



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## MĚŘENÍ VIBRACÍ A RÁZŮ PRO ANALÝZU KOLIZNÍCH SRÁŽEK

VIBRATION AND IMPACT MEASUREMENT FOR COLLISION ANALYSIS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Andruška

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Musil

BRNO 2019



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**  
Ústav mikroelektroniky

**Student:** Martin Andruška

**ID:** 195566

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### Měření vibrací a rázů pro analýzu kolizních srážek

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je experimentálně porovnat vlastnosti a možnosti využití vybraných komerčně dostupných snímačů k detekci nárazů částic prachu do konstrukce CubeSatu. Součástí práce je návrh a realizace obvodového řešení pro zpracování signálu ze snímače a vyhodnocení kritičnosti kolize z naměřených dat pomocí FPGA s cílem minimalizace spotřeby celého obvodu.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 30.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Tomáš Musil

**Konzultant:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Táto bakalárska práca je zameraná na problematiku detekcie kolízií satelitov typu CubeSat s mikroskopickými časticami vesmírneho odpadu a meteoroidov. Cieľom práce je priblížiť metódy detekcie, popísať rôzne snímače na meranie akustickej emisie, rázov a vibrácií spôsobených kolíziou a experimentálnym porovnaním zistiť vhodnosť ich aplikácie. Práca obsahuje tiež popis vhodných spôsobov analýzy dát amplitúdovou a spektrálnou analýzou. Na záver je v práci návrh a realizácia možného spôsobu spracovania získaných dát zo snímača pomocou FPGA.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

CubeSat, HVI, kolízia, meteoroid, vesmírny odpad, MMOD, akustická emisia, vibrácie, piezoelektrický menič

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with the issue of CubeSat collision and detection with microscopic particles of space debris and meteoroids. The aim of the thesis is to approach methods of detection, to describe various sensors for measurement of acoustic emission, shock and vibrations caused by collisions and by experimental comparison determine the suitability of their application. The thesis also contains description of possible methods of data analysis using amplitude and spectral analysis. Finally, there is a suggestion and realization of a possible way of processing acquired data from a sensor using an FPGA.

## **KEYWORDS**

CubeSat, HVI, collision, meteoroid, space debris, MMOD, acoustic emission, vibration, piezoelectric transducer

ANDRUŠKA, M. *Měření vibrací a rázů pro analýzu kolizních srážek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2019. 53 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Musil.

## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem vedúcemu práce Ing. Tomášovi Musilovi za odborné rady a pomoc pri vypracovávaní bakalárskej práce. Ďakujem Ing. Alexandrovi Otáhalovi, Ing. Josefovi Skácelovi a Ing. Jaroslavovi Jankovskému za konzultácie, pomoc a zapožičanie vybavenia pre účely merania. Ďakujem Ing. Jiřímu Libichovi Ph.D. za ochotné zapožičanie vybavenia. Ďakujem doc. Ing. Petrovi Benešovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Fialkovi, Ph.D. za odborné a cenné informácie z oblasti merania akustickej emisie a piezoelektrickej technológie, za ochotné zapožičanie vybavenia a pomoc s realizáciou meraní vlastností piezoelektrických diskov. Ďakujem Ing. Lukášovi Hrubému za odborné rady pri vývoji stavového automatu. Na záver ďakujem kolegyni Veronike Fišarovej za výpomoc pri meraní digitálnych obvodov.

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>5</b>
<b>1 Umelé družice a HVI</b>	<b>6</b>
1.1 História.....	6
1.2 Kesslerov syndróm .....	7
1.3 Pravdepodobnosť kolízií.....	8
1.4 CubeSat .....	8
1.5 HVI a nanosatelity .....	8
<b>2 Metódy detekcie HVI</b>	<b>9</b>
2.1 Následky HVI .....	9
2.2 Akustická emisia.....	10
2.3 Rázové akcelerácie .....	11
2.4 Detekcia nárazu pomocou termografie .....	12
2.5 Kalorimetria .....	13
2.6 Rezistorová detekcia .....	13
<b>3 Senzory, meniče</b>	<b>14</b>
3.1 Piezoelektrický menič pre detekciu AE.....	14
3.2 Piezoelektrický akcelerometer .....	15
3.3 Kapacitný MEMS mikrofón .....	16
3.3.1 Analógový MEMS mikrofón .....	17
3.3.2 Digitálny MEMS mikrofón.....	17
3.4 Piezoelektrický MEMS mikrofón.....	18
<b>4 Analýza signálov</b>	<b>19</b>
4.1 Analógovo číslicový prevod .....	19
4.1.1 Sigma Delta modulátor digitálnych MEMS mikrofónov .....	20
4.2 Časovo amplitúdová analýza .....	21
4.3 Spektrálna analýza .....	22
4.3.1 Rýchla Fourierova Transformácia .....	22
<b>5 Výpočtová technika CubeSatu</b>	<b>23</b>
5.1 Mikrokontroléry a FPGA v nanosatelitoch.....	23

5.1.1	Využitie FPGA pre vesmírne aplikácie .....	24
<b>6</b>	<b>Budenie mechanického vlnenia</b>	<b>25</b>
6.1	Elektromechanický vibračný stôl a reproduktory .....	25
6.2	Piezoelektrický aktuátor .....	25
6.3	Napájanie diskového piezoaktuátoru .....	27
<b>7</b>	<b>Meranie akustických pulzov</b>	<b>30</b>
7.1	Operačný zosilňovač OPA2134PA.....	31
7.2	Mikrofóny MEMS .....	32
7.3	Piezofólie PVDF .....	33
7.4	Piezoelektrické disky .....	34
7.4.1	Meranie vlastností piezoelektrických diskov.....	34
7.4.2	Piezokeramický disk s korundovým substrátom .....	35
7.4.3	Piezoelektrický menič snímača vzdialenosti .....	37
7.5	Úsudky z meraní .....	38
7.5.1	Priestorové usporiadanie snímačov .....	38
<b>8</b>	<b>obvod ADC Xilinx Spartan 3-E</b>	<b>39</b>
8.1	Programovateľný operačný zosilňovač LTC6912 .....	40
8.2	Analogovo číslicový prevodník LTC1407A-1 .....	41
<b>9</b>	<b>Vyhodnocovací stavový automat</b>	<b>42</b>
9.1	Stavový diagram programovania LTC6912-1 .....	42
9.2	Stavový diagram ADC a vyhodnotenia .....	43
9.3	Simulácia v Xilinx ISim .....	44
9.4	Komplikácie s LTC6912-1 .....	45
<b>10</b>	<b>Záver</b>	<b>46</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>48</b>
	<b>Zoznam symbolov a skratiek</b>	<b>51</b>
	<b>Zoznam obrázkov</b>	<b>52</b>

# ÚVOD

Od počiatku kozmickej epochy v minulom storočí sa postupne objavujú stále nové spôsoby, ako získať čo najviac informácií o blízkom a vzdialenom vesmíre bez fyzického umiestnenia meracieho aparátu do úmernej vzdialenosti. Jedným zo spôsobov je práve analýza vibrácií a akustických signálov vyvolaných hyper-rýchlostným nárazom (HVI) častice prachu pochádzajúcej z hlbokého vesmíru alebo fragmentom orbitálneho odpadu.

Rýchlosť, hmotnosť, smer letu a materiál sú parametre vypovedajúce o možnom pôvode a charaktere telesa, s ktorým satelit prišiel do kontaktu. Zisťovanie početnosti nárazov častíc do satelitov a výpočet smeru pohybu častice môže poskytovať informácie o zvýšenej pravdepodobnosti kolízií v daných orbitálnych výškach, prípadne charakter mikrometeoroidov po bližšej analýze HVI deju. Podmienkou takéhoto merania je však nedeštruktívna zrážka a síce prežitie prístrojového vybavenia satelitu minimálne po dobu spracovania a odvysielania dát na riadiace stredisko [7].

Vývoj technológie podporuje rozvoj vesmírneho priemyslu a teda neustále zvyšovanie počtu objektov na obežnej dráhe vyrobených človekom. Trend blízkej budúcnosti vo vypúšťaní skupín stoviek až tisícov nanosatelitov so sebou prebúda problém zvaný Kesslerov syndróm, ktorý predpokladá vznik prakticky neprechodnej orbitálnej obálky z trosiek zničených satelitov. S bezpečnou prevádzkou jednotlivých satelitov či konštelácií nanosatelitov priamo súvisí problematika in situ detekcie kolíznych zrážok na ich obežnej dráhe s mikroskopickými časticami a možnosťami analýzy zmeraných dát [3], [20].

Rôzne druhy snímačov používaných v defektoskopií materiálov určených pre klasický priemysel sa v minulosti neraz osvedčili v rôznorodých monitorovacích aplikáciách pre vesmírnu techniku pomimo štandardných metód systémovej diagnostiky. Z toho vyplýva myšlienka možnosti využitia moderných technológií v nových druhoch snímačov, ktoré nie sú špecificky vyrábané pre tento účel, ale mohli by slúžiť na detekciu prejavov HVI v CubeSatoch [6].

S ohľadom na charakter, veľkosť a energetické možnosti CubeSatu je návrh meracieho a analyzačného systému kolízií zameraný na riešenie pomocou netradičných experimentálnych metód a komerčne dostupných elektronických komponentov s relatívne jednoduchou integráciou do štandardnej elektronickej výbavy nanosatelitov. Na záver je v práci popísaná realizácia stavového automatu v FPGA s nenáročným vyhodnotením kolíznej udalosti.



# 1 UMELÉ DRUŽICE A HVI

Táto kapitola uvádza informácie o vývoji kozmickej techniky z minulosti aj prítomnosti, nevyhnutné pre základné pochopenie zmyslu systému, ktorým sa táto práca zaoberá.

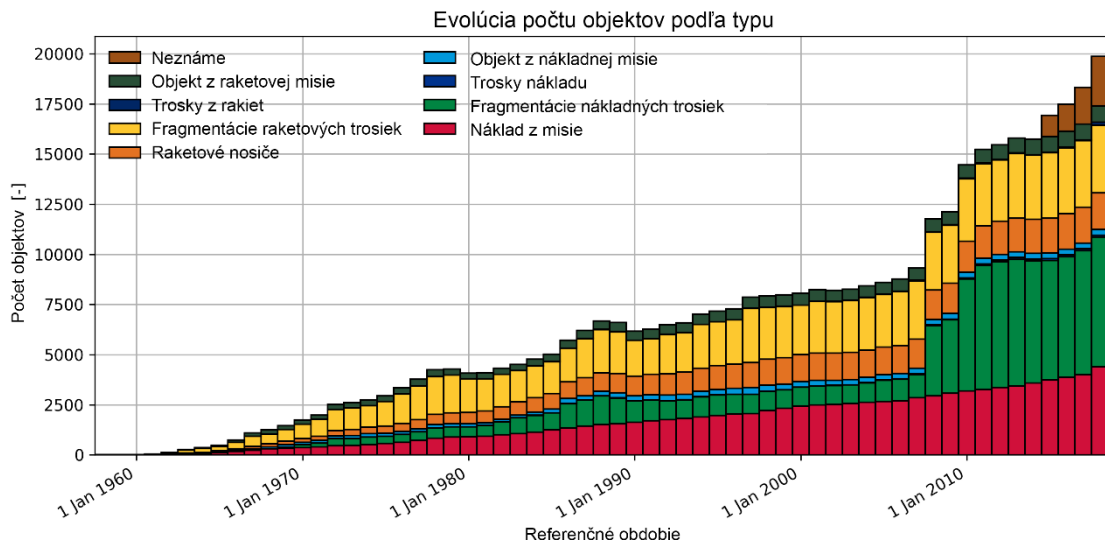
## 1.1 História

Prvé lety do vesmíru boli plné veľkých technických výziev, s ktorými konštruktéri nosných rakiet a orbitálnych telies nemohli vopred počítať. Pokým sa problém neobjavil počas plnenia misie, nemohol byť predpovedaný pretože nikto nemal skúsenosti a dáta z kozmu, do ktorého sa ľudské technické prostriedky postupne dostávali. Toto prostredie - obežná dráha, je dnes rozdelená na niekoľko úrovní výškových intervalov, každá výška sa vyznačuje inými fyzikálnymi podmienkami, potrebnou orbitálnou rýchlosťou a využitím.

Ešte pred vypustením prvých vesmírnych rakiet existovali hypotézy o menších telesách obiehajúcich Zem, ktoré by mohli ohroziť techniku budúcich letov s odvolaním na výskyt týchto telies v Zemskom tieni a neschopnosť vtedajších pozorovacích prostriedkov ich zistiť. Americký astronóm a objaviteľ Pluta Clyde Tombaugh viedol pozorovania projektu na hľadanie blízko-zemských telies, ktorý sám sformuloval ako skúsený pozorovateľ. Krátko pred tým ako plánoval Tombaugh projekt ukončiť 4. októbra 1957 Sovietsky zväz vypustil prvú umelú družicu Sputnik 1, ktorú pozorovacie prostriedky úspešne zachytili napriek jej malým rozmerom a tým sa možnosť existencie neznámych prírodných družíc na LEO prakticky vylúčila.

Od prvého Sputniku zaviedli vzdušné sily Spojených Štátov katalóg vypustených objektov väčších ako 10 cm nachádzajúcich sa na obežnej dráhe Zeme. Identifikátorom v katalógu je dátum vypustenia, krajina pôvodu a lokalita štartu. V prípade fragmentácie objektu sa každá časť dostatočných rozmerov identifikuje samostatne, pokiaľ objekt zhorí v atmosfére je z katalógu odstránený. Z výnimočnej udalosti onedlho vznikla rutina a kozmický priestor v okolí Zeme sa stal nielen predmetom výskumu a obrany, ale aj komerčných služieb v podobe komunikačných či televíznych satelitov. Potreba katalogizácie objektov na Zemských orbitách však nekončí pri satelitoch. Akékoľvek zvyšky nosných rakiet, ochranných krytov a technického vybavenia využitého pri vypúšťaní satelitu vytvárajú príspevok k orbitálnemu odpadu. Anti-satelitné zbrane testované Sovietskym zväzom a Spojenými Štátmi v rokoch 1968 až 1985 spôsobili dodatočný vznik veľkého množstva trosiek, z ktorých bolo možné sledovať len väčšie fragmenty. Posledný test systému anti-satelitných zbraní podnikla Čína v roku 2007, kedy bol balistickou strelou zničený nefunkčný Čínsky satelit Fengyun-1C vo výške 863 km. Kolízia s rýchlosťou zhruba 32 000 km/h vytvorila viac ako 3000 nových trosiek, ktoré sa rozľahli po dráhe bývalého satelitu a behom troch rokov pokryli výškový interval s rozsahom 175 až 3600 km. Ďalší významný príspevok k orbitálnemu odpadu vznikol v roku 2009 zrážkou nefunkčného Ruského komunikačného satelitu Cosmos 2251, teda trosky, s funkčným Americkým komunikačným satelitom spoločnosti Iridium vo výške 770 km. Kolíziou vznikli dva zhluky trosiek letiacich po

pôvodných dráhach satelitov, viac ako 1600 katalogizovaných fragmentov, ktoré ďalej výrazne expandovali.



