, zvýši sa magnetická sila medzi nimi. To má za následok nárast hodnoty rezonančnej frekvencie. Z toho vyplýva, že vzdialenosť bude ovplyvňovať nielen zmenu rezonančnej frekvencie ale aj tlmenie.

Ďalej sa v experimente zaoberali tvarom nosníku pri rôznych frekvenciách. Po viacerých kombináciách vzdialenosti Δ a rezonančných frekvenciách zistili, že vplyv tlmenia bude najlepšie demonštrovať na prvej rezonančnej frekvencii. Vtedy nosník vykazoval najväčší posuv. Nosník bol budený na prvej rezonančnej frekvencii elektromagnetom a následne tlmený MFC prvkom. Na nasledujúcom obrázku (obr3.6) je vidieť vplyv tlmenia MFC vrstvy.



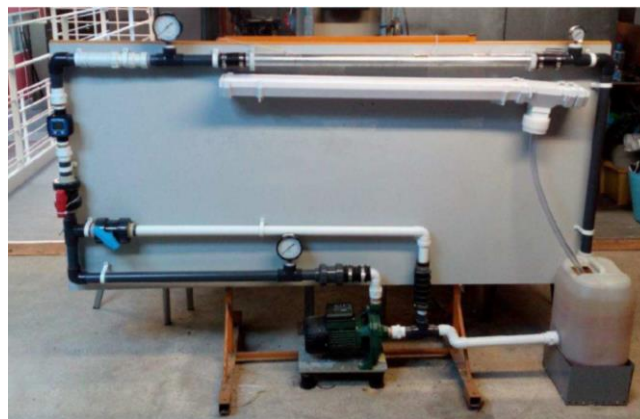
Obr.3.6: Priebeh amplitúdy [3]

Z obrázku je vidno, že tlmenie MFC bolo efektívne a amplitúda vibrácií sa vplyvom tlmenia MFV vrstvy znížila až o 40-krát.

3.4.3 Vrstvy z PVDF materiálu

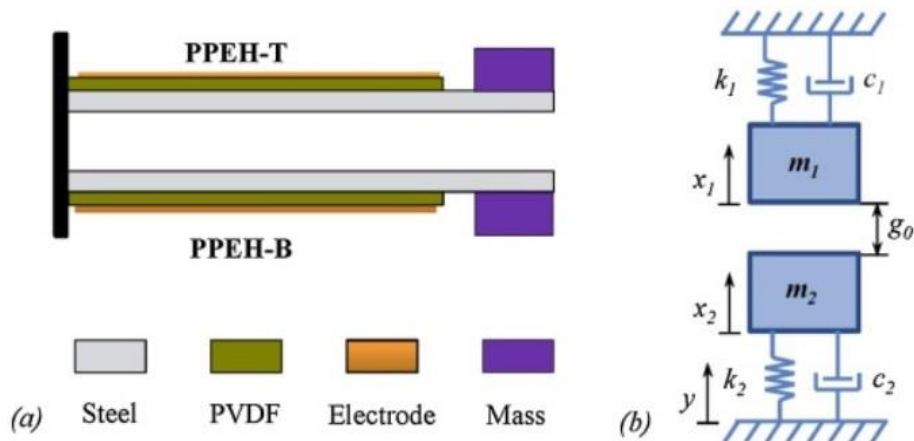
Vrstva z PVDF bola využitá v experimente [4] vďaka jej schopnosti prispôsobenia sa povrchu na ktorý je aplikovaná ako bolo spomínané v kapitole 3.3. Vrstvu sa snažili využiť ako senzor životnosti potrubia (obr.3.7) poprípade porúch. Na potrubíach totiž dochádza k častej degradácii. To spôsobuje poškodenie potrubí a dochádza k únikom.

Štúdia experimentálne demonštruje a porovnáva ako môže byť snímanie vibrácií použité pri detekcii, monitorovaní a lokalizácii únikov z vodovodného potrubia od malých únikov až po praskliny. Toto bolo skúmané taktiež pri rôznych prietokoch.



Obr.3.7: Aplikácia PVDF vrstiev na potrubie [4]

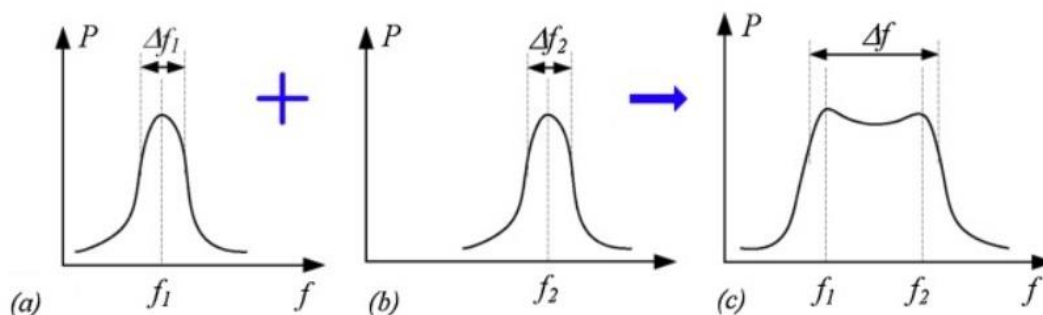
V ďalšom experimente [5] autor skúmal zber energie s piezoelektrickým PVDF filmom s bi-rezonančnou štruktúrou pre odozvu na väčšiu pásma. Cieľom bolo taktiež získať širší frekvenčný rozsah zberu energie.



Obr.3.8: a)model meracej zostavy, b)mechanická analýza systému [5]

Vďaka dvom samostatným rezonančným frekvenciám vytvárajú vibračné amplitúdy dvoch štruktúr konzolových hmôt silné spojenie, keď sa zrážajú pri dostatočne veľkom zrýchlení. S optimálnym návrhom rezonančných frekvencií dvoch samostatných systémov môže zberač energie s bi-rezonančnou štruktúrou poskytnúť slušný výkon v širokom frekvenčnom rozsahu.

Získanie širšieho frekvenčného rozsahu pri bi-rezonančnej štruktúre je demonštrovaná na obrázku 3.9.

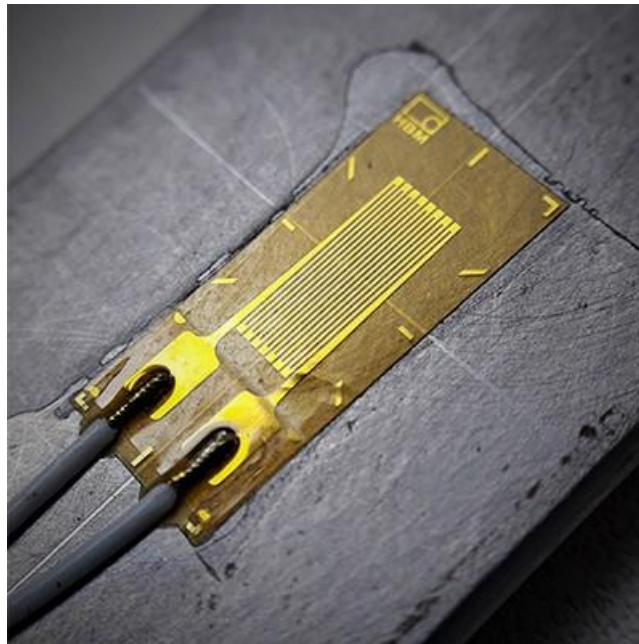


Obr.3.9: Frekvenčné pásmo a) štruktúry č.1 b) štruktúry č.2 c) získané [5]

Teoretická analýza aj experimenty ukázali, že zariadenie PPEH s bi-rezonančnou štruktúrou môže získavať viac energie z náhodných zdrojov vibrácií pri nízkej frekvencii, ako je energia získaná s jednotlivých zdrojov samostatne.

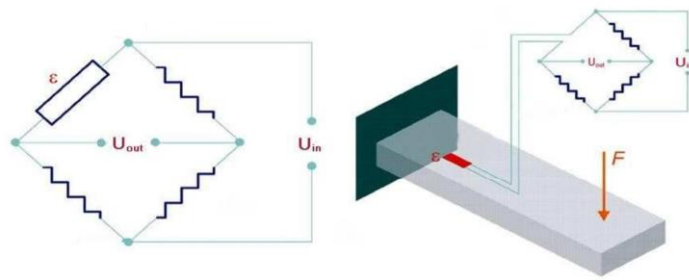
4 Tenzometre

Tenzometer je elektrický prvok, ktorý je najčastejšie využívaný ako senzor k nepriamemu meraniu mechanického napätia na povrchu rôznych súčastí strojov alebo zariadení. Je zložený z drôtu rozloženého po ploche tenzometru (obr.4.1). Ten sa pri ohybe plochy tenzometru predlžuje alebo skracuje, čo má za následok zmenu prierezu tohto drôtu a teda aj zmenu odporu drôtu ktorý je merateľný. Aplikuje sa tak, že sa nalepí na skúmanú súčasť stroja. Tak sa získa rovnaká deformácia ako hosťujúca štruktúra.



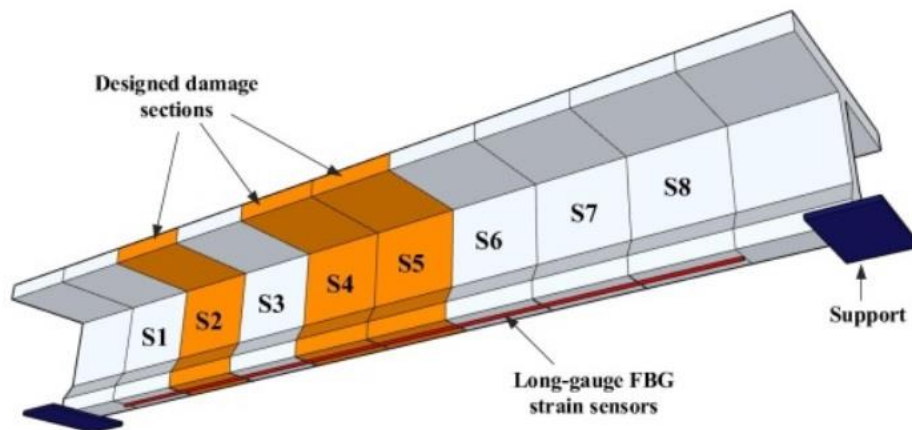
Obr.4.1: Jednoduchý tenzometer

Medzi jeho veľké nevýhody však patrí vplyv teplôt na výsledky merania, pretože aj teplota vstupuje do zmeny priemeru drôtu tenzometru. Teplota taktiež ovplyvňuje vlastnosti lepidla, meranej štruktúry a k-faktor (vplyv materiálu z ktorého je vodič vyrobený a tenzometru), ktorý sa využíva pri výpočtoch. Problémom však nie je samotná teplota ale jej kolísanie počas získavania hodnôt. S týmto kolísaním si samotný tenzometer nedokáže poradiť. Ak nedokážeme kolísaniu teplôt zabrániť, tento problém sa dá vyriešiť niekoľkými spôsobmi. Jedným z nich je použitie ďalšieho tenzometru ku kompenzácií alebo priamo auto-kompenzačný tenzometer. Ďalšou z možností je tiež zapojenie do mostu [\[11\]](#), či korekcia nameraných výsledkov pomocou korekčnej funkcie ktorú udáva výrobca tenzometru. Na obrázku 4.2 môžeme vidieť štvrt' mostíkové zapojenie. Toto zapojenie bude použité aj v našom experimente.



Obr.4.2: Štvrť mostíkové zapojenie

V experimente [6] sa pokúšali dlhý pás tenzometru (obr.4.3) využiť ako senzor diaľničného mostu. Ten mal slúžiť ako pozorovateľ stavu mostu, a predísť prípadnému poškodeniu, ktoré by malo v reálnom svete fatálne následky.

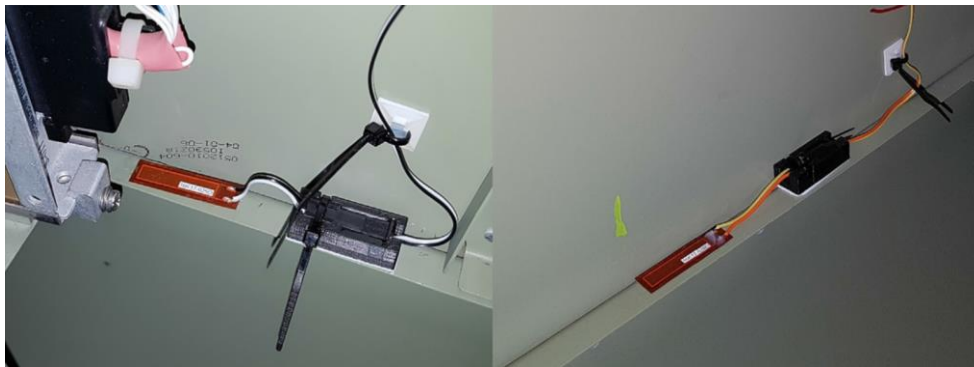


Obr.4.3: Model mostu [6]

V experimente nasimulovali prejazd auta po moste, a následne aj poškodenie mostu. Tu sa tenzometer ukázal ako spoľahlivý senzor najmä vďaka tomu, že nie je vo veľkej miere ovplyvnený hlukom z okolia. Taktiež sa ukázalo, že parametre vozidla prechádzajúceho po moste nemá vplyv na namerané hodnoty senzorom pri poškodení mostu. Medzi výhody opäť patrí snímanie v reálnom čase a teda možnosť predísť možnému poškodeniu mostu.

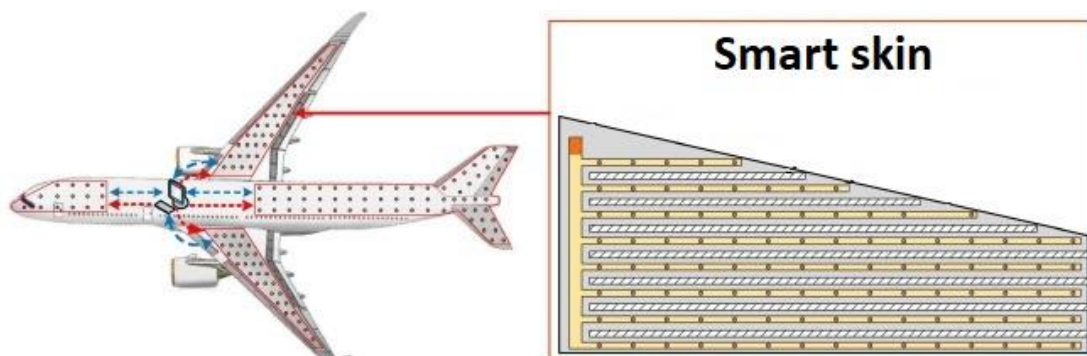
5 Súčasný stav využitia v letectve

Piezoelektrické vrstvy sa v poslednej dobe veľmi rozšírili v oblasti zberu energie z vibrácií. Či už v oblasti veterných elektrární, letectva a mnoho ďalších. Túto energiu sa snažíme v praxi využiť hneď dvakrát. Ako zdroj energie a ako zdroj informácií zároveň. Dosiadnutím týchto dvoch požiadaviek získame sebestačné zariadenie, ktoré kontroluje stav zariadenia a zároveň je napájané z týchto „informácií“. Práve v letectve vedci vidia veľmi perspektívne využitie týchto vrstiev. Výhodou je nízka hmotnosť a taktiež veľmi nízka spotreba energie na snímanie. O možné prepojenie a aplikáciu sa pokúšali v experimente [1], [7] kde aplikovali piezovrstvy na nosníky v trupe lietadla(obr.5.1). Snahou bolo využiť vibrácie na zber energie a taktiež na získavanie informácií o stave nosníku.



Obr.5.1: Sensory aplikované na nosník lietadla v experimente [7]

Pri ďalšom experimente [8] bola snaha zakomponovať tieto vrstvy priamo ako povrch lietadla tzv. „smart skin“(obr.5.2). Výhodou tohto povrchu je rozsiahle monitorovanie stavu lietadla, nízka hmotnosť a možná lokalizácia miesta nárazu s cudzím telesom. Takýmto niečím sa zaoberali napríklad v experimentoch [10] a [12].