Obr. 1-1: Historický vývoj množstva a typu orbitálnych objektov [2]

Vesmírna monitorovacia sieť Spojených Štátov zaznamenala počas 60 rokov kozmickej aktivity z 5250 štartov rakiet viac ako 42000 sledovaných objektov z ktorých zhruba 23000 je stále prítomných na obežnej dráhe. Na LEO sú monitorované objekty veľkosti okolo 5 až 10 cm, na vyššej geostacionárnej orbite v rozsahu 30cm až 1m. Samotné satelity majú v katalógu podiel okolo 24 %, z ktorých iba tretina je funkčná. Zbytky vrchných stupňov nosných rakiet a ďalších materiálnych zbytkov misií tvoria zhruba 18 % katalógu [1], [2].

## 1.2 Kesslerov syndróm

Americký astrofyzik Donald J. Kessler v roku 1978 vytvoril predpoveď, že po roku 2000 budú náhodné zrážky katalogizovaných objektov na LEO významným zdrojom drobných častíc kozmického odpadu, ktoré sú práve najrizikovejšie pretože sa nedajú spoľahlivo alebo vôbec detekovať. Kessler tvrdil, že aj v prípade zastavenia letov do vesmíru by sa už prítomným množstvom objektov počet trosiek stále exponenciálne zvyšoval s časom. Tento proces by sa eventuálne mohol dostať do stavu, ktorý znemožní ľuďstvu cestovať za hranice atmosféry z príčiny vytvorenia neprechodnej orbitálnej vrstvy zbytkov trosiek umelých družíc a nosných rakiet. Od doby vzniku tejto predpovede sa postupne znižovalo množstvo odpadu z vesmírnych misií s uvedením rizík vyplývajúcich z existencie nadbytočných predmetov na obežnej dráhe. Zaviedli sa procedúry obmedzujúce tvorbu odpadu pri vypúšťaní satelitov a systém aktívneho vyvarovania sa kolízií satelitov vychýlením ich dráhy pri zistení vyššej pravdepodobnosti kolízie s iným objektom. Zhoršeniu situácie sa dá zabrániť jedine striktným dodržiavaním zavedených pravidiel a aktívnym vyradovaním nepotrebných objektov z orbity [3].

### 1.3 Pravdepodobnosť kolízií

Nárazy častíc do techniky sa stali neoddeliteľnou súčasťou vesmírnych misií. Počas 88 misií raketoplánov v rokoch 1981 až 1998 bolo celkovo 70 okien vymenených z dôvodu poškodenia nárazmi mikroskopickými časticami. Ohrozenie nie len techniky, ale hlavne pilotovaných letov vyžaduje výpočet pravdepodobností kolízií so známymi objektmi zasahujúcimi do dráhy letu [1].

### 1.4 CubeSat

Základný typ novodobých nanosatelitov je CubeSat kubickej formy ako názov napovedá, charakterizovaný rozmermi štandardu 10 x 10 x 11,35 cm a celkovou hmotnosťou do 1,33 kg kategórie 1U. Väčšie nanosatelity sa odvíjajú od tohoto štandardu predĺžením rozmeru maximálnej výšky akoby vzájomným spojením viacerých CubeSatov, obvykle 3U a 6U kde číslo indikuje počet základných 1U jednotiek podľa zložitosti systému. Štvorcový tvar plošného základu ostáva rozmerovo identický pre kompatibilitu s vypúšťacími zariadeniami pre nanosatelity a doskami plošných spojov určených pre inštaláciu konkrétne do týchto malých satelitov.

Príchod nanosatelitov otvoril komerčným, akademickým aj súkromným záujemcom reálnu cestu k vlastnej realizácii experimentov v rámci LEO. Vývoj elektroniky CubeSatov je zámerom mnohých návrhárov, konštruktéri a vývojári nanosatelitov často siahajú po komerčne dostupných elektronických komponentoch, ktoré znižujú celkovú finančnú a časovú náročnosť ich projektu. Radiačná odolnosť bežných komerčných súčiastok využiteľných pre nanosatelity je stále zlepšovaná s ohľadom na budúci vzrast záujmu o cenovo dostupné a zároveň odolné komponenty pre CubeSaty na trhu [20].

### 1.5 HVI a nanosatelity

S rastúcim záujmom o vypúšťanie veľkých konštelácií nanosatelitov, ktoré majú vzájomne spolupracovať a poskytovať komunikačné a internetové služby pre rozsiahle územia na Zemi, rapídne rastie pravdepodobnosť narušenia takéhoto systému deštruktívnou kolíziou meteoroidu alebo odpadu s niektorým zo satelitov.

Konštelácie, ktoré budú zložené s tisícov nanosatelitov strategicky rozložených na LEO musia byť schopné aktívne meniť svoju dráhu aby sa dokázaly vyhnúť kolízií aspoň s katalogizovanými telesami a nespustili tak vzájomnú deštruktívnu reťazovú reakciu popísanú Kesslerom. Prevádzka takýchto orbitálnych sietí nanosatelitov súkromným sektorom vesmírneho priemyslu nie je dostatočne regulovaná [4].

## 2 METÓDY DETEKČIE HVI

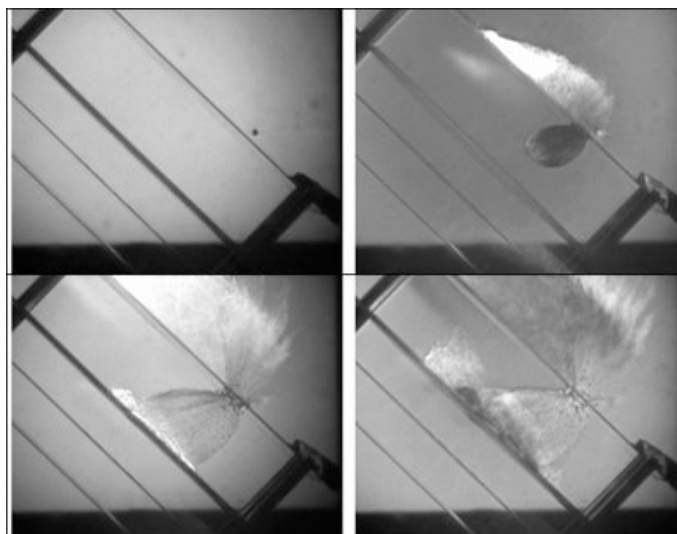
Monitorovanie technického stavu družice je dôležitým predpokladom pre úspešné a dlhotrvajúce misie. Diagnostika funkčnosti jednotlivých systémov je potrebná nie len s ohľadom na plnenie účelu družice, ale aj ako ochrana pred stratou kontroly nad objektom a teda vytvorením ďalšieho orbitálneho odpadu. Technika na Zemských orbitách je vystavená hlavne rizikám kolízie s troskami ľudského pôvodu a prípadnými meteoroidmi. V tomto ohľade je detekcia HVI satelitmi nápomocná v zisťovaní hustoty rozloženia mikroskopických inak nepozorovateľných častíc v rôznych orbitálnych výškach. Lety kozmických sond do hlbokého vesmíru sa odohrávajú v prostredí výhradne meteoroidov a detekcia nedeštruktívnych kolízií otvára nové možnosti výskumu množstva a materiálneho zloženia častíc a prachu v ich ceste [1], [6].

### 2.1 Následky HVI

Detekcia nárazov častíc z výskumného hľadiska prebieha obvykle pomocou samostatného meracieho systému, ktorý pokrýva iba malú plochu v pomere k celkovej veľkosti satelitu či kozmickej sondy. Pre správne sledovanie technického stavu satelitu je však potrebné merať čo najväčšiu plochu. V prípade nanosatelitov typu CubeSat ich veľkosť vedie k adaptácii senzorky priamo na ich konštrukciu a zužuje počet reálne využiteľných detekčných metód.

#### Fyzikálne prejavy HVI

- elektromagnetická emisia (viditeľné svetlo, IR a mikrovlnná radiácia),
- akustická emisia,
- sekundárne častice prachu a ejecta,
- plazmový oblak,
- nárazom indukované akcelerácie,
- veľkosť a tvar krátera či prierazu,
- chemické vlastnosti zvyškov materiálu v kráteri [6].

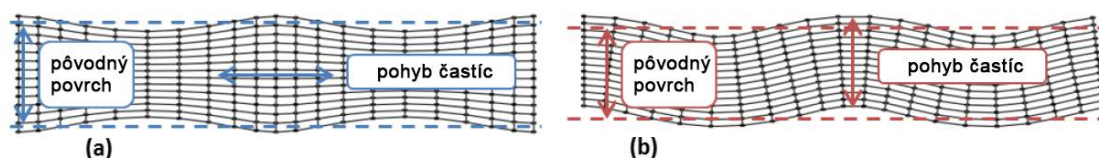


Obr. 2-1: Efekt HVI na Whippleov štít [6]

## 2.2 Akustická emisia

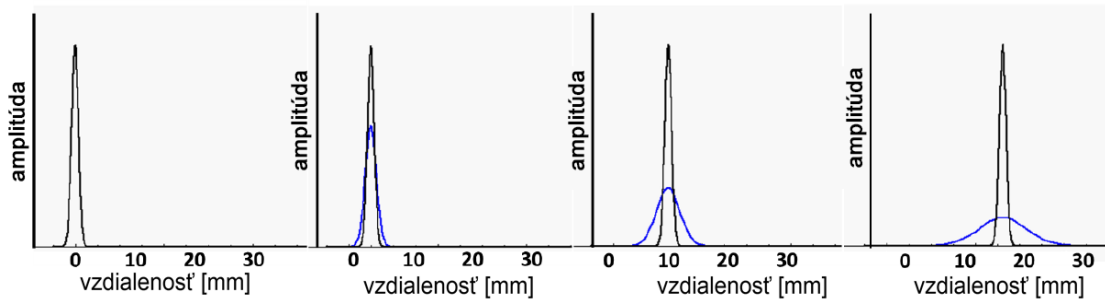
Náhle uvoľnenie veľkého množstva energie vo vnútri materiálu pevného telesa vyvolá elastické vlny s frekvenciou v oblasti ultrazvuku typicky rozsahu 20 KHz až 1 MHz, ktoré sa nazývajú akustická emisia (AE). Elastické vlny vznikajú a postupujú vychýlením častíc materiálu a návratom do ich pôvodnej pozície, štruktúra vibruje v smere šírenia vlny. Z fyzikálnych vlastností materiálov vyplýva, že s veľkosťou vzdialenosti bude narastať celkový útlm amplitúdy takéhoto vlnenia. Vlny sa šíria materiálom až k povrchu, kde je možné ich merať pripojeným AE snímačom. Zdrojom energie pre vznik elastických vln, ktorým sa táto práca zaoberá je kolízna zrážka.

Analýza akustickej emisie je druh nedeštruktívneho testovania (NDT) materiálov pre štrukturálne poruchy, využíva sa v širokom spektre oborov od testovania tlakových nádob a korodujúcich nádrží až po detekciu vysokonapäťových výbojov a prirazov izolácie. Väčšina defektov mechanických systémov vyvolá akustickú odozvu s čím sa viaže vysoký potenciál aplikácie tejto meracej metódy.



Obr. 2-2: (a) symetrické a (b) asymetrické vlny [7]

Útlm AE vlnenia je spôsobený postupným šírením a rozkladaním energie do štruktúry materiálu, teda znížením amplitúdy vlnenia. Celkový útlm rastie s postupným šírením vlnenia, ale samotná veľkosť útlmu sa znižuje o 30 % za každý dvojnásobok vzdialenosti, ktorou sa vlnenie šíri. Ďalšou príčinou útlmu je disperzia spôsobujúca rozloženie energie vlnenia a predĺženie jeho priebehu, na obrázku 2-3 je znázornené rozťahnutie vlny, šíriacej sa v danom prostredí z dôvodu disperzie.



Obr. 2-3: Šírenie vlnenia v disperznom materiáli [7]

Absorbcia je pohltenie energie materiálom premenou na teplo, absorpčný útlm je frekvenčne závislý a teda s rastúcou frekvenciou sa prejavuje výraznejšie. Rýchlosť šírenia vlny sa väčšinou rozumie ako rýchlosť skupiny vln, disperzia totiž zapríčiňuje, že každá frekvenčná zložka sa v danom prostredí šíri inou rýchlosťou. Analýza signálov zmeraných skupinou viacerých vhodne rozmiestnených senzorov umožňuje zistiť amplitúdu, energiu a vypočítať približnú lokalitu pôvodu signálu meraním a porovnaním času, za ktorý signál dorazí do jednotlivých senzorov [6], [7].

## 2.3 Rázové akcelerácie

Mechanické rázy vyvolané HVI kolíziou mikrometeoroidu je možné zaznamenávať ako vibrácie pomocou vhodného akcelerometru. Nehomogénne prostredie, v ktorom sa tieto vibrácie rôznych amplitúd a frekvencií šíria je tvorené obálkou a vnútornou konštrukciou družice. Priebeh zmeraného signálu v čase je ovplyvnený parametrami ako materiály, spoje a štruktúra celej konštrukcie, čím vzniká útlm, odrazy, prekryvanie a iné nežiadúce deje. Vzhľadom na obvyklú nemožnosť montáže akcelerometru priamo na nárazu vystavenú oblasť je potrebné započítať tieto parametre do výslednej signálovej analýzy, najmä v prípade zisťovania približnej energie HVI môže útlm negatívne skresliť tento výsledok, dôležitý pre zistenie kritickosti nárazu a pravdepodobnosti poškodenia interných častí satelitu.