Obr.5.2: Smart skin [8]

Pri zbere takejto energie z vibrácií za pomoci piezoelektrických vrstiev je taktiež dôležité spracovanie tejto energie. Ako správne spracovať signál z vrstiev sa vedci zaoberali napríklad v experimente [1].

V experimente [9] sa autor snaží zistiť použiteľnosť tenzometru pri identifikácii štruktúrálnej dynamiky lietadla F-16. Toto meranie, ktoré sa bežne uskutočňuje na zemi je dôležité pri stavbe resp. konštruovaní lietadiel. V experimente vybavil jedno krídlo lietadla akcelerometrami a druhé tenzometrami (obr.5.3). Každý s použitých senzorov v experimente má svoje výhody a nevýhody. Preto sa autor experimentu pokúsil na toto meranie aplikovať tenzometer a zistiť tak jeho použiteľnosť, prípadne spojiť výsledky z merania aby sa dopracoval ku kvalitnejším výsledkom experimentu.



Obr.5.3: Krídlo lietadla F-16 pokryté tenzometrami [9]

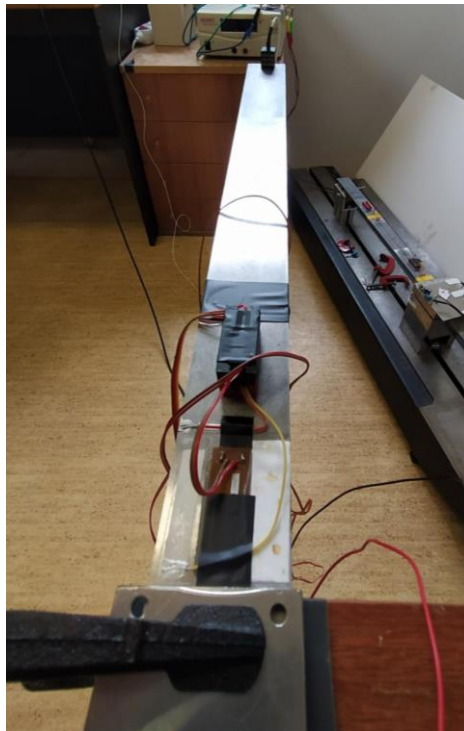
Na lietadlo bolo vybudovaných pár náhodných signálov pomocou takzvaných „trepačiek“ na konci krídiel. Vo výsledku tenzometer získal omnoho lepšie hodnoty, vzhľadom na šum okolia oproti akcelerometru.

6.Návrh technickej sústavy so snímačmi

Na vytvorenie modelu nosníku a zistenie tak najlepšieho umiestenia senzorov pre tento experiment, sme použili metódu konečných prvkov. Pre tento model a výpočet sme teda využili program ANSYS v ktorom prebiehali všetky simulácie.

6.1 Konštrukcia

Inšpiráciou pre návrh meracej zostavy (obr.6.1) bolo mnoho predchádzajúcich experimentov, kde bol na jednej strane nosník votknutý, a na druhej strane mal voľný koniec.



Obr.6.1: Meracia zostava

Rozmery, tvar a materiál nosníku (tab. 1.) sme určili na základe už vyššie spomenutých experimentov.

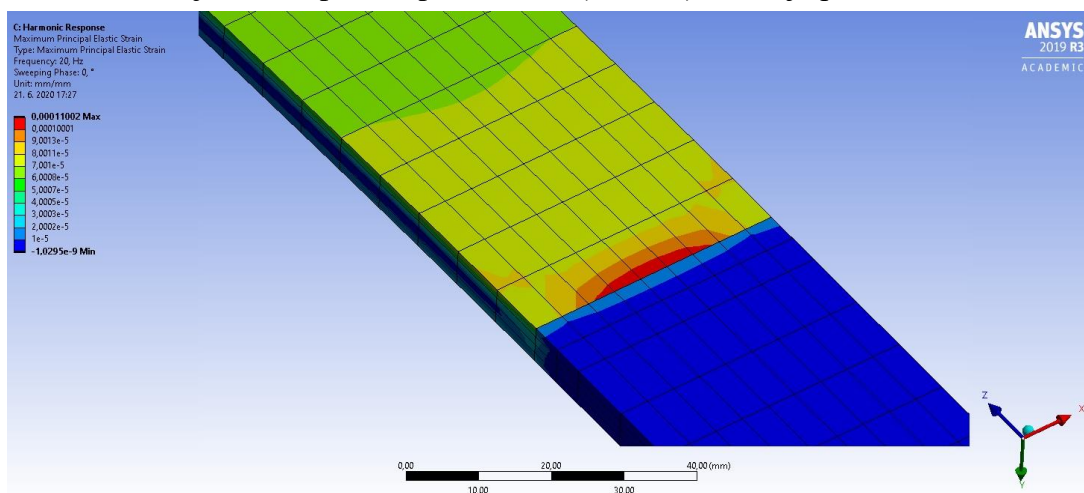
Materiál	konštrukčná oceľ	
ρ - hustota	7800	kg/m ³
E - Youngov modul	$2,1 \cdot 10^{11}$	Pa
μ - Poissonovo číslo	0,3	-
Nosník		
Dĺžka	465	mm
Výška	6	mm
Šírka	40	mm

Tab.1: Parametre sústavy

6.2 Modálna analýza

Cieľom modálnej analýzy v našom prípade bolo zistenie harmonických frekvencií nosníku, určenie najlepšieho miesta pre umiestnenie piezovrstviev a taktiež overenie získaných hodnôt zo senzorov.

Po vytvorení modelu podľa vyššie uvedených hodnôt z tabuľky 1. a správnom nadefinovaní materiálu, sme pomocou programu získali harmonické frekvencie. Nás bude zaujímať práve prvá, pretože pomocou prvej harmonickej frekvencie určíme umiestnenie senzorov. Pri tejto frekvencii sa ukazuje miesto priamo pri votknutí (Obr.6.2) ako najlepšia voľba.



Obr.6.2: Analýza miesta pre umiestnenia senzorov

Taktiež získaná hodnota tohto pretvorenia v miestach umiestnenia tenzometru by mala odpovedať nameraným hodnotám.

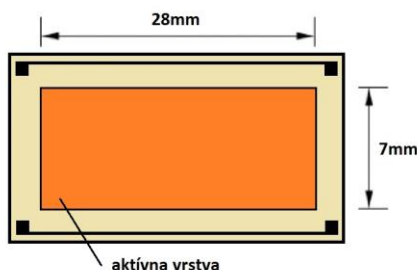
6.3 Výber dvojice snímacích prvkov

Výber piezo vrstvy prebiehal podľa získaných informácií z programu ANSYS a následnou konzultáciou s vedúcim práce. Rozhodli sme sa použiť MFC vrstvu M2814-P1. Táto vrstva sa najviac hodí k nášmu experimentu vzhľadom k očakávaným výsledkom. Ako doplnok tejto bakalárskej práce a samotného merania, sa hneď vedľa MFC vrstvy nalepila vrstva z PVDF.

Čo sa týka tenzometru, rozhodli sme sa v experimente použiť 1-LY41-0.6/120. Tento typ tenzometru bol doporučený na náš experiment po konzultácii s Ing. Petrom Krejčím Ph.D.

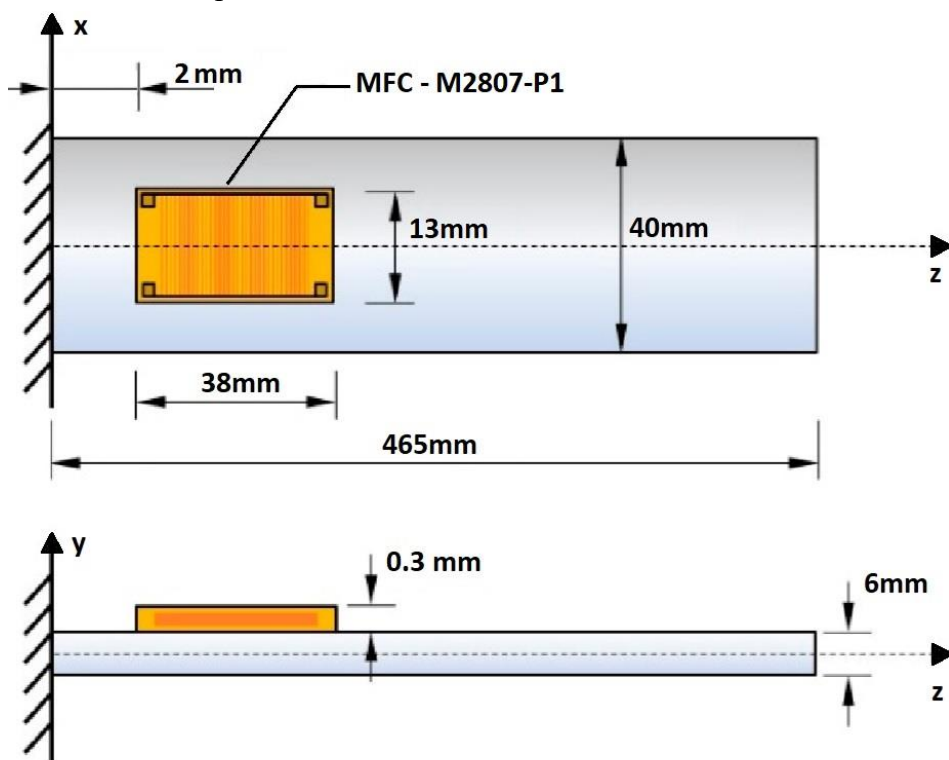
6.4 Umiestnenie snímačov

Ako bolo spomenuté v kapitole 6.2, z programu ANSYS sme získali najlepšie umiestnenie MFC vrstvy. Čo sa týka umiestnenia snímačov vzhľadom k šírke nosníku, umiestnenie je najvhodnejšie v strede. Na pozdĺžnej strane by bolo najvhodnejšie umiestnenie priamo od votknutia. To však nie je možné vzhľadom ku konštrukcii vrstvy MFC, ktorej aktívna časť nezačína hneď od kraju vrstvy (obr.6.2).



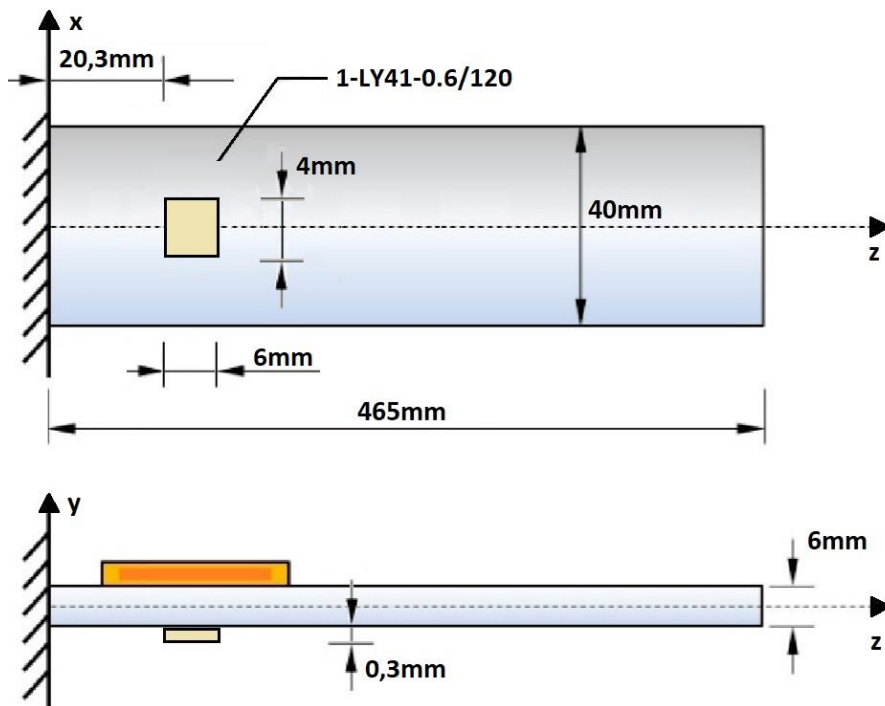
Obr.6.2: Rozmery aktívnej časti M2814-P1

Z toho dôvodu sme MFC vrstvu nalepili z hornej časti nosníku, 2mm od votknutého konca. Polohu konečného nalepenia môžete vidieť na obr.6.4.



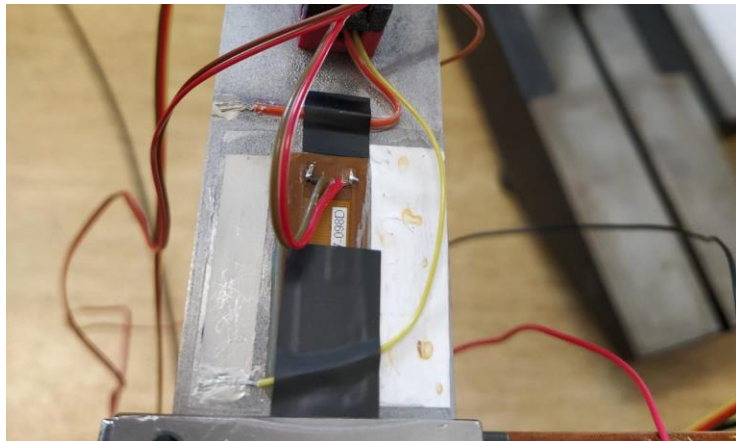
Obr.6.4: Umiestnenie M2807-P1

Následne sme umiestnili tenzometer na spodnú stranu nosníku, priamo pod vrstvu MFC (obr.6.5).

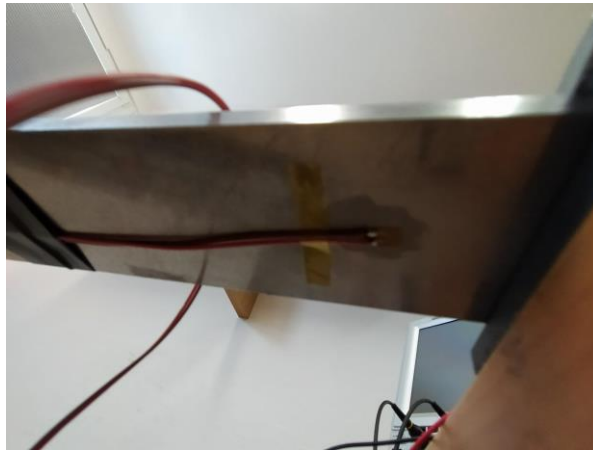


Obr.6.5: Umiestnenie 1-LY41-0.6/120

K meraniu sme ešte pridali akcelerometer, aby sme zistili možnú závislosť medzi nameranými hodnotami. Ten nám taktiež poslúži na porovnanie výsledkov medzi teoretickými z ANSYSU a nameranými. Konečné umiestnenie senzorov je možné vidieť na obrázkoch 6.6 a 6.7.

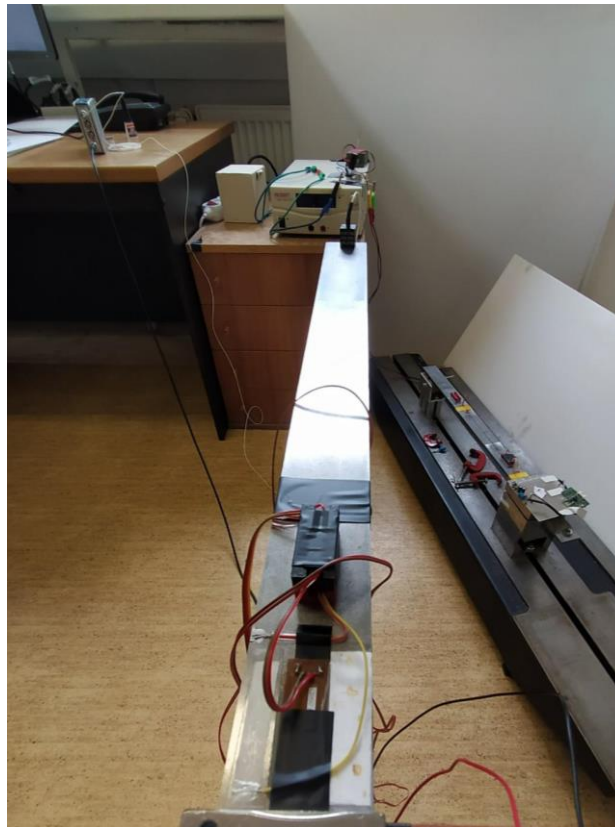


Obr.6.6: Umiestnenie PVDF a MFC vrstvy z hornej strany nosníku



Obr.6.7: Umiestnenie tenzometru zo spodnej časti nosníku

Ako už bolo spomenuté, do experimentu sme zapojili aj akcelerometer. Ten sme umiestnili čo najbližšie voľnému koncu nosníku (obr.6.8).