Spoločnosť Boeing viedla vývoj bezpečnostného vylepšenia pre raketoplány tvoreného sieťou 88 akcelerometrov umiestnených na každom krídle stroja. Pôvodným cieľom siete nárazových senzorov bolo monitorovanie technického stavu kritických častí raketoplánu. Testy ukázali, že použité senzory odčítajú 20 000 hodnôt za sekundu sú dostatočne citlivé na detekciu malých vibrácií, a dokážu zaznamenať aj nárazy mikroskopických častíc do trupu raketoplánu [6].

## **2.4 Detekcia nárazu pomocou termografie**

Termografia je diagnostická technika založená na zobrazovaní termálneho vyžarovania objektov za účelom zisťovania ich technického stavu a lokalizácie porúch. Vykonáva sa periodickými kontrolami v istých časových intervaloch alebo kontinuálnym získavaním termálneho obrazu sledovaného telesa.

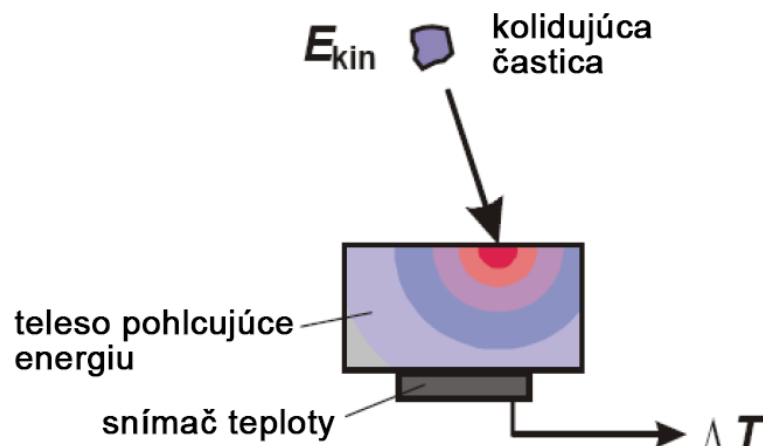
Periodické kontrolovanie termálnej odozvy po ožiarení objektu zdrojom tepelného žiarenia dokáže odhaliť zmenu stavu indikujúcu chybu, teda poškodenie materiálu od poslednej kontroly pomocou rozličnej doby ochladzovania poškodenej časti, napríklad delaminácia vnútornej štruktúry.

Kontinuálne snímanie termálneho vyžarovania okolia vhodne umiestneného snímača v prípade zvýšenia meranej hodnoty podáva informácie o kolíznej udalosti. Jedným z prejavov HVI je výrazný ohrev okolia dopadu, z detekovanej infračervenej emisie je následne možné určiť niektoré parametre týkajúce sa pôvodu kolidujúceho objektu ako rýchlosť, hmotnosť materiál a podobne.

Využitie termografie je veľmi závislé na špecifickej konfigurácii, pretože výsledok je významne ovplyvnený termálnymi cestami konštrukciou a plášťom daného satelitu odvádzajúcimi nárazom vytvorené teplo. Celkový čas pozorovateľného termálneho prejavu HVI tiež musí trvať dostatočne dlho, aby ho bolo možné ho zachytiť snímačom s nízkym počtom odčítaní hodnôt za sekundu. Termografia bola v minulosti využívaná pri periodickej kontrole technického stavu plášťa krídel raketoplánov [6].

## 2.5 Kalorimetria

Kinetická energia  $E_{kin}$  častice kolidujúcej s plášťom satelitu sa po náraze z významnej časti premení na teplo. Teplota v okolí dopadu sa následne zvýši úmerne pôvodnej kinetickej energii podľa efektivity konverzie o hodnotu  $\Delta T$ , ktorú meria snímač teploty upevnený o plášť satelitu. Na tomto princípe je založená kalorimetrická detekcia HVI, na obrázku 2-4 je zobrazený zjednodušený model [6].



Obr. 2-4: Kalorimetrické meranie energie zo zmeny teploty  $\Delta T$  [6].

## 2.6 Rezistorová detekcia

Pre zisťovanie kritickej kolízie sa v tejto metóde využíva odporový film. Táto deštruktívna metóda je prevažne využívaná pre monitorovanie prípadných prirazov plášťa modulov pilotovaných misií. Odporový film slúži ako plošný snímač vhodný na pokrytie väčších plošných rozmerov modulov obývatel'ných vesmírnych štruktúr. Na vnútornej strane plášťa je uchytená izolačná vrstva a na nej odporový film, priraz častice vytvorí elektrický kontakt filmu s kovovým plášťom, čím sa film prevedie do vodivého stavu, a veľkosť meraného prúdu je úmerne závislá na vzdialenosti merného bodu a vzniknutého prirazu.

Rezistorová metóda je jednoduchým a spoľahlivým spôsobom zistenia kritického poškodenia trupu modulu bez potreby zložitej analýzy dát, plošný snímač z odporového filmu pritom nemá žiadnu spotrebu, do momentu vzniku prirazu ním netečie žiaden prúd [6].



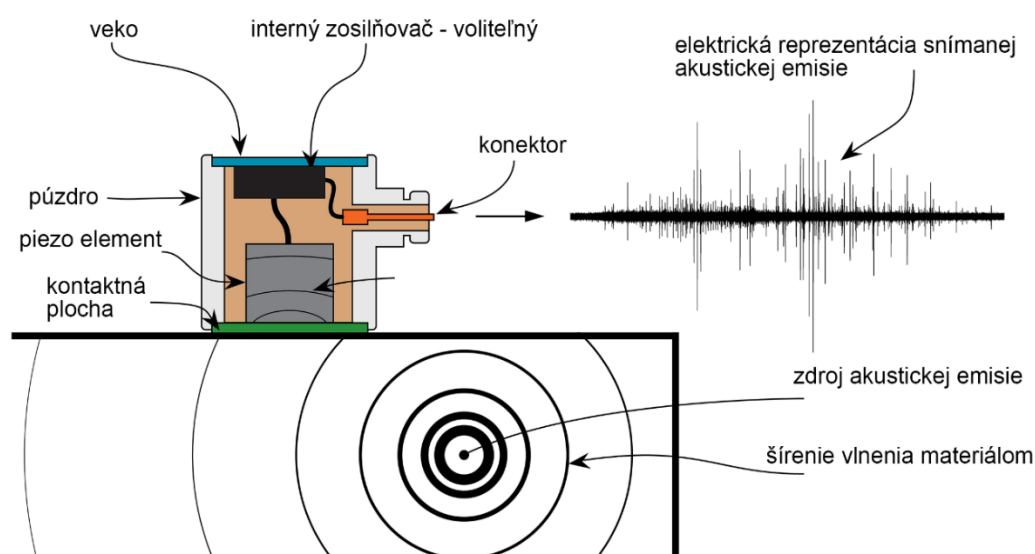
### 3 SENZORY, MENIČE

Na meranie fyzikálnych prejavov kolíznych zrážok a ich následkov na konštrukciu satelitu sa využívajú rôzne druhy a typy snímačov. Nie vždy je schopnosť snímača obmedzená iba na výrobcom zadelené aplikácie, ale mnohokrát sa zistí rozšírené využitie snímača až po experimentovaní a praktických skúškach. Táto kapitola popisuje niekoľko druhov snímačov, z ktorých vhodný typ by bolo možné aplikovať na subsystém CubeSatu pre detekciu HVI. V rámci miniaturizácie moderne elektroniky sa dostali mikro-elektro-mechanické systémy (MEMS) do širokej škály odvetví elektrotechniky, zohrávajú zásadnú úlohu v modernej snímacej technike pre ich malé rozmery a nízku spotrebu energie.

#### 3.1 Piezoelektrický menič pre detekciu AE

Piezoelektrický menič prevádza mechanické vlnenie na elektrické signály využitím piezoelektrického efektu, mechanické deformácie piezokryštálu generujú napätie, ktoré po zesilnení vytvára meraný elektrický signál. V snímacej technike sa typicky aplikuje v monitorovaní akustických emisií a snímaní ultrazvukových vln. Účelom AE senzoru je meranie ultrazvukových vln na povrchu materiálu, ku ktorému je upevnený akusticky dobre vodivým spojivom. Typický operačný frekvenčný rozsah AE senzorov sa pohybuje v rozsahu 20 kHz až 1 MHz, pričom skutočný rozsah frekvenčnej odozvy je ovplyvnený niekoľkými parametrami ako fyzická veľkosť snímača a útlm.

Rezonančné meniče majú vysokú citlivosť v okolí ich rezonančnej frekvencie, kde vytvárajú značne vyššiu amplitúdu napäťového signálu, sú preto vhodné pre aplikácie v ktorých je potrebná najvyššia citlivosť senzoru, ich nelineárna frekvenčná odozva však komplikuje amplitúdovo-frekvenčnú analýzu a môže významne narušiť výsledok merania z dôvodu naopak príliš nízkej citlivosti v určitých frekvenčných pásmach [7].

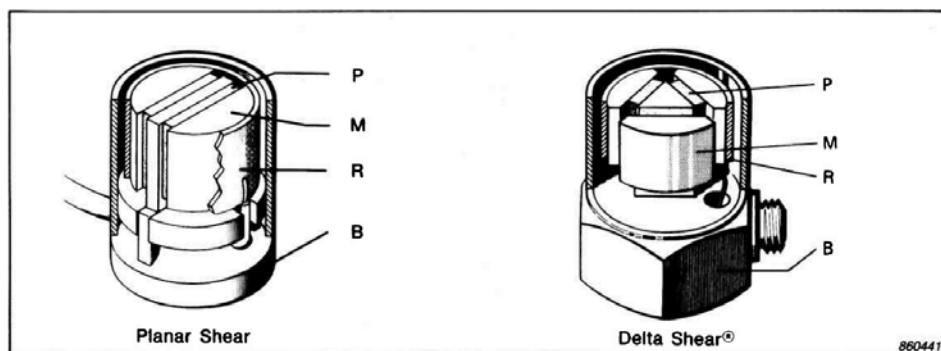


Obr. 3-1: Použitie snímača akustickej emisie a podoba signálu [8]

Na rozdiel od ultrazvukovej defektoskopie snímač AE nemeria akustickú odozvu na signál ktorý sám vyslal, ale vlnenie vyvolané dejom v meranom telese. Vysoký odstup signálu od šumu a citlivosť senzoru je dôležité kritérium pre úspešné vyhodnotenie pôvodu AE signálu a ďalšej HVI analýzy. AE senzory sú dostatočne citlivé na detekciu akustických vln šíriacich sa materiálom, pôvodom od nárazov mikroskopických častíc a prachu do plášťu kozmických telies [6], [7].

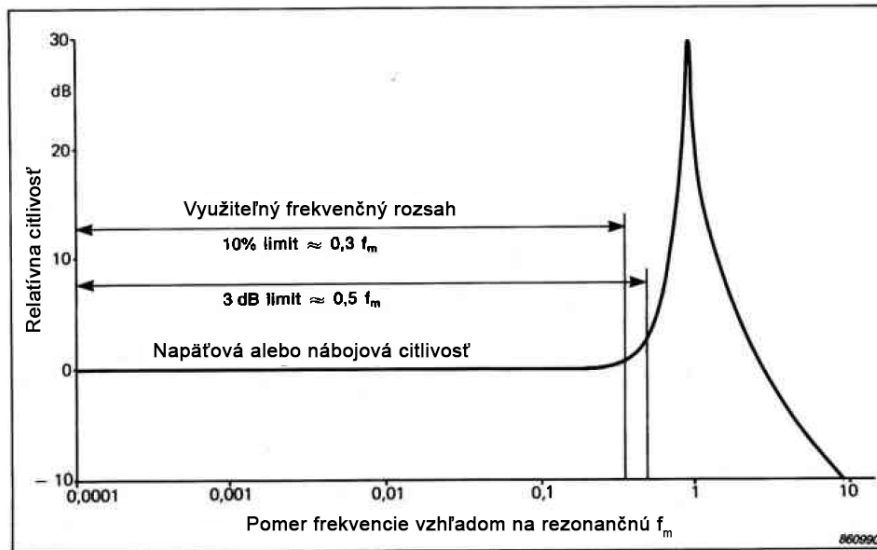
### 3.2 Piezoelektrický akcelerometer

Podobne ako piezoelektrické meniče senzorov akustickej emisie, akcelerometre využívajú piezoelektrický efekt pre konverziu mechanických vibrácií na elektrický signál. Dynamickou deformáciou piezokryštálu sa generuje na protiľahlých okrajoch kryštálu náboj, lineárne úmerný deformačnej sile v širokom frekvenčnom rozsahu. Rýchlosť, ktorou je náboj z kryštálu odoberaný určuje predzosilňovač a tým obmedzuje minimálnu merateľnú frekvenciu. Hlavným rozdielom akcelerometrov je seizmické zotrvačné závažie pripevnené na piezokryštál, ktoré umožňuje snímaču merať reakciu na vibrácie spôsobujúce sily, keďže snímač meria odozvu piezokeramiky s daným koeficientom, a hmotnosť závažia je tiež známa. Rezonančná frekvencia tejto sústavy udáva oblasť, v ktorej končí lineárna frekvenčná odozva daného senzoru a teda hornú hranicu pracovného frekvenčného rozsahu. Každý vnútorný mechanický návrh a senzor má inú rezonančnú frekvenciu a vyžaduje individuálnu kalibračnú krivku [9].



Obr. 3-2: Príklad typu akcelerometrov od firmy Bruel Kjaer [9]

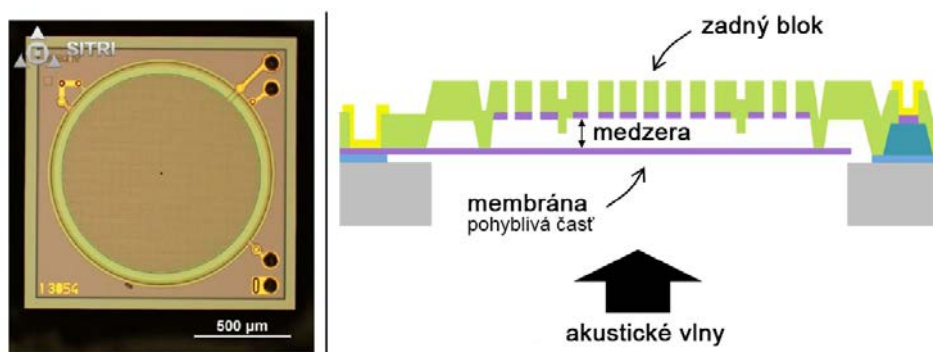
Piezoelektrické akcelerometre sa odlišujú rôznymi usporiadaním závaží a piezokryštáľov, hmotnosťami závaží, typom piezoelektrického elementu a veľkosťou celého senzoru. Akcelerometer má výstup so závitovým konektorom koaxiálneho typu a môže mať integrovaný predzosilňovač napájaný pomocou dvojžilového tieneného vodiča, ktorý sa do konektoru pripojí. Podmienkou pre odčítanie signálu potom je A/D prevodník signálu so zdrojom konštantného prúdu na vstupe pre napájanie integrovaného predzosilňovača senzoru alebo samostatný zdroj prúdu a paralelné meranie dynamickej zmeny napätia s odfiltrovaním jednosmernej zložky napätia kondenzátorom.