Obr.6.8: Akcelerometer na konci nosníku

7. Meranie a vyhodnotenie

V tejto časti sa budeme venovať priebehu merania, získavaniu dát a vyhodnoteniu. Budenie nášho nosníku prebiehalo náhodnými údermi po voľnom konci. Najskôr sa do neho udrelo kladivom a potom sa čakalo, dokedy sa ustáli. Ďalšie budenia prebiehali napríklad nadvihnutím a uvoľnením voľného konca nosníku. Opäť sa chvíľku čakalo, než sa nosník ustáli. Takto sme získali signály zo 4 rôznych senzorov. V tomto zložení experimentu malo voľné kmitanie frekvenciu 20 Hz. Na teoretickom modeli nám vyšla frekvencia 20,12 Hz.

Následne sme na voľný koniec nosníku pridali ocelovú kocku o váhe 1kg. Opäť sme nosník začali budiť náhodnými údermi. Pri pridaní tejto kocky sa však zmení aj frekvencia, na ktorej nosník kmitá. Tá sa mala zmeniť z pôvodných 20 Hz na frekvenciu 8,35 Hz. Po spracovaní nameraných hodnôt sme zistili, že po pridaní kocky nosník reálne kmitá na 8,33 Hz. Porovnanie experimentálnych a vypočítaných frekvencií môžeme vidieť v tabuľke 2.

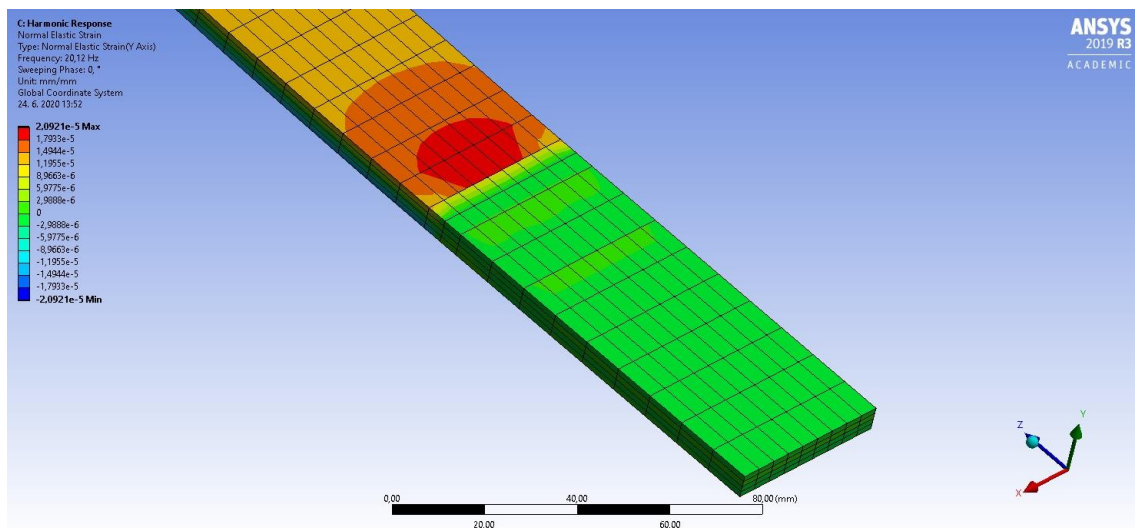
	frekvencia [Hz]	
	Experimentálne	Výpočtom
Kmitanie bez závažia	20	20,12
Kmitanie so závažím	8,33	8,35

Tab.2: Porovnanie teoretických a experimentálnych frekvencií

Na overenie pretvorenia pri týchto frekvenciách, nám poslužil algoritmus „Harmonic response“. Pri nastavení frekvencie kmitania bez závažia (20,12 Hz) a budiacej sily 4,5N (táto sila je harmonická) sme získali maximálnu výchylku voľného konca 0,647 mm. Pre túto výchylku je pretvorenie $20,2 \cdot 10^{-5}$ $\mu\text{m}/\text{mm}$. Taktiež zrýchlenie voľného konca hovorí o 1,04 g. Z nameraných hodnôt pri kmitaní 20 Hz sme našli hodnotu zrýchlenia 1,04 g a skontrolovali sme aké pretvorenie tomu zodpovedá (tab.3).

	Pretvorenie [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	Zrýchlenie [g]	Výchylka [mm]
Experimentálne	$20,29 \cdot 10^{-5}$	1,04	0,645
Výpočtom	$20,28 \cdot 10^{-5}$	1,04	0,650

Tab.3: Porovnanie teoretických a experimentálnych pretvorení

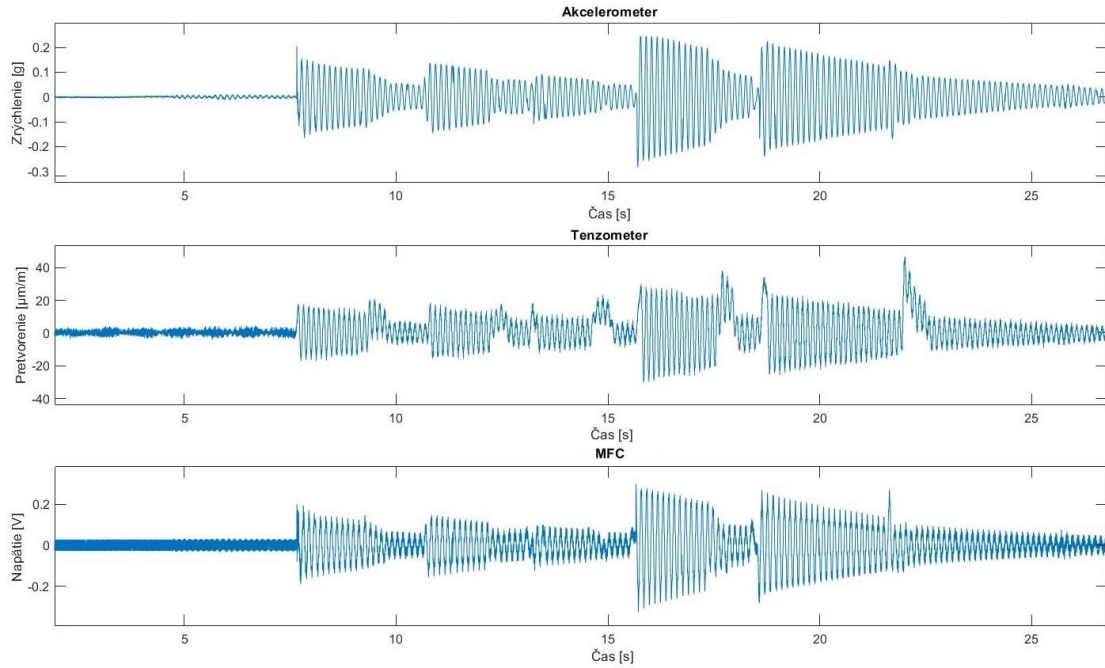


Obr.7.1: Pretvorenie pri frekvencií 20 Hz

Za malými nezrovnalosťami medzi teoretickými a experimentálnymi hodnotami môže byť vplyv prostredia, kde experiment prebiehal. Teoretické hodnoty boli totiž v programe simulované za ideálnych podmienok (teplota okolia, technické prevedenie zostavy a pod.). Taktiež aj lepidlo, ktorým bola vrstva prilepená na nosník mohla spôsobiť malú zmenu vlastností a tým pozmeniť namerané hodnoty od teoretických, keďže sme v modeli vplyv nalepených senzorov na pretvorenie zanedbali.

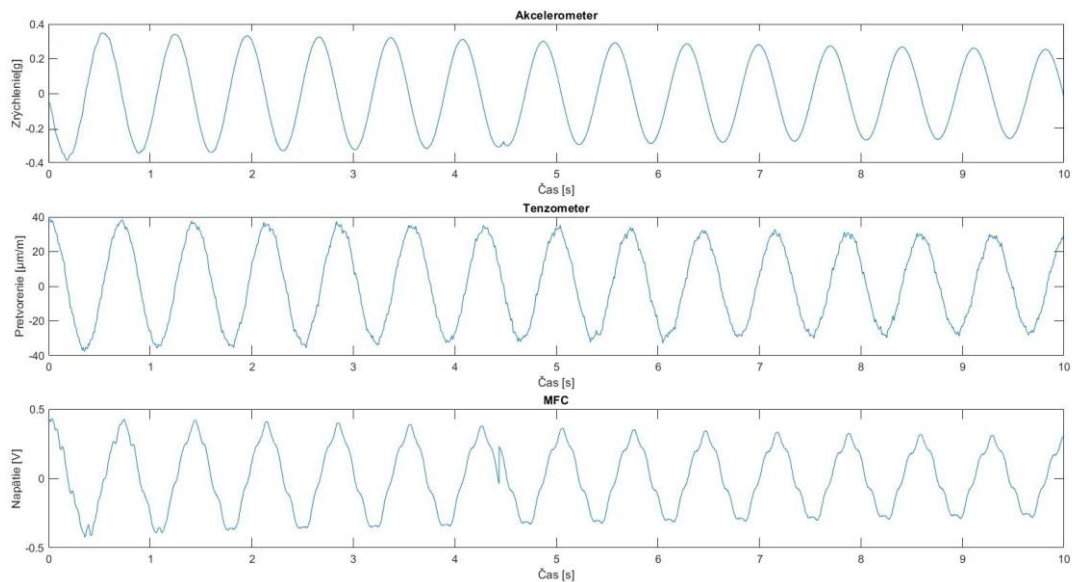
Nasledovne sme experimentálne získané dáta spracovali v matlabe. Pred samotnou prácou s dátami sme museli upraviť a zosynchronizovať signály tak, aby začínali v rovnaký časový úsek. Je to z toho dôvodu, že na každý senzor sa používal iný merací prístroj a teda každý prístroj mal inak nastavený merací krok a čas zapisovania dát. Spracovanie dát prebiehalo nasledovným spôsobom.

Ako prvé sme zosynchronizovali začínajúci bod signálov (obr.7.2), ktorý mali všetky signály spoločné. Väčšinou išlo o nejaký dominantný peak (úder kladiva) podľa ktorého sme dané signály zostavili.



Obr.7.2: Časovo zosúladené signály zo senzorov

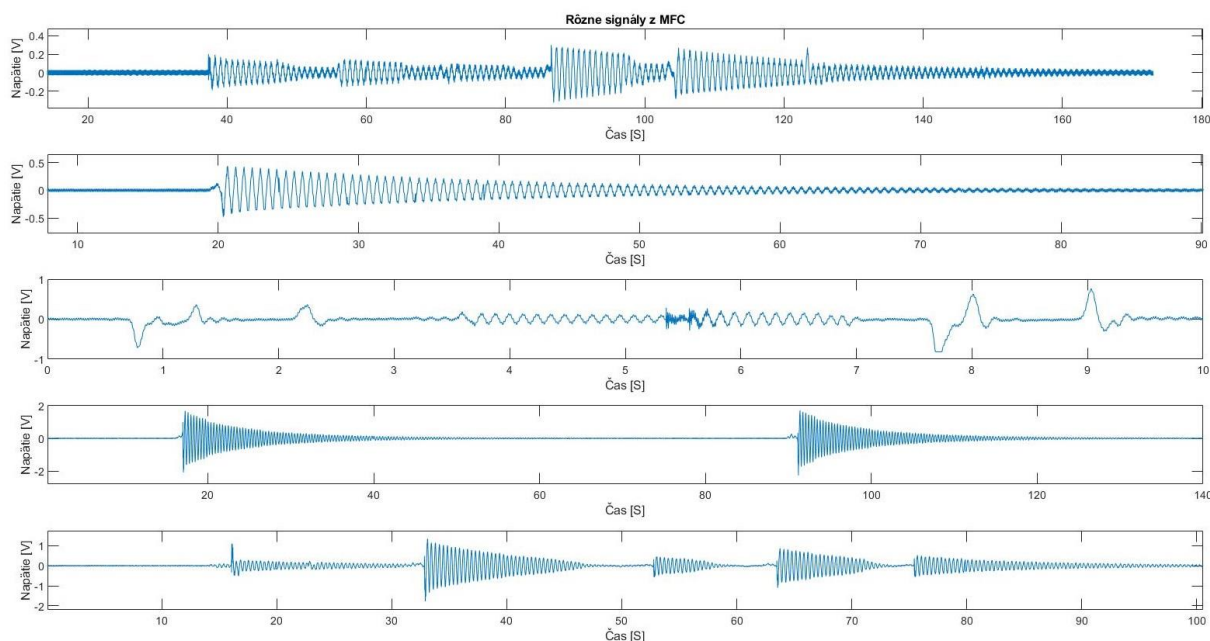
Potom sme zo signálov vybrali časti, kde dochádzalo k voľnému kmitaniu a nebol tam žiadny zásah resp. chyba (úder kladivom a pod.). Už z obrázku 7.2 je vidieť, že signály sú na sebe závislé a majú nejakú zhodu resp. podobnosť. Pomocou matlabu sme takto vystrihnutý úsek (obr. 7.3) skúmali ďalej.



Obr.7.3: Vystrihnutá časť signálu

Vypísali sme si hodnoty jednotlivých amplitúd a spracovali tabuľku hodnôt. Podielom medzi jednotlivými hodnotami amplitúd sme získali pomer, ktorý tieto hodnoty medzi sebou majú. Následne sme určili priemernú hodnotu pomerov. Takto sme postupovali pri každom jednom

signály, ktorý sme z merania získali. Rôznosť meraných signálov z MFC môžeme vidieť na obrázku 7.4. Tvary signálov odpovedajú náhodným úderom kladiva alebo pozdvihnutiu konca nosníku a následnému dokmitaniu. Taktiež je vidieť že každý signál prebiehal odlišnú časovú dobu.



Obr.7.4: Tvary jednotlivých signálov z MFC vrstvy

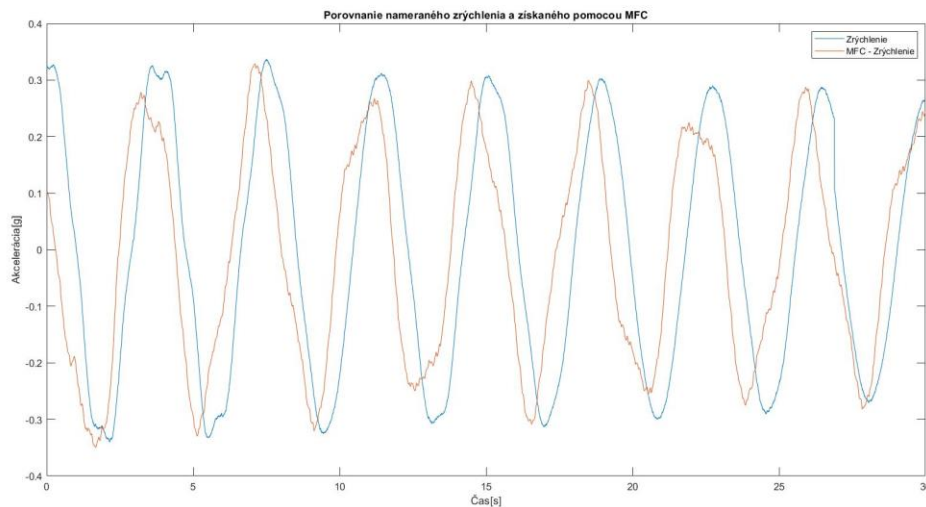
Po spracovaní týchto pomerov sme spätne prenasobovali hodnoty zo senzorov medzi sebou a snažili sme sa získať spätne hodnoty namerané. Chyba, ktorú dosahovali takto spätne získané hodnoty pomocou našich pomerov sa pohybovala celkovo do 10% od pôvodných nameraných hodnôt.