Obr. 3-3: Frekvenčný rozsah piezoelektrického akcelerometru [9]

### 3.3 Kapacitný MEMS mikrofón

Mikrofón je akustický menič premieňajúci akustické vlny na elektrický signál. Technológia MEMS umožnila prekonať citlivosť a kvalitu reprodukcie zvuku niektorých klasických malých elektretových kapacitných mikrofónov pri výraznom zmenšení rozmerov a nízkej výrobnéj cene. Kremíkový kapacitný MEMS menič reaguje na akustické vlny rozkmitaním membrány na obrázku 3-4 čím sa mení veľkosť medzery medzi elektródami čím nastáva zmena kapacity variabilného kondenzátora tvoreného membránou a zadnou elektródou. Výstupný odpor takéhoto kondenzátora sa pohybuje v rádoch gigaohmov [10].



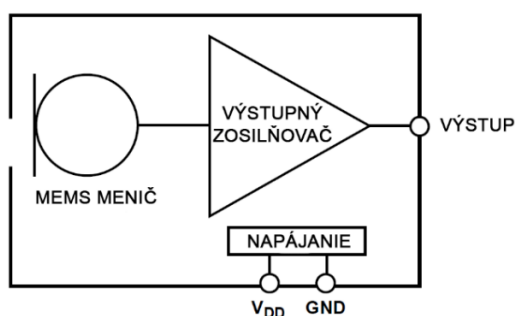
Obr. 3-4: Pohľad zhora na čip (vľavo) a nákres prierezu (vpravo) [11]

MEMS mikrofóny majú obvykle vrchný kovový kryt ako mechanickú ochranu uchytený na dosku plošného spoja, na ktorej je osadený obvod mikrofónu. V samotnom púzdre je otvor nachádzajúci sa v doske alebo v kovovom kryte a slúži na voľné prepúšťanie akustických vln vo vzduchu. V prípade aplikácie takéhoto snímača

na meranie vln šíriacich sa v tuhom telese potreba otvoru odpadá. Mikrofóny sa rozlišujú podľa výstupného signálu na analógové a digitálne, veľkosť digitálnych je pritom výrazne väčšia pre väčší počet výstupných kontaktov a integrovaných obvodov [10].

### 3.3.1 Analógový MEMS mikrofón

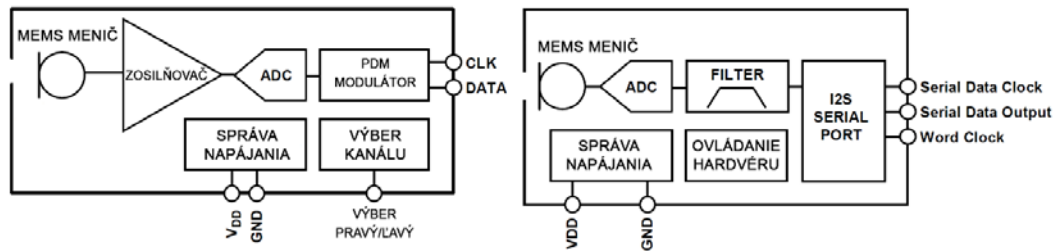
Každý MEMS mikrofón obsahuje okrem čipu meniča aj aplikačne špecifický integrovaný obvod (ASIC), ktorý v prípade analógových mikrofónov tvorí výstupný zosilňovač, blokové schéma je na obrázku 3-5. Analógové MEMS mikrofóny neobsahujú toľko technológií ako digitálne, teda veľkosť ich integrovaného obvodu je menšia a celé púzdro snímača dostáva menšie rozmery. Výstupný odpor analógového mikrofónu je typicky v rozsahu stoviek ohmov. Výstupné napätie je štandardne nastavené v rozsahu napájacieho napätia tak, aby najvyššie amplitúdy neboli obmedzené. Zapojenie ďalšieho člena ako zosilňovača alebo prevodníku na výstup musí byť vedené cez oddeľujúci kondenzátor filtrujúci jednosmernú zložku napätia. Kondenzátor spolu s vstupnou impedanciou pripojovaného člena však nesmie obmedzovať priepusť nízkych frekvencií mikrofónu vytvorením nežiadúcej hornej priepusti a tak obmedziť jeho frekvenčnú odozvu [10].



Obr. 3-5: Blokové schéma analógového MEMS mikrofónu [10]

### 3.3.2 Digitálny MEMS mikrofón

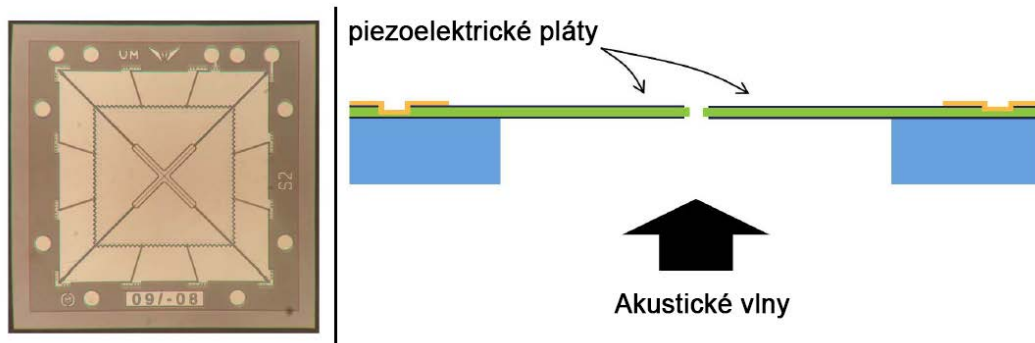
Rozšírením integrovaného ASIC obvodu o analógovo-digitálnu konverziu vznikne mikrofón, ktorý už v základe obsahuje prvotnú fázu spracovania jeho signálu a digitalizácie. Výhoda digitálneho výstupu spočíva nielen v zjednodušení aplikácie takéhoto snímača, ale zároveň výrazne potláča až eliminuje možnosť rušenia analógového signálu meniča rôznymi rádiovými interferenciami z okolitého prostredia, signál z meniča prejde iba minimálnu vzdialenosť pred vstupom do analógovo-digitálneho prevodníku (ADC). Digitálne MEMS mikrofóny majú najčastejšie digitálny výstup vo forme PDM (z angl. Pulse Density Modulation) alebo pomocou rozhrania zbernice I2S (z angl. Inter-IC Sound). Blokové schéma uvedených výstupných variácií je na obrázku 3-6 PDM je najrozšírenejším digitálnym rozhraním pre mikrofóny, vytvára sa 1-bitovým vzorkovaním Sigma-Delta modulátorom na vysokej frekvencii zhruba 1 až 3 MHz. I2S mikrofón obsahuje v ASIC navyše okrem ADC aj pásmový filter a decimálny filter, ktorý zníži vzorkovaciu frekvenciu na audio štandard a zvýši bitové rozlíšenie [10].



Obr. 3-6: Blokové schéma pre digitálny PDM výstup (vľavo) a I2S (vpravo) [10]

### 3.4 Piezoelektrický MEMS mikrofón

Spoločnosť Vesper Technologies uviedla na trh unikátnu technológiu piezoelektrických MEMS mikrofónov a prvý komerčne dostupný model PMM-3738-VM1000-R s analógovým výstupom. Odlišujú sa použitím piezoelektrického meniča v podobe tenkých plátov, ktoré pri mechanickej deformácii akustickými vlnami vytvárajú náboj. Piezoelektrické mikrofóny boli vyvinuté za účelom odolnosti voči extrémnym podmienkam, sú odolné voči vode, prachu, vysokým akustickým tlakom a mechanickým vibráciám. Aj po ponorení do vody si zachovávajú svoju funkčnosť a citlivosť im neznížia ani prudké rázy. Pri klasických kapacitných MEMS mikrofónoch po kontakte s vodou, prachom alebo prudkým nárazom spôsobujúcim priľnutie membrány k zadnej stene sa nenávratne stráca ich citlivosť. Z jednoduchšej konštrukcie piezoelektrických plátov tieto mikrofóny dostávajú vyšší odstup signálu od šumu [11], [13].



Obr. 3-7: Pohľad zhora na čip (vľavo) a náčrt prierezu (vpravo) [11]

## 4 ANALÝZA SIGNÁLOV

Senzorické systémy in situ detekcie HVI dokážu zistiť približné informácie o kolidujúcej častici ako jej hmotnosť, rýchlosť, lokalitu kolízie a kritickosť, teda či došlo k prierazu plášťa a možnému poškodeniu interných systémov satelitu. Nie je však možné zistiť, akým spôsobom boli interné časti zasiahnuté bez inšpekcie ľudskou posádkou alebo po návrate na Zem. V prípade CubeSat systému nie je žiadna inšpekcia možná a preto sa musí operátor vždy rozhodnúť, kedy je satelit považovaný za kriticky poškodený a nepoužiteľný.

V rámci bezpečnosti a prevencie tvorby vesmírneho odpadu by jednotlivé nanosatelity budúcich konštelácií mali dokázať zistiť a ihneď rozoznať kritickú kolíziu s mikrometeoroidom alebo časticou orbitálnych trosiek, pravdepodobne významne znižujúcu ich spoľahlivosť. Po kritickom zásahu je veľmi otáznne, aký čas bude systém satelitu schopný práce, ak moment po zásahu nie je celý satelit zničený. Pre bezpečnosť celej konštelácie by zasiahnutý satelit mohol na základe vlastného úsudku spustiť proces vyradenia svojho telesa z obežnej dráhy do atmosféry elektrostatickým iontovým alebo iným pohonom [6].

### 4.1 Analógovo číslicový prevod

Prvým krokom po získaní elektrickej reprezentácie meraného signálu je digitalizácia tohto signálu a jeho prevedenie do formy, v ktorej je možné ho ďalej spracovať pomocou DSP (z angl. Digital Signal Processor) v tomto prípade FPGA. Na číslicový prevod analógových signálov slúžia analógovo číslicové (A/D) prevodníky. Opačnú operáciu vykonávajú D/A prevodníky, ktoré poskytujú analógový výstup spracovaného signálu z DSP. Prevodník A/D musí vykonať niekoľko operácií než sa dosiahne požadovaného digitálneho výstupu. Základné parametre A/D prevodníkov sú vzorkovacia frekvencia alebo počet vzoriek za sekundu SPS (z angl. samples per second) a počet bitov výstupných hodnôt, teda rozlíšenie.

Vzorkovanie je prevod spojitého analógového signálu na signál časovo diskretný. Vzorkovacia frekvencia udáva počet kvantovaných hodnôt meraného signálu behom jednej sekundy. Kvantovaním sa diskretné vzorky vyjadrujú pomocou čísel konečnej dĺžky, digitalizuje sa hodnota meraného signálu danej vzorky a proces prináša kvantovací šum. Každý A/D prevodník potrebuje presnú napäťovú referenciu, vďaka ktorej dokáže meranú hodnotu analógového signálu komparátor číslicovo vyhodnocovať. Kódovaním sa kvantované vzorky prevedú na binárne čísla kódu.

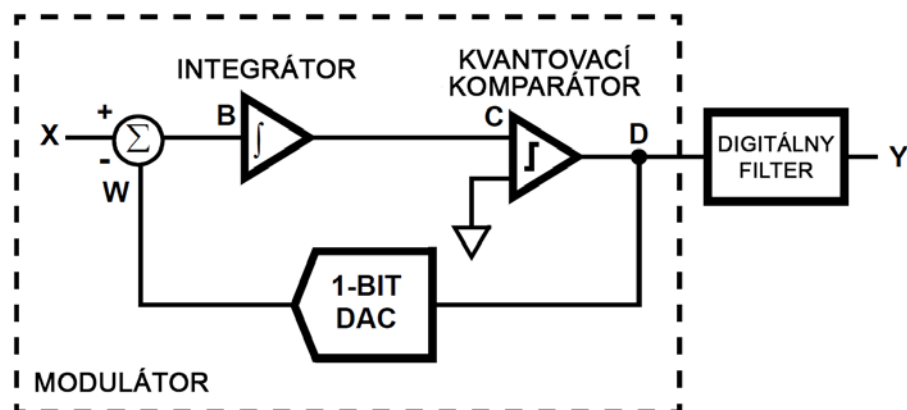
Shannonov teorém tvrdí, že vzorkovacia frekvencia signálu musí byť minimálne dvojnásobná oproti najvyššej frekvencii vzorkovaného signálu. Teda platí  $f_{vz} > 2f_{max}$ . Minimálna frekvencia spĺňajúca podmienku sa nazýva tiež Nyquistova frekvencia. Pri nedodržaní tejto podmienky nastáva prekrývanie susedných spektrálnych zložiek signálu nazývané aliasing, pre kvalitné navzorkovanie signálu potrebné pre ďalšie číslicové spracovanie je vhodné zvoliť  $f_{vz}$  zhruba trojnásobne až päťnásobne. Spektrum signálu je možné obmedziť antialiasingovým frekvenčným filtrom, ktorý vyššie zložky odstráni a zabráni tak prekrývaniu spektrálnych zložiek signálu. Niektoré spôsoby A/D prevodu využívajú prevzorkovanie diskretného signálu, teda zmena počtu vzoriek

už digitalizovaného signálu. Decimácia znižuje vzorkovaciu frekvenciu spolu so zvýšením bitovej hĺbky diskkrétnej hodnoty signálu, naopak interpoláciou sa zvýši počet vzoriek. Podľa vnútornej štruktúry obvodu A/D prevodníku existuje niekoľko druhov, najčastejšie sa používajú Sigma-Delta modulátory, prevodníky s postupnou aproximáciou, integrujúce prevodníky, prevodník napätie-frekvencia a najrýchlejší paralelný prevodník [15], [17].

#### 4.1.1 Sigma Delta modulátor digitálnych MEMS mikrofónov

Sigma delta prevod prvého či druhého stupňa využíva vysokú vzorkovaciu frekvenciu rozsahu s jednobitovým výstupom, čo umožňuje vykonať číslicový prevod určitých signálov bez spektrálneho narušenia aliasingom. Problém nastáva pri vyšších frekvenčných pásmach, kde sa začína prejavovať kvantovací šum zvyčajne eliminovaný filtrom typu dolná priepusť pred decimáciou. Z tohto dôvodu je jednobitová sigma delta modulácia široko využívaná pre digitalizáciu audio signálov, ktorých frekvenčné pásmo bežne končiace v okolí 20 kHz ešte nie je rušené kvantovaním.

Na obrázku 4-1 je blokové schéma sigma delta prevodníku prvého rádu, využívaný často v ASIC obvodoch digitálnych MEMS mikrofónov. Decimácia takéhoto signálu pred ďalším spracovaním musí potom odpovedať Shannonovmu teorému podľa požadovanej kvality v bitoch a využiteľnej šírky pásma pre DSP. Práve mikrofóny s výstupom I2S túto decimáciu ako medzikrok využívajú, nevýhodou je vo väčšine prípadov nemožnosť zmeny ich decimáčného koeficientu u mikrofónov štandardne optimalizovaného pre zdecimované vzorkovanie frekvenciou 44 kHz [16], [17].



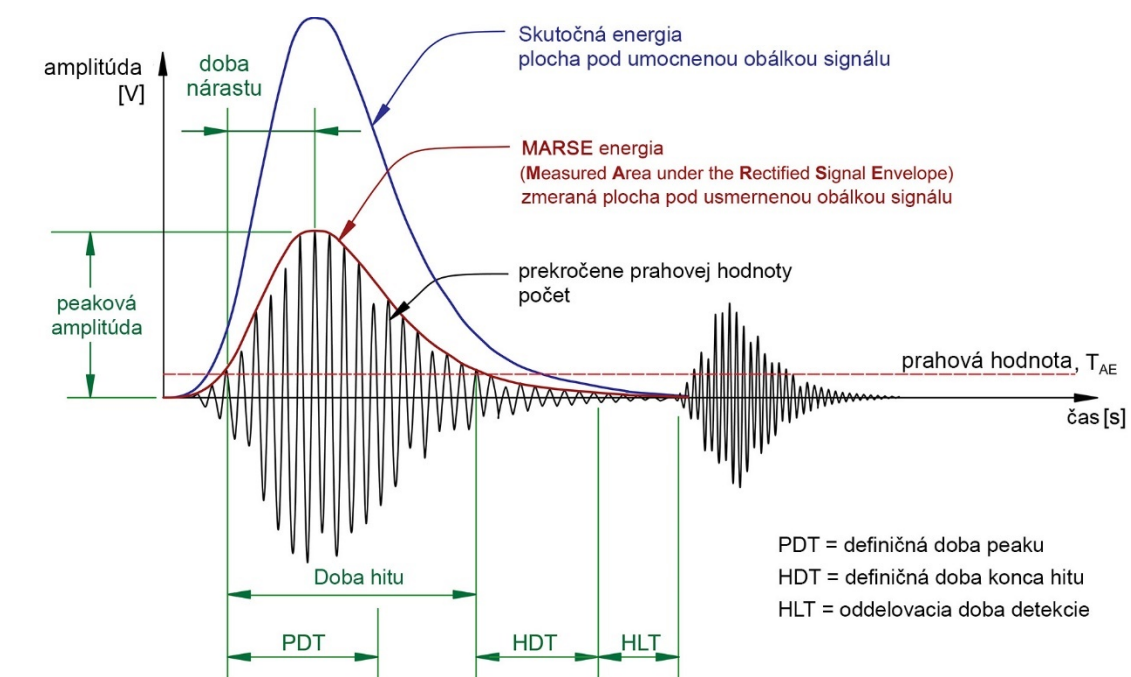
Obr. 4-1: Sigma delta prevodník prvého rádu [16]



## 4.2 Časovo amplitúdová analýza

Kontinuálna analýza a ukladanie dát zo snímačov je výpočtovo a teda energeticky náročná operácia. CubeSat je svojou veľkosťou značne obmedzený v rámci systému napájania, preto je spotreba obvodu HVI detekčného systému významným faktorom pri jeho realizácii. Jednoduchým riešením je stanovenie minimálnej prahovej hodnoty amplitúdy vstupného signálu, pod ktorou sa systém nebude výpočtovo zaťažovať. Prahová hodnota musí byť zvolená dostatočne nad úrovňou šumu aby nedošlo k falošným záznamom. Prekročenie tejto hranice značí nejakú udalosť charakteru nárazovej kolízie a teda sa okamžite spustí záznam, analýza a vyhodnotenie meraných dát.

V defektoskopii pomocou akustickej emisie sa jednotlivý jav, ktorý vyvolá akustickú emisiu nazýva hit. Dôležité pre určenie správnej maximálnej amplitúdy a spektrálnej charakteristiky zmeraného signálu je rozoznanie prvotného hitu od nadbytočne deformovaných transientných odrazov akustických vln v konštrukcii. Záznam je preto v ideálnom prípade nutné obmedziť nie len minimálnou amplitúdou, ale aj maximálnou dĺžkou. Niekoľko základných informácií zistiteľných zo signálu zmeranej akustickej emisie vyvolanej kolíziou popisuje obrázok 4-2, to platí pre signály zo všetkých potenciálne aplikovateľných snímačov.



Obr. 4-2: Popis analýzy transientného priebehu zmeraného signálu AE [8]

Druhá vyššia prahová hodnota by reprezentovala veľkosť amplitúdy, ktorej prekročenie indikuje kritickú kolíziu zrážku, teda pravdepodobný prieraz plášťa satelitu a poškodenie interných komponentov [8], [7].



## 4.3 Spektrálna analýza

Signály sú tvorené spojením viacerých sínusových vlnových signálov rôznych frekvencií. Pre získanie predstavy o zložení meraného signálu je potrebné separovať jeho jednotlivé frekvenčné zložky. Spektrálna analýza prevádza signál z časovej domény do frekvenčnej domény, teda zistí prítomnosť a veľkosť amplitúdy daných frekvenčných zložiek. Na prevod z časovej do frekvenčnej domény slúžia algoritmy Fourierovej analýzy.

Diskrétnymi bodmi definované signály sa analyzujú pomocou Diskrétnej Fourierovej transformácie (DFT). Keďže Fourierova analýza signál rozkladá na zložky sínusových či kosínusových funkcií, ktoré sú na definičnom obore definované od záporného do kladného nekonečna, DFT vyžaduje transformovaný signál v časovej doméne nekonečný. V prípade diskrétneho signálu, ktorý odpovedá záznamu elektrickej reprezentácie HVI je jeho dĺžka v časovej doméne a teda počet vzoriek konečný, algoritmus výpočtu však predpokladá že sa jedná o nekonečný signál s periódou rovnou tomuto konečnému počtu vzoriek záznamu signálu, čím sa získa spektrálna analýza konečného diskrétneho signálu pomocou DFT [19], [15].

### 4.3.1 Rýchla Fourierova Transformácia

Efektívne algoritmy výpočtu DFT sa nazývajú rýchla Fourierova transformácia (FFT). Táto varianta transformácie namiesto počítania s goniometrickými funkciami postupne rozdeľuje vstupnú postupnosť vzoriek na polovice pokým sa nedosiahnu diely s jednotkovou dĺžkou. Algoritmus FFT teda pre svoju efektivitu vyžaduje  $2N$  vzoriek, spektrum má symetriu zhruba vo svojej polovici, výpočet spektra pre  $N/2$  zložiek tak potrebuje potrebuje  $N \cdot \log_2 N$  operácií. Oproti priamej DFT táto metóda výrazne znižuje počet operácií, čím umožňuje vykonávať spektrálnu analýzu v reálnom čase, výrazne zjednodušuje a urýchľuje transformáciu diskrétnych signálov s veľkým počtom vzoriek, ako tomu tak je pri spektrálnej analýze signálov vzorkovaných rýchlosťami v MSPS [19], [17].

## 5 VÝPOČETNÁ TECHNIKA CUBESATU

Cieľom tejto práce je poskytnúť návrh dedikovaného systému detekcie HVI. V prípade CubeSatu je dostupný priestor a maximálna hmotnosť pre merací aparát zásadným obmedzením, preto je na detekciu HVI vhodné zvážiť už integrované senzory v ostatných systémoch satelitu. Akcelerometer je typický príklad štandardnej sensoriky nanosatelitov. Základ nízkej spotreby energie detekčného systému je ukrytý v jeho nečinnosti, pokiaľ nemá čo analyzovať. Pri prekročení nastaviteľnej prahovej hodnoty zmeny vstupného signálu sa obvod so záznamom s minimálnym oneskorením spustí, zachytí udalosť a zanalyzuje charakteristiky ako amplitúdu, čas udalosti, významné zložky spektra a potenciálnu kritickosť.

Nedokonalosť systému detekcie kolízií môže byť v praxi doplnená diagnostikou funkčnosti letových systémov a komponentov. V prípade poškodenia hardvéru zrážkou sa náhle alebo postupne zmenia hodnoty známych parametrov, napríklad spotreba, teplota, zastavenie toku dát niektorého systému až úplná strata komunikácie. Takýto jav alebo priama detekcia HVI indikuje vysokú pravdepodobnosť poškodenia kolíziou, následne je potrebné vykonať diagnostický test celého systému. Satelitné systémy často obsahujú diagnostické obvody, ktoré zisťujú poruchy a stav komponentov za chodu [6].

### 5.1 Mikrokontroléry a FPGA v nanosatelitoch

Každý satelit obsahuje palubný počítač, ktorý spravuje základné operácie potrebné pre funkciu satelitného systému. V prípade CubeSatov ich konštrukcia znemožňuje kvalitné radiačné, elektromagnetické a tepelné tienie a preto sú vnútorné komponenty odkázané na svoju vlastnú radiačnú a odolnosť. Palubný počítač satelitu, napríklad mikrokontrolér je obvykle sledovaný zariadením zvaným watchdog monitorujúcim funkčnosť a prípadné poruchy v dôsledku radiácie alebo iných príčin. Zásah vysoko energetickej častice do štruktúry kremíkového čipu alebo pamäťovej jednotky môže spôsobiť vodivosť polovodičových štruktúr či zmenu hodnoty bitu. Oba javy majú negatívne či devastujúce následky na práceschopnosť zasiahnutého komponentu.

Mikrokontroléry ako vhodné prostriedky pre základ palubného počítača sú vyrábané aj v radiačne odolných verziách, čo sa odzrkadľuje na ich cene. Moderné mikrokontroléry majú vysoký výkon pri malej spotrebe a v kombinácii s radiačnou odolnosťou často tvoria výpočtové a riadiace jadro satelitného systému. S dostatočným výkonom slúži aj ako DSP pre subsystémy a vedecké experimenty, pokiaľ na túto úlohu nie je dedikovaný iný mikrokontrolér, ASIC alebo FPGA [20].

### 5.1.1 Využitie FPGA pre vesmírne aplikácie

Programovateľné hradlové polia fungujú ako konfigurovateľné pole polovodičových prepojení a logických modulov. S technologickým pokrokom a postupným zmenšovaním veľkosti polovodičových štruktúr podľa Mooreovho zákona sa stále zvyšuje celkový počet konfigurovateľných brán na jedno FPGA zároveň so znižovaním spotreby.

Výhoda FPGA oproti klasickým procesorom spočíva v možnosti zmeny hardvérovej štruktúry čipu podľa požadovaných výpočtových operácií, čím sa dosiahne vysokej efektivity spracovávania dát v porovnaní so softvérovým riešením v procesoroch. Aj napriek bežne nižšej pracovnej frekvencií oproti mikroprocesorom dokáže FPGA pri nižšej spotrebe niekoľkonásobne rýchlejšie spracovať veľké objemy dát, napríklad z kamier, snímačov a komunikačných prostriedkov. Tento krok spracovania a kompresie dát je častokrát nevyhnutný pred odosielaním snímok, dát z experimentov a telemetrie na pozemské riadiace stredisko, obzvlášť pre malé satelity.

Schopnosť rýchleho spracovávania dát nachádza v satelitoch široké uplatnenie a preto je programovateľným hradlovým poliam venovaná veľká pozornosť vesmírneho priemyslu. Každé nové FPGA hlavných výrobcov ako Xilinx, Altera alebo Actel uvedené na trh podstupuje komunitou návrhárov letového hardvéru testy odolnosti voči radiácií a ďalším podmienkam pre lety do vesmíru, tieto dáta sa potom ukladajú do rôznych databáz.

Vysoká cena radiačne odolných vyšších modelov FPGA výpočtových modulov pre CubeSaty sa dá riešiť kombináciou radiačne odolného mikrokontroléru, ktorý kontroluje a konfiguruje komerčne dostupný model FPGA z konfiguračnej pamäte, čím zabezpečuje obnovenie funkčnosti v prípade poruchy. Inak sa FPGA často aplikuje ako palubný DSP pre rôzne časti satelitného systému, ktoré produkujú či spracúvajú veľké objemy dát [23].

## 6 BUDENIE MECHANICKÉHO VLNENIA

Táto kapitola popisuje jednotlivé testované experimentálne metódy budenia vibrácií a mechanického vlnenia materiálu na účely simulácie akustickej emisie z nárazu mikroskopickej častice do konštrukcie satelitu.

Na snímkoch signálov značí kanál 1 (modrá) vždy signál meraný snímačom a kanál 2 (fialová) priebeh napájacieho napät'ového pulzu, ak nie je uvedené inak.