Taktiež záležalo, medzi ktorými signálmi sa daný pomer robil a či to bolo pri meraní s dodatočnou váhou na nosníku (kocka) alebo bez tejto váhy. Celkové zhodnotenie môžeme vidieť v nasledujúcej tabuľke 4.

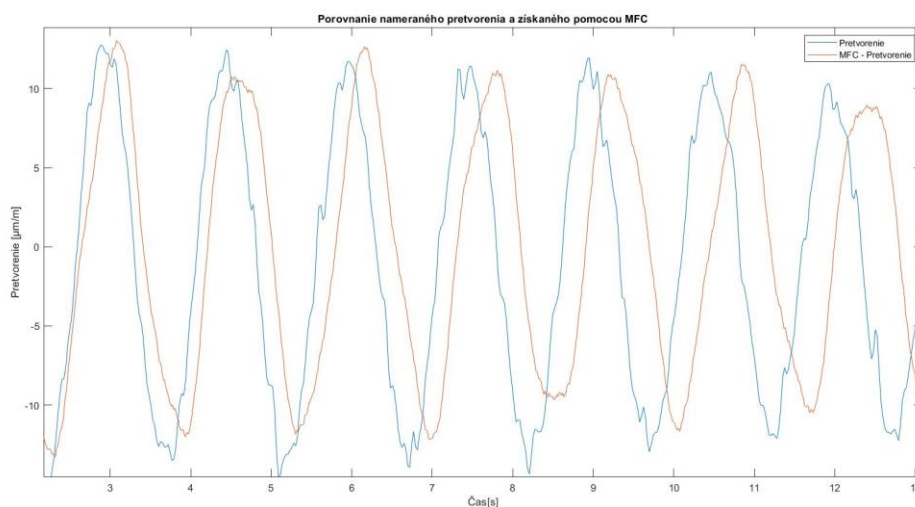
Závislosť pre kmitanie so závažím (8,33 Hz)		chyba ± [%]
Signál z akcelerometru na MFC	1 [g] \approx 1,10 [V/g]	3,02
Signál z akcelerometru na pretvorenie	1 [g] \approx 113,89 [$\mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{g})$]	6,01
Signál z tenzometru na MFC	1 [$\mu\text{m}/\text{m}$] \approx $0,961 \cdot 10^{-3}$ [(V*m)/ μm]	6
Závislosť pre kmitanie bez závažia (20 Hz)		
Signál z akcelerometru na MFC	1 [g] \approx 0,56 [V/g]	7,10
Signál z akcelerometru na pretvorenie	1 [g] \approx 27,07 [$\mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{g})$]	7,75
Signál z tenzometru na MFC	1 [$\mu\text{m}/\text{m}$] \approx $2,0973 \cdot 10^{-2}$ [(V*m)/ μm]	8

Tab.4: Pomer medzi jednotlivými hodnotami a chyba ktorá vznikne

Z nášho experimentu sa ukazuje, že tieto pomery medzi hodnotami týchto veličín sú taktiež závislé od frekvencie kmitania. Pri použití pomerov z tabuľky 4, môžeme vidieť hodnotu z MFC po prepočte na zrýchlenie (obr.7.5), a taktiež hodnotu z MFC po prepočte na pretvorenie (obr.7.6).



Obr.7.5: Signál z akcelerometru a upravený MFC signál na zrýchlenie (20 Hz)



Obr.7.6: Signálu z tenzometru a upravený MFC signál na pretvorenie (20 Hz)

Na obrázkoch 7.5 a 7.6 je možné vidieť, prečo vznikajú dané chyby. Je to spôsobené tým, že napríklad signál z MFC nieje hladký ako signál z akcelerometru. Preto sa môže stať, že niektoré peaky MFC nedotiahne (nezachytí) a následne sa táto hodnota nezhoduje. Po prenásobení pomerom sa chyba len posunie, no stále tam zostáva.

Na získanie podobnosti medzi jednotlivými bodmi signálov sme použili taktiež štatistickú funkciu korelácie. Korelačný koeficient (hodnota medzi -1 a +1) nám uvádza, ako veľmi sú dve premenné podobné. Korelačný koeficient +1 znamená výborná, pozitívna korelácia. Hodnota -1 by hovorila o dokonalej, negatívnej korelácií.

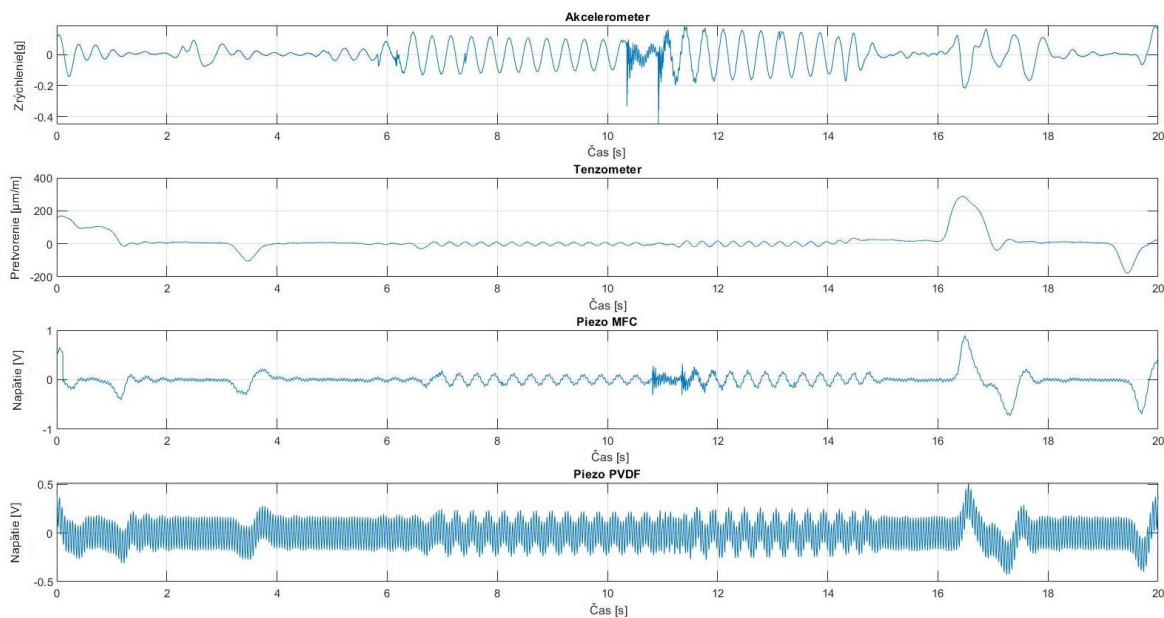
Na výpočet korelačného koeficientu sme použili program Excel, a funkciu CORREL. Táto funkcia dokáže spätne vrátiť korelačný koeficient medzi dvomi súbormi hodnôt, v našom prípade vypísané hodnoty amplitúd z vystrihnutých úsekov. Spriemerované podobnosti medzi vystrihnutými signálmi môžeme vidieť v tabuľke 5.

Korelačný koeficient medzi pretvorením a zrýchlením [-]	0,88
Korelačný koeficient medzi pretvorením a napätím z MFC [-]	0,86
Korelačný koeficient medzi napätím z MFC a zrýchlením [-]	0,95

Tab.5: Korelačný koeficient medzi signálmi

Ako doplnok tejto práce bola k tomuto experimentu pridaná vrstva z PVDF materiálu. Tú sme do výpočtov nezahrňovali, pretože signál z tejto vrstvy bol veľmi zašumený.

Pre spracovanie by ho bolo potrebné trochu vyfiltrovať a nastaviť lepšie experimentálne podmienky na odfiltrovanie rušenia a podobne. Len na ukážku (obr.7.7) a víziu do budúcnosti, sme sa rozhodli ukázať výstupný signál z PVDF vrstvy v porovnaní s ostatnými signálmi.



Obr.7.7: Výstupné signály zo všetkých senzorov

Na obrázku 8.4 môžeme vidieť ako by mohlo vyzerat' chovanie technickej sústavy počas prevádzky. Signály prezentujú získané informácie z rôznych senzorov v tom istom časovom úseku.