### 6.1 Elektromechanický vibračný stôl a reproduktory

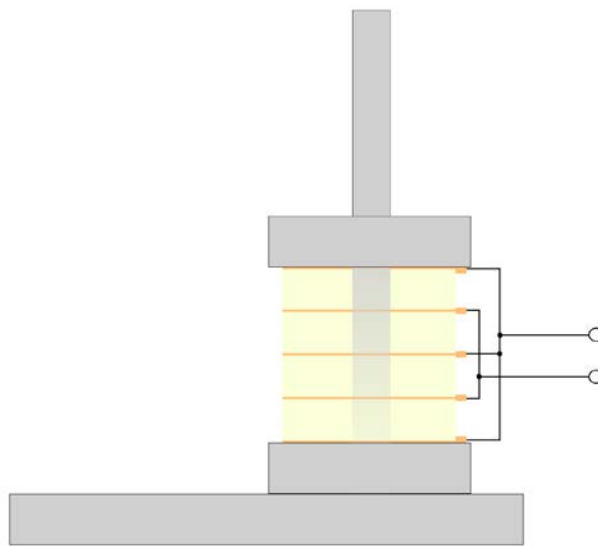
Vibračný stôl je štandardný prostriedok využívaný pri testovaní odolnosti komponentov a predmetov voči harmonickým a dlhotrvajúcim vibráciám. Pre veľkú zotrvačnosť danú hmotnosťou vibračného aparátu, výrazné amplitúdy a teda nízke pracovné frekvencie nebol tento prostriedok vhodný pre simuláciu typickej odozvy materiálu na náraz častice minimálnych rozmerov a vysokej rýchlosti.

Nasledovalo testovanie reproduktora, zariadenia založeného taktiež na princípe elektromagnetizmu, ale s nízkou hmotnosťou pohyblivej časti. Umožňuje tak dosiahnutie vyšších frekvencií. Reprodukory menších rozmerov sa používajú v hornom pásme audio frekvencií pretože dokážu dobre dynamicky reagovať na prudké zmeny prúdu cievkou. Pulzné napájanie reproduktorov rôznych impedancií a rozmerov ukázalo vo všetkých prípadoch nedostatočne rýchlu odozvu. Pri náhlych napät'ových zmenách vyvolávajú prechodné deje v cievke reproduktora negatívne efekty ako indukcia šumu v okolitých vodičoch. Mechanická dynamická odozva neposkytovala požadované výsledky a spolu s rušením viedla k upusteniu od elektromagnetického princípu.

### 6.2 Piezoelektrický aktuátor

Zámer ďalších pokusov spočíval vo využití piezoelektrického javu v podobe elektromechanického meniča, teda aktuátoru pre vybudenie mechanických vln a overovanie frekvenčnej odozvy snímačov.

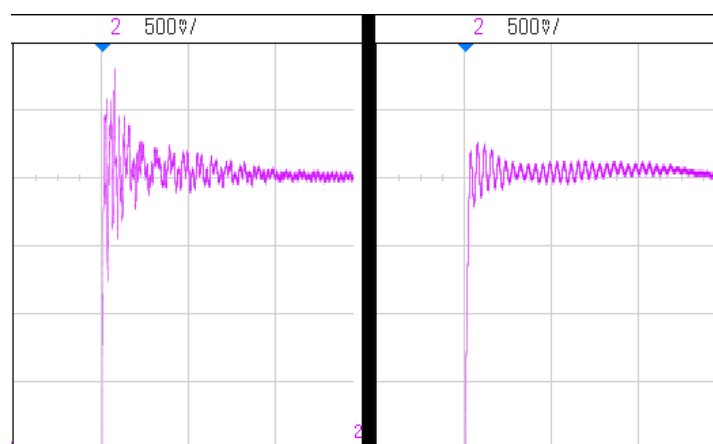
K dispozícii sa naskytol menič obsahujúci štyri samostatné piezokeramické kotúče so striebornými elektródami spojené kaptonovou páskou, medzi jednotlivými členmi bola umiestnená kontaktná plocha z medennej fólie z ktorej boli vyvedené vodiče napájania. Celok bol stlačený hliníkovými kruhmi naskrutkovanými na závitovej tyči upevnenej na podstavci. K tomuto prostriedku vymontovaného z iného zariadenia bol tiež napájací zosilňovač, ktorý sa však po mnohých neúspešných meraniach a opravách kaptonovej izolácie piezokeramických prvkov od vodivej konštrukcie preukázal ako nefunkčný. Všetky ďalšie merania boli teda napájané priamo funkčným generátorom.



Obr 6-1: Štvorstupňový piezokeramický aktuátor

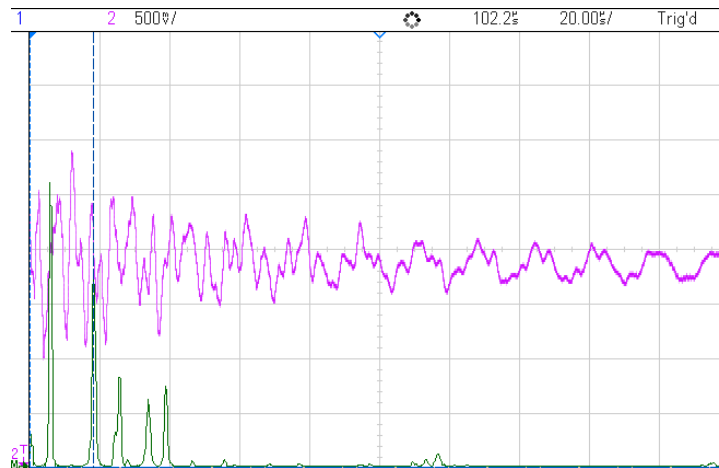
Aktuátor fungoval aj pri priamom napojení na funkčný generátor s maximálnym výstupným napätím  $20 V_{p-p}$ . Zistilo sa, že aj pri odizolovaní elektród keramiky od nosnej konštrukcie sa pri sínusovom napájaní na vodivej konštrukcii indukuje napätie o hodnote približne  $4,5 V$ , teleso a závitová tyč tak fungovalo ako anténa a rušivý signál sa objavil aj na prívodných vodičoch snímačov umiestnených na konštrukcii. Vodivé predmety ktoré sú v mechanickom kontakte so snímačmi je pri meraniach vhodné uzemniť.

Nasledujúci obrázok 6-2 zobrazuje vlastnú mechanickú odozvu na zmenu napätia meranú v napájacích vodičoch piezoaktuátora štvorstupňového (vľavo) a tenkého diskového (vpravo).



Obr. 6-2: Vlastná mechanická odozva rôznych piezoaktuátorov.

Na obrázku 6-3 je detail signálu z 4-stupňového aktuátora bez prítlaku, hlavné frekvenčné zložky odpovedajú bežným rezonančným frekvenciám piezokeramiky s maximom pri 60 kHz a 180 kHz. Toto vlnenie je deformačne vybudené taktiež v nosníku ktorý je v kontakte s aktuátorom, tým vzniká zdroj pre meranie odozvy snímačov.



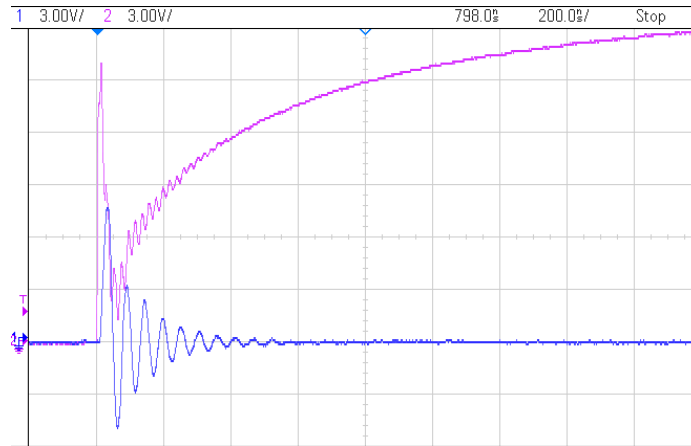
Obr. 6-3: Vlastná odozva štvorstupňového piezoaktuátora

Zistilo sa že vlastnú odozvu je možné takto výrazne zmerať keď je piezokeramika na voľno, nestlačená štvorstupňový piezoaktuátor nebol ďalej využívaný, prostý diskový piezoaktuátor budil podobné mechanické vlnenie bez natoľko výrazného rušenia. Pre jednoduchosť montáže diskového aktuátora sa stal primárnym mechanickým budičom.

### 6.3 Napájanie diskového piezoaktuátora

Ako napájací prvok slúžil funkčný generátor Sigilent SDG6022X. Než začali merania snímačov, bolo nevyhnutné hlbšie preskúmať správanie sa piezokeramického aktuátora, aké mechanické kmity generuje a v akých frekvenčných oblastiach sa vlny pohybujú.

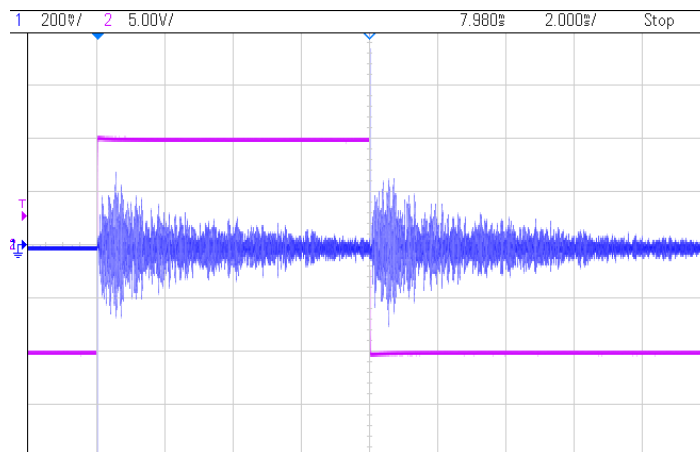
Štandardne sa na zistenie odozvy systému používa ako vstupný signál Diracov impulz. Pri napájaní piezokeramiky veľmi krátkym pulzom v rozsahu nanosekúnd vznikol problém, pretože piezomateriál reaguje na nástupnú aj zostupnú hranu, vlastnou kapacitou hrany deformuje a vo výsledku vzniká chaotické vlnenie jak mechanické materiálom tak elektrické rušenie v signálových vodičoch. Na obrázku 6-4 je priebeh nábežnej hrany napájania a kanál 1 je pripojený na nosník elektricky v kontakte so zápornou elektródou aktuátora. Piezoelement reaguje takmer okamžite a priebeh má logaritmický charakter. Oscilácie sa pohybujú v oblasti 18 MHz.



Obr. 6-4: Zákmyty a oscilácie počas nábehu napätia.

Prechodné deje a oscilácie pri nábežnej hrane 2 ns vyvolané kombináciou limitnej hodnoty generátoru, indukčnosti koaxiálnych vodičov a vodičov vedúcich k piezoelektrickému meniču, ten k prechodným dejom prispieva vlastnou kapacitou a spätnou odozvou, teda generuje napätie z vlastných deformačných kmitov a rezonancie. Doba nábežnej hrany bola následne ustanovená na 120 ns, pri tejto hodnote pokleslo rušenie na optimálnu úroveň a ďalej už nijak výrazne neklesalo.

Obrázok 6-5 zobrazuje pulz dostatočnej šírky, 8 ms, aby boli rozoznateľné dva samostatné akustické hity z nábežnej a zostupnej hrany zachytené piezokeramickým diskovým snímačom na nosníku. Charakter priebehu zachyteného signálu zjavne vykazuje niekoľko zakomponovaných odrazov, pretože toto meranie bolo vykonané na nosníku tvaru U s hrúbkou steny 2 mm, dĺžkou 43,5 cm a šírkou 4 cm.



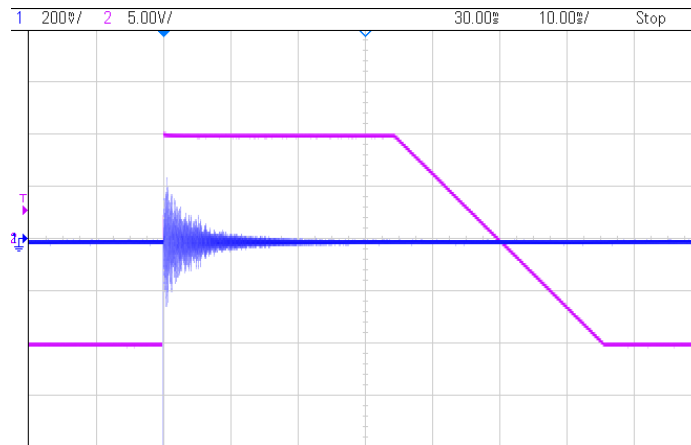
Obr. 6-5: Vybudené vlnenie na nábežnú a zostupnú hranu

Pri krátkej šírke pulzu sa vlnenia prekryjú. Vybudené vlnenie je pritom pri poklese napätia oproti nábehu invertované, pretože keramika sa deformuje opačným smerom. Príveľmi krátky impulz z generátoru spôsobí vzájomné prekrytie týchto vlnení,

interferenciou potom vznikne nevhodný a neurčitý signál so skresleným frekvenčným spektrom. Tento jav je však možné využiť na vytvorenie rôznych požadovaných frekvenčných charakteristík mechanického vlnenia vzniknutého interferenciou.

Na základe prechádzajúceho zistenia bola šírka pulzu nastavená na 50 ms a zostupná hrana na 25 ms. Napät'ový skok ostáva pre všetky merania 20 V a nábežná hrana 120 ns. Obrázok 6-6 zobrazuje výsledný tvar pulzu pre ďalšie merania. Do príchodu nového pulzu musia zákmity a odrazy vlnenia ustáť. Zostupná hrana generátoru musí byť jemná aby nevyvolávala zmeny v piezokeramike.

Výhody piezoelektrického budenia mechanických vln spočíva v opakovateľnosti a dynamickosti periódy jednotlivých pulzov, takže je možné odozvu snímača, uchytenie a ostatné faktory aktívne a plynule upravovať pri perióde samostatných vlnení napríklad 100 ms.

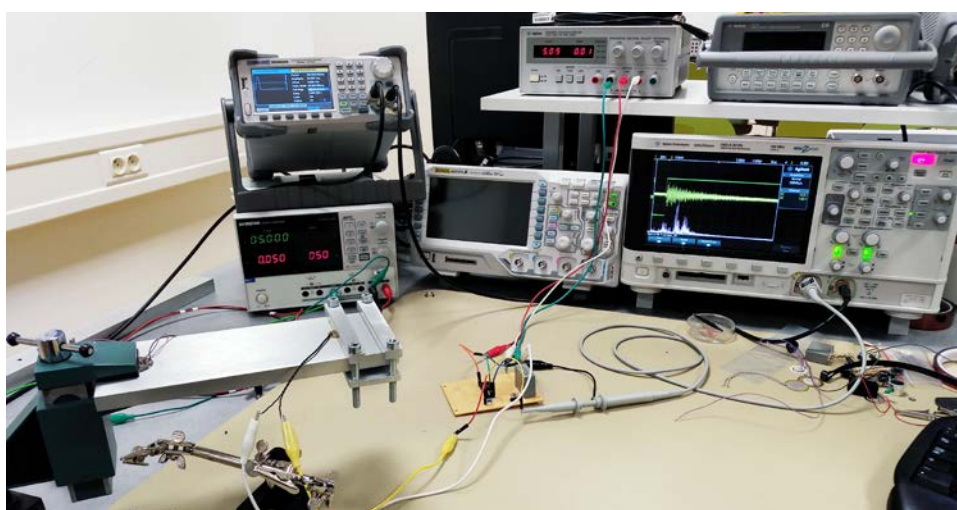


Obr. 6-6: Finálna verzia tvaru napájacieho napät'ového pulzu a odozva

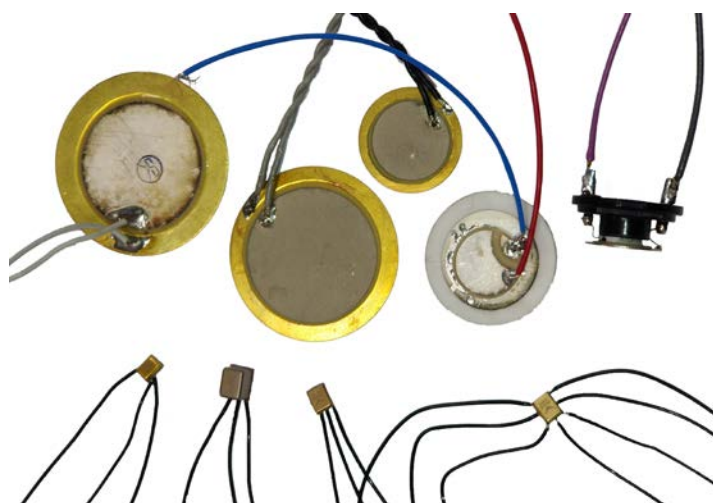


## 7 MERANIE AKUSTICKÝCH PULZOV

Nasledujúca časť práce popisuje použité snímače a výsledky ktoré s nimi boli dosiahnuté. Akcelerometre boli po niekoľkých meraniach a úvahách z experimentov vylúčené, pretože sú určené na meranie vibrácií a vyšších kmitavých amplitúd a nie sú schopné zachytiť jemné povrchové vlnenie vysokých frekvencií vyvolané veľmi malými časticami prachu. Nevyklučuje sa však možnosť, že palubné akcelerometre satelitov nezachytia dáta pri silnejšej kolízii, obzvlášť pri väčších satelitoch, ktoré by takýto náraz kompletne nezničil. Použitý bol analógový MEMS akcelerometer Analog Devices ADXL350. Ďalšie časti kapitoly popisujú zosilňovač signálu a ostatné snímače.



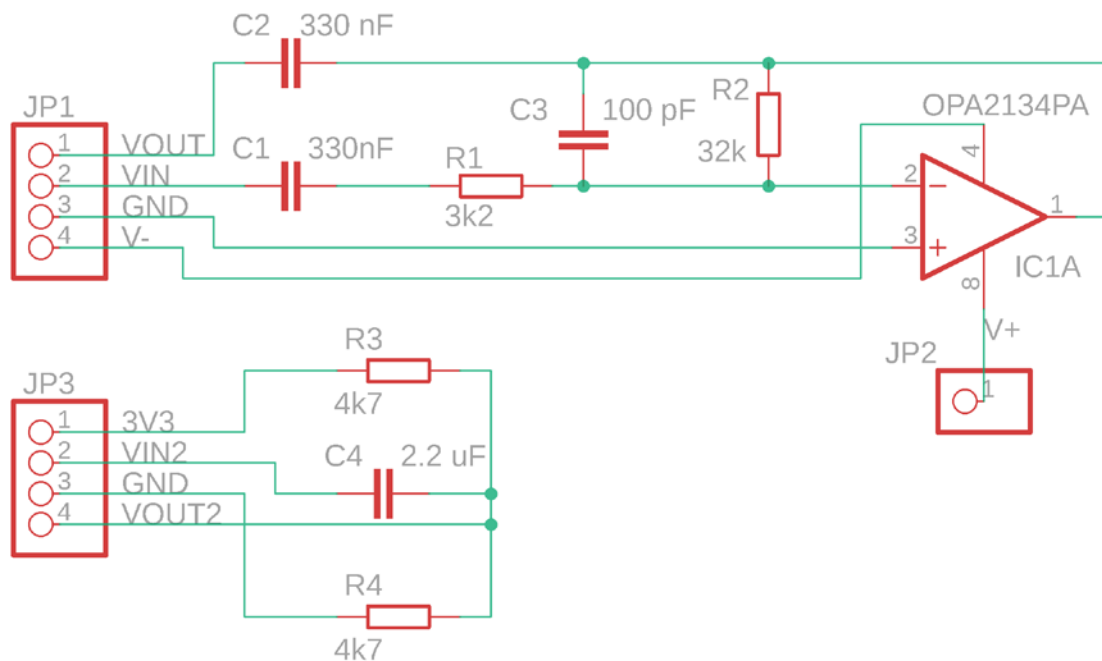
Obr 7-1: Meracie pracovisko, zostava s budeným nosníkom a prítlakom snímača



Obr. 7-2: Snímok väčšiny použitých snímačov s výnimou piezofólií

## 7.1 Operačný zosilňovač OPA2134PA

Nedostatočná úroveň výstupného signálu zo snímačov pri slabých amplitúdach akustického vlnenia viedla k výrobe obvodu invertujúceho zosilňovača na prototypovom pájacom poli. Všetky merania, ak nie je uvedené inak, boli vykonané s použitím tohoto obvodu pri zosilnení -10 a osciloskopu Agilent (Keysight) Technologies model DSO-X 3012A a s hliníkovým nosníkom rozmerov 22 x 8 x 1,2 cm (dĺžka x šírka x hrúbka). Frekvenčné charakteristiky majú rozsah 0 Hz až 500kHz s definovaným stredovým bodom v hodnote 250 kHz. Bol zvolený integrovaný obvod dvojkanálového zosilňovača Burr-Brown OPA2134PA pre jeho dostupnosť a dobré vlastnosti v oblasti frekvenčného rozsahu a šumu. Prvotný návrh bol testovaný na kontaktnom poli, čo umožňovalo dynamicky meniť a prakticky určiť vhodné zosilnenie pre daný operačný zosilňovač tak, aby neobmedzovalo merané frekvenčné pásmo do 200 kHz a tým negatívne neovplyvňovalo získané informácie.



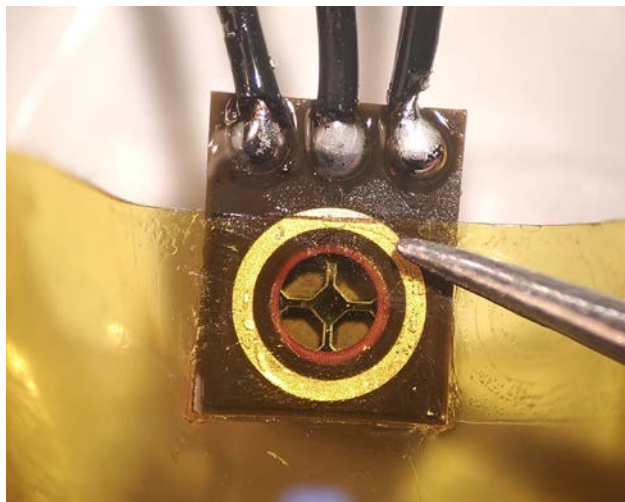
Obr. 7-3: Schéma zapojenia obvodu zosilňovača a napät'ového offsetu

Na obrázku 7-3 je pod obvodom samotného zosilňovača v schéme doplnený napät'ový offset, vytvorený pre operačný zosilňovač vývojovej dosky FPGA Spartan-3E.

## 7.2 Mikrofóny MEMS

Pre účely meraní boli vybrané vyššie modeli výhradne analógových kapacitných mikrofónov od nasledujúcich výrobcov, TDK InvenSense ICS-40730, TDK ICS-40212, Knowles SPH-0611LR5H-1. Ďalej bola pozornosť venovaná piezoelektrickým MEMS mikrofónom od firmy Vesper Technologies VM1000R a úplne novému modelu VM1010R.

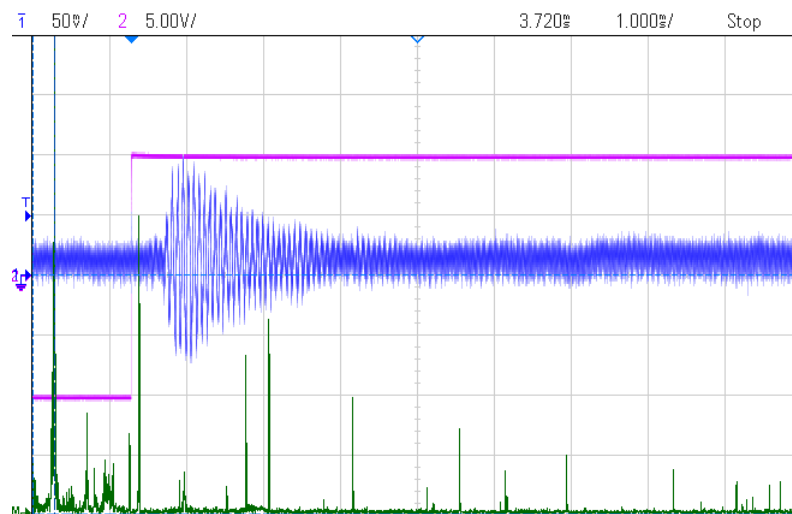
Všetky MEMS mikrofóny boli určené na povrchovú montáž na dosku plošných spojov, ako riešenie konektivity bol použitý veľmi tenký vodič napájaný na kontaktné plochy snímača pod mikroskopom. Pri takomto pájaní otvorených MEMS mikrofónov je nevyhnutné dbať na izoláciu otvoru pred kremíkovými membránami napríklad kaptonovou páskou tak, aby lepiaca hmota prekryvala otvor s dostatočným presahom a neobsahovala vzduchové cesty k otvoru, ako na obrázku 7-4. V opačnom prípade sa tavidlo kapilárne dostane do otvoru a jeho výpary skondenzujú na povrchu membrány. Pri väčšej kontaminácii membrány tavidlom môže byť následok zmena citlivosti snímača a hmotnosti membrány.



Obr. 7-4: Izolácia otvoru membrány kaptonovou páskou (TDK ICS-40730)

Mikrofóny MEMS dokážu nelineárne zachytiť aj frekvenčné pásmo generované mechanickým pulzom v oblasti ultrazvuku, najlepšie v tomto smere fungovali podľa očakávaní piezoelektrické mikrofóny od Vesper. Zdanlivý úspech bol vyvrátený pri zmenách prítlaku snímača k nosníku, zvyšovanie kontaktu viedlo k uzatvoreniu prístupu vzduchom šíriacich sa vln do otvoru a kontaktne mechanicky prenesené vibrácie nevytvárali u snímača dostatočnú odozvu, signál sa pohyboval na úrovni šumu. Plánované meranie zmeny citlivosti snímača vo vákuu pre tento účel stratil význam a nebolo vykonané, v budúcnosti je však možný návrat k bližšiemu porozumeniu problematiky.

Pod mikroskopom sa ukázalo, že mikrofón VM-1010R sa od prvého modelu VM1000 a VM1000R vyznačuje vyšším počtom piezoelektrických lamíel, na rozdiel od štvorlamelového pyramídového dizajnu predchodcov. Mikrofóny reagovali na ultrazvukové pásmo približne do 70 kHz, nevyžadovali k tomu byť v kontakte s budeným nosníkom, ale táto informácia môže byť užitočná pre iné aplikácie, ďalej je priložený obrázok 7-5 signálu z VM1010R voľne položeného na nosníku. Maximá vo vyššej frekvenčnej charakteristike reprezentujú neznámy šum prítomný pri aktívnom stave ASIC obvodu mikrofónu.



Obr. 7-5: Meraný signál z VM1000R a spektrálne zložky šumu

### 7.3 Piezofólie PVDF

V rámci experimentov boli merané piezofólie firmy Parallax model Vibra Tab a firmy Pro-Wave Electronics model FS-2513P. Piezoelektrický materiál bol pri výrobe nanosený na substrát z nadmerne tuhého a neohybného materiálu, následne snímač pri meraní akustických povrchových vln signál vykazoval oproti ostatným snímačom nízke amplitúdy a nedostatočný frekvenčný rozsah, to znamená že snímač odfiltroval vyššie frekvenčné zložky pravdepodobne útlmom substrátu. Tenší substrát alebo voľba iného materiálu by v tomto prípade pravdepodobne priniesol lepšiu citlivosť.

Ako ďalší argument nevhodnosti meraných fólií pre vesmírne aplikácie je fakt, že PVDF technológia je teplotne obmedzená do približne 70 °C až 100 °C, kedy stráca piezoelektrické vlastnosti.

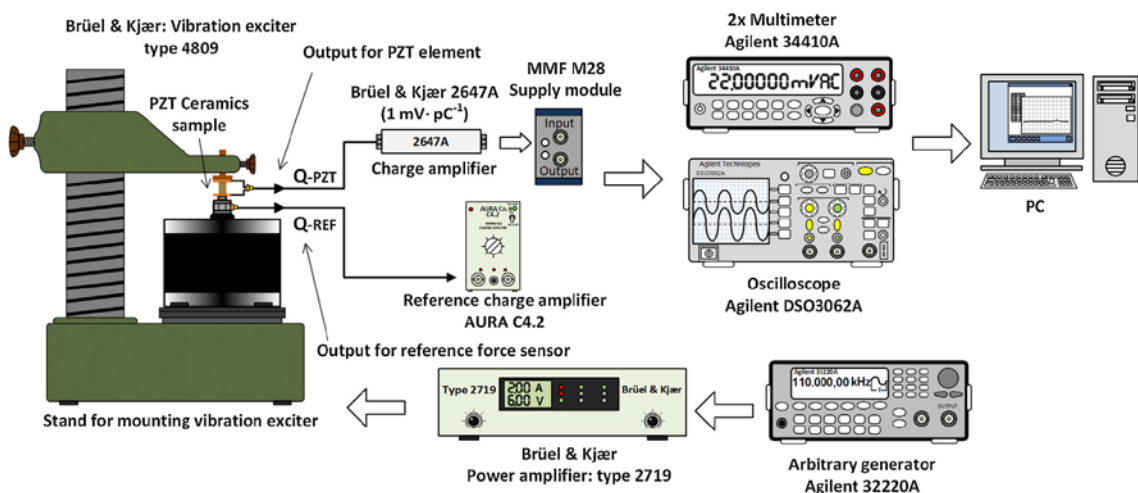
## 7.4 Piezoelektrické disky

Piezokeramické disky sa štandardne využívajú ako akustický generátor pre účely signalizácie určitým tónom. Piezoelektrický materiál s pokovením elektródami sa lepí na tenký kovový disk tvoriaci nosné telo a zároveň elektrický kontakt jednej elektródy. Princíp reverznej funkcie v podobe aktívneho snímača je v podstate identický s akustickými snímačmi, ktoré navyše obsahujú tlmiacu hmotu eliminujúcu vlastné odrazy a kovové púzdro. Na meranie bolo použitých niekoľko dostupných vzoriek diskov s neznámymi, ale odlišnými koeficientmi a vlastnosťami piezokeramiky.