8.Záver

Hlavným cieľom bakalárskej práce bolo zistiť možnosť použitia piezoelektrických snímacích prvkov ako senzor pretvorenia. Taktiež, sa zisťovala možná závislosť medzi zrýchlením, pretvorením a generovaným napätím z piezoelektrických vrstiev.

Na základe vykonaného experimentálneho merania sme prišli k záveru, že je možné využívať piezoelektrické vrstvy na tento účel. Vyžaduje to však ďalšie komplikovanejšie merania a podrobnejšie skúmanie závislostí medzi skúmanými hodnotami. Z výsledkov je vidieť, že pomery medzi veličinami taktiež závisia od frekvencie, na ktorej daný nosník práve kmital. Táto metóda a využitie získaných pomerov však pre zložitejšie dynamické prechodové deje nebude až taká presná a jednoduchá. Treba preskúmať viac možností a preveriť na čom všetkom závisia pomery medzi týmito veličinami. Bude potrebné využiť pokročilejšie spracovanie signálu, a prepracovanejšie hľadanie závislosti. Taktiež aj prevedenie experimentu vyžaduje detailnejšie prevedenie na elimináciu možných vplyvov. Ako vízia do budúcnosti pre problém so spracovaním signálu a hľadaním závislosti je nasadenie umelej inteligencie možným krokom. Po osvedčení tejto metódy by našla možné využitie aj vrstva PVDF, ktorá bola do experimentálneho merania zahrnutá na zistenie, či dokáže reagovať na dynamickú odozvu tak ako ostatné snímače. Ukázalo sa, že vrstva kopíruje signál ostatných snímačov. Ako je však možné vidieť na obrázku 7.7, jej signál je veľmi zašumený a teda na jeho využitie bude potrebná vyššie spomínaná prepracovanejšia metóda.

Do budúceho skúmania vidím vo využití piezoelektrických vrstiev ako lacnejšiu náhradu snímania veľký potenciál v širokom spektre priemyselných aplikácií. Po dosiahnutí lepšieho spracovania dát, vidím ako veľkú výhodu cenovú dostupnosť. Taktiež aplikácia týchto vrstiev je veľmi jednoduchá a priestorovo nenáročná. Využitím týchto vrstiev v strojárnskej praxi by mohlo priviesť veľa užitočných informácií, ktoré by dokázali udržiavať stroje v dobrej technickej kondícii a teda predchádzať ich poškodeniu. Pri včasnom zásahu a údržbe dokážeme vytvárať bezpečnejšie prostredie, ktoré je dôležité napríklad v leteckom priemysle. Využitie týchto vrstiev ako senzor na iné veličiny (napríklad zrýchlenia) podľa výsledkov tejto práce bude taktiež možný. Tomu ale bude predchádzať ešte podrobnejšie skúmanie.

9.Zdroje

- [1] -Hadas, Z., Ksica, F., & Rubes, O. (2019). Piezoceramic patches for energy harvesting and sensing purposes. *The European Physical Journal Special Topics*, 228(7), 1589-1604.
- [2] - Sunar, M., and B. O. Al-Bedoor. "Vibration measurement of rotating blades using a root embedded PZT sensor." *Shock and Vibration* 15.5 (2008): 517-541.
- [3] - Rimašauskienė, R., et al. "Experimental analysis of active–passive vibration control on thin-walled composite beam." *Composite Structures* 223 (2019): 110975.
- [4] Okosun, F., Cahill, P., Hazra, B., & Pakrashi, V. (2019). Vibration-based leak detection and monitoring of water pipes using output-only piezoelectric sensors. *The European Physical Journal Special Topics*, 228(7), 1659-1675.
- [5] - Li, Shanshan, et al. "Bi-resonant structure with piezoelectric PVDF films for energy harvesting from random vibration sources at low frequency." *Sensors and Actuators A: Physical* 247 (2016): 547-554.
- [6] - Zhang, Lu, Gang Wu, and Xiaoxiang Cheng. "A rapid output-only damage detection method for highway bridges under a moving vehicle using long-gauge strain sensing and the fractal dimension." *Measurement* (2020): 107711.
- [7] - Ksica, F., Hadas, Z., & Hlinka, J. (2019). Integration and test of piezocomposite sensors for structure health monitoring in aerospace. *Measurement*, 147, 106861.
- [8] - Qiu, L., Lin, X., Wang, Y., Yuan, S., & Shi, W. (2020). A mechatronic smart skin of flight vehicle structures for impact monitoring of light weight and low-power consumption. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 144, 106829.
- [9] - dos Santos, Fábio LM, et al. "The use of dynamic strain sensors and measurements on the ground vibration testing of an f-16 aircraft." *Proceedings of the 16th International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics*. 2015.
- [10] -Salehi, H., Chakrabartty, S., Biswas, S., & Burgueño, R. (2019). Localized damage identification in plate-like structures using self-powered sensor data: A pattern recognition strategy. *Measurement*, 135, 23-38.
- [11] - Instruments, N. (1998). „Strain Gauge Measurement–A Tutorial”.
- [12] - Salamone, S., Bartoli, I., Di Leo, P., Lanza Di Scala, F., Ajovalasit, A., D'Acquisto, L., ... & Kim, H. (2010). High-velocity impact location on aircraft panels using macro-fiber composite piezoelectric rosettes. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21(9), 887-896.

Zoznam obrázkov

Obr.3.1: PZT vrstva	11
Obr.3.2: MFC vrstva	11
Obr.3.3: PVDF vrstva.....	12
Obr.3.4: Model hriadeľu s lopatkami.....	13
Obr.3.5: Model meracej zostavy.....	14
Obr.3.6: Priebeh amplitúdy.....	15
Obr.3.7: Aplikácia PVDF vrstiev na potrubie.....	15
Obr.3.8: a)model meracej zostavy, b)mechanická analýza systému.....	16
Obr.3.9: Frekvenčné pásmo a) štruktúry č.1 b) štruktúry č.2 c) získané.....	16
Obr.4.1: Jednoduchý tenzometer	17
Obr.4.2: Štvrť mostíkové zapojenie.....	18
Obr.4.3: Model mostu.....	18
Obr.5.1: Sensory aplikované na nosník lietadla v experimente.....	19
Obr.5.2: Smart skin.....	19
Obr.5.3: Krídlo lietadla F-16 pokryté tenzometrami.....	20
Obr.6.1: Meracia zostava.....	21
Obr.6.2: Analýza miesta pre umiestnenia senzorov.....	22
Obr.6.2: Rozmery aktívnej časti M2814-P1.....	23
Obr.6.4: Umiestnenie M2807-P1.....	23
Obr.6.5: Umiestnenie 1-LY41-0.6/120.....	24
Obr.6.6: Umiestnenie PVDF a MFC vrstvy z hornej strany nosníku.....	24
Obr.6.7: Umiestnenie tenzometru zo spodnej časti nosníku.....	25
Obr.6.8: Akcelerometer na konci nosníku.....	25
Obr.7.1: Pretvorenie pri frekvencií 20 Hz.....	27
Obr.7.2: Časovo zosúladené signály zo senzorov.....	28
Obr.7.3: Vystrihnutá časť signálu.....	28
Obr.7.4: Tvary jednotlivých signálov z MFC vrstvy.....	29
Obr.7.5: Signál z akcelerometru a upravený MFC signál na zrýchlenie (20 Hz).....	30
Obr.7.6: Signálu z tenzometru a upravený MFC signál na pretvorenie (20 Hz).....	30
Obr.7.7: Výstupné signály zo všetkých senzorov.....	31

Zoznam skratiek

MKP – metóda konečných prvkov

PVDF – polyvinylidénfluorid

MFC – macro fiber composite

PZT - zirkoničitan titaničitan olovnatý

Zoznam tabuliek

Tab.1: Parametre sústavy

Tab.2: Porovnanie teoretických a experimentálnych frekvencií

Tab.3: Porovnanie teoretických a experimentálnych pretvorení

Tab.4: Pomer medzi jednotlivými hodnotami a chyba ktorá vznikne

Tab.5: Korelačný koeficient medzi signálmi