### 7.4.1 Meranie vlastností piezoelektrických diskov

Vlastnosti keramických diskov, ktoré sú významné pre meranie v tejto práci sú nábojový koeficient a rezonančná frekvencia. Na jednej vzorke bola overená metóda zisťovania týchto vlastností, bližšie popísaná v článku [28].

Meranie odozvy disku v zapojení ako snímača sily sa dá zistiť nábojový koeficient vzhľadom k pôsobiacej sile. Obrázok 7-6 znázorňuje zapojenie meracej aparatury a nábojových zosilňovačov. Základným prvkom je vibračný stôl ktorý sa dotýka piezokeramického disku upevneného o pevný statický bod. Vibračný stôl pri harmonických výchylkách bodovo pôsobí na disk určitou silou danou napájacím prúdom cievok. Náboj generovaný diskom je meraný a pri známej pôsobiacej sile je definovaný nábojový koeficient. U meranej vzorky bol zmeraný koeficient  $250 \text{ pC} / \text{N}$ . Čím vyššia hodnota koeficientu, tým vhodnejšia je vzorka pre meranie jemných vlnení, zároveň sa takto dá potom skombinovať viacero snímačov s rovnakými koeficientmi pre priestorové rozloženie. Pomocou impedančného analyzátoru HP 4294A bola dodatočne zmeraná radiálna rezonančná frekvencia vzorky v oblasti 110 kHz.

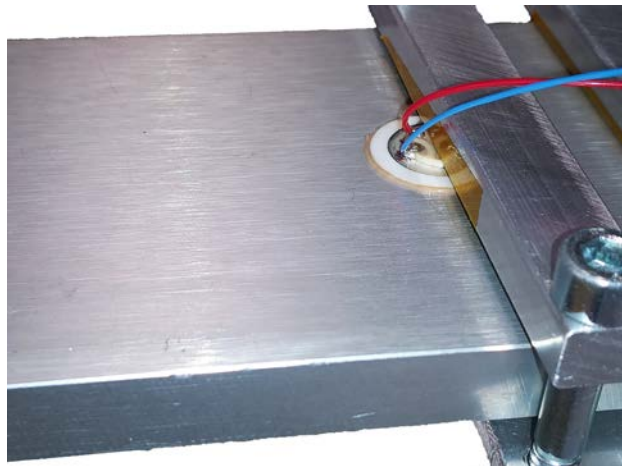


Obr. 7-6: Zostava na meranie nábojového koeficientu metódou priameho merania náboja [28].

## 7.4.2 Piezokeramický disk s korundovým substrátom

Snímač na Obr. 7-7 sa stal hlavným referenčným objektom meraní pretože dosahoval vysokú citlivosť a hlavne frekvenčný rozsah zachytených vlnení oproti ostatným meraným vzorkám. Lepšia frekvenčná odozva je pravdepodobne spôsobená keramickým substrátom, navyše jeho keramika je v porovnaní s ostatnými vzorkami hrubšia a kvalitnejšia.

Na snímku je tiež znateľný prebytok akustického pojiva ZGT 50472 od výrobcu Krautkramer, využívaného pri montáži snímačov.



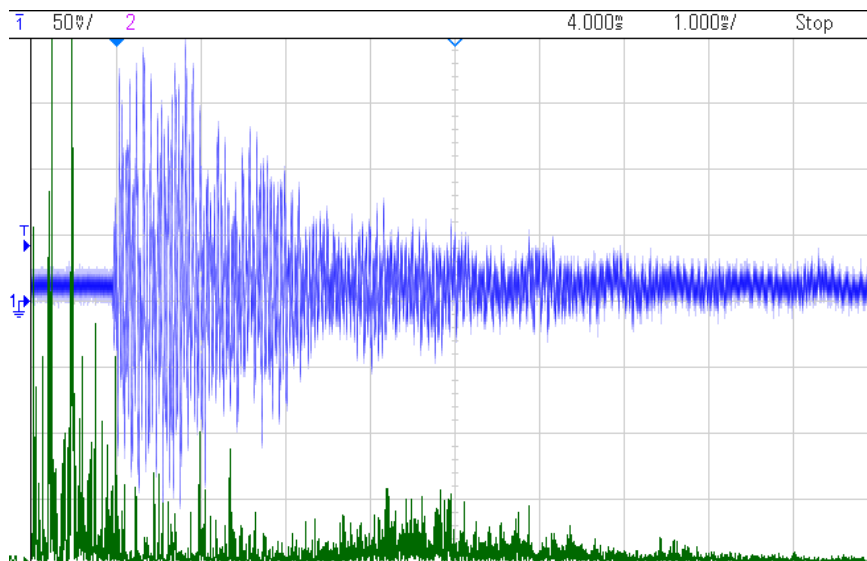
Obr. 7-7: Uchytenie snímača na nosník

Mechanické vlnenie budené na strane uchytenia piezoaktuátora je amplitúdovo aj frekvenčne porovnateľné s tými, ktoré boli zachytené protiľahlej strane nosníku. Presné porovnanie nie je možné z dôvodu chyby pri zmene uchytenia snímača.

To znamená že náraz častice vybudí signál merateľný na vnútornej strane konštrukcie či plášťa satelitu. Pri prieraze sa mechanické vlnenie šíri vo všetkých rovinách rovnako.

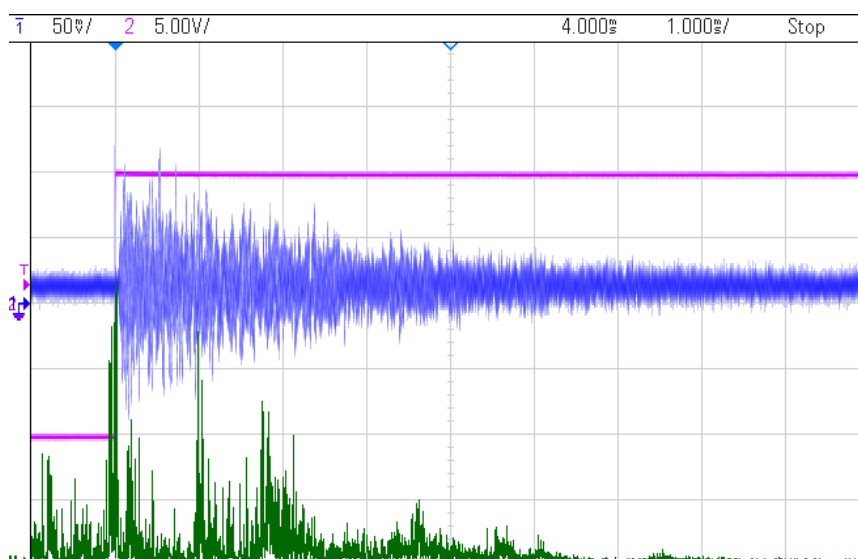
Hsu-Nielsenovým zdrojom bol otestovaný frekvenčný rozsah vlnenia zachyteného keramickým snímačom. Pentest zlomením tuhy generuje zhruba 50% vyššie amplitúdy než piezoaktuátor a hit tiež obsahuje odlišné frekvenčné rozloženie viditeľné na obrázku 7-8.





Obr. 7-8: Zmeraný signál emisie z Hsu-Nielsenovho zdroja

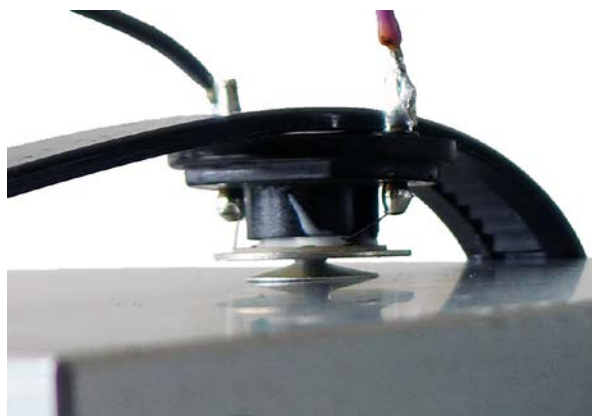
V porovnaní s emisiou Hsu-Nielsenovho zdroja (pentestu) ASTM E976 výrobcu Vallen Systeme má vlnenie vyvolané piezoaktuátorom definovanejšie frekvenčné oblasti a pre absenciu funkčného zosilňovača nižšiu maximálnu amplitúdu vlnenia, ktorú navyše zvyšovať nie je potrebné, keďže sa meranie zaoberá simuláciou relatívne jemných nárazov. Obrázok 7-8 a 7-9 reprezentuje odozvu väčšiny testovaných vzoriek piezoelektrických diskov s rozdielmi amplitúdy v rádoch desiatok mV a rozdielmi spektra zapríčinenými odlišnými rezonančnými frekvenciami spolu s chybou zmeny uchytania jak aktuátora, tak snímača samotného.



Obr. 7-9: Zmeraný signál z piezoaktuátora pri identickej zostave.

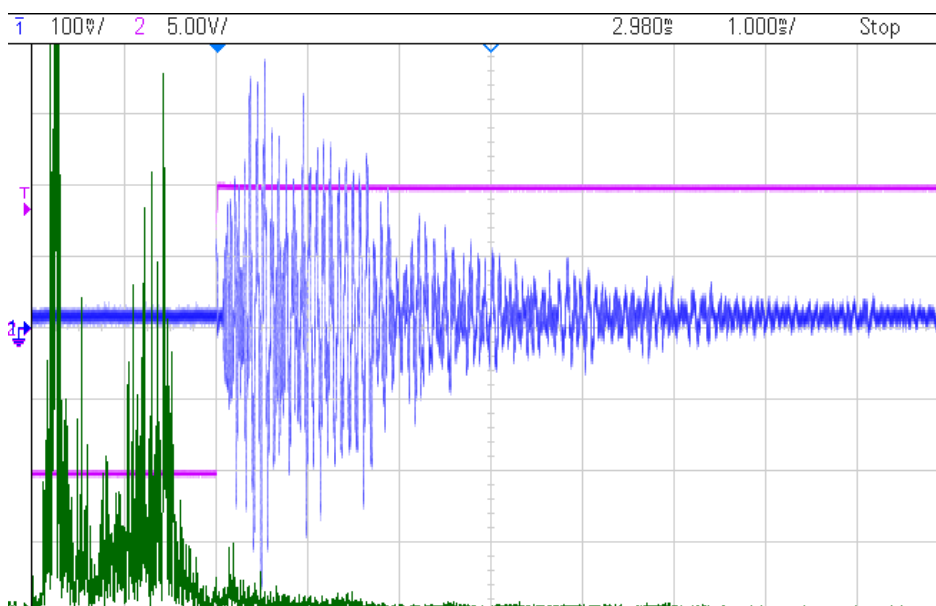
### 7.4.3 Piezoelektrický menič snímača vzdialenosti

Predmetom ďalších pokusov bol klasický, komerčne dostupný dvojhlavý ultrazvukový snímač vzdialenosti. Zo zariadenia sa experimentálne vymontoval samotný piezoelektrický menič zobrazený na obrázku 7-8. Vráťane plastového tela s vývodmi. Pod piezoelektrickým diskom sa nachádza silikónová tmiaca hmota. Ultrazvukový snímač má štandardne bodovo uchytený kónus pre zlepšenie príjmu akustických vln šíriacich sa vzduchom, ten bol odstránený a zvyšky lepiacej hmoty kónusu vyhladené.



Obr. 7-10: Piezoelektrický menič ultrazvukového snímača vzdialenosti

Signál z tohto snímača prekonal doterajšie výsledky a musel byť zaznamenávaný na rozsahu 100 mV / diel. Jednalo sa o najcitlivejší testovaný piezoelektrický disk.



Obr. 7-11: Signál zachytený ultrazvukovým snímačom vzdialenosti



## 7.5 Úsudky z meraní

Vonkajší rám CubeSatu a nanosatelitov celkovo je členitý, obsahuje mnoho výrezov a ostrých uhlov, takáto geometria spôsobí vo výsledku viacero zachytených odrazov spolu s prvým najsilnejším vlnením. Klasická pozemská akustická defektoskopia, napríklad veľkých skladovacích nádrží, sa dokáže odrazom vyvarovať tým, že snímač a epicentrum emisie sú dostatočne vzdialené od seba a od odrazových činiteľov ako sú ostré hrany a plochy. Potom jednoduchým odrezaním snímaných hodnôt po určitom časovom úseku od prekročenia minimálnej detekčnej úrovne sa eliminuje príjem odrazov. Po dostatočne dlhom čase sa príjem zase spustí, tento dej popisuje snímok (x).

Výpočet energie nárazu z takto zachyteného signálu bude odrazmi výrazne ovplyvnený, a vzhľadom na danú konkrétnu konštrukciu by musela byť vykonaná kalibrácia pozemským HVI testovaním, pri ktorom sa zistí približný útlm a množstvo odrazov v konštrukcii po náraze častice do rôznych častí konštrukcie.

### 7.5.1 Priestorové usporiadanie snímačov

Umiestnenie viacerých snímačov na aspoň 4 strany kubickej konštrukcie CubeSatu umožňuje charakterizovať smer z ktorého kolidujúca častica priletela, teda určitú informáciu o jej pôvode, ideálne je pokryť všetkých 6 strán.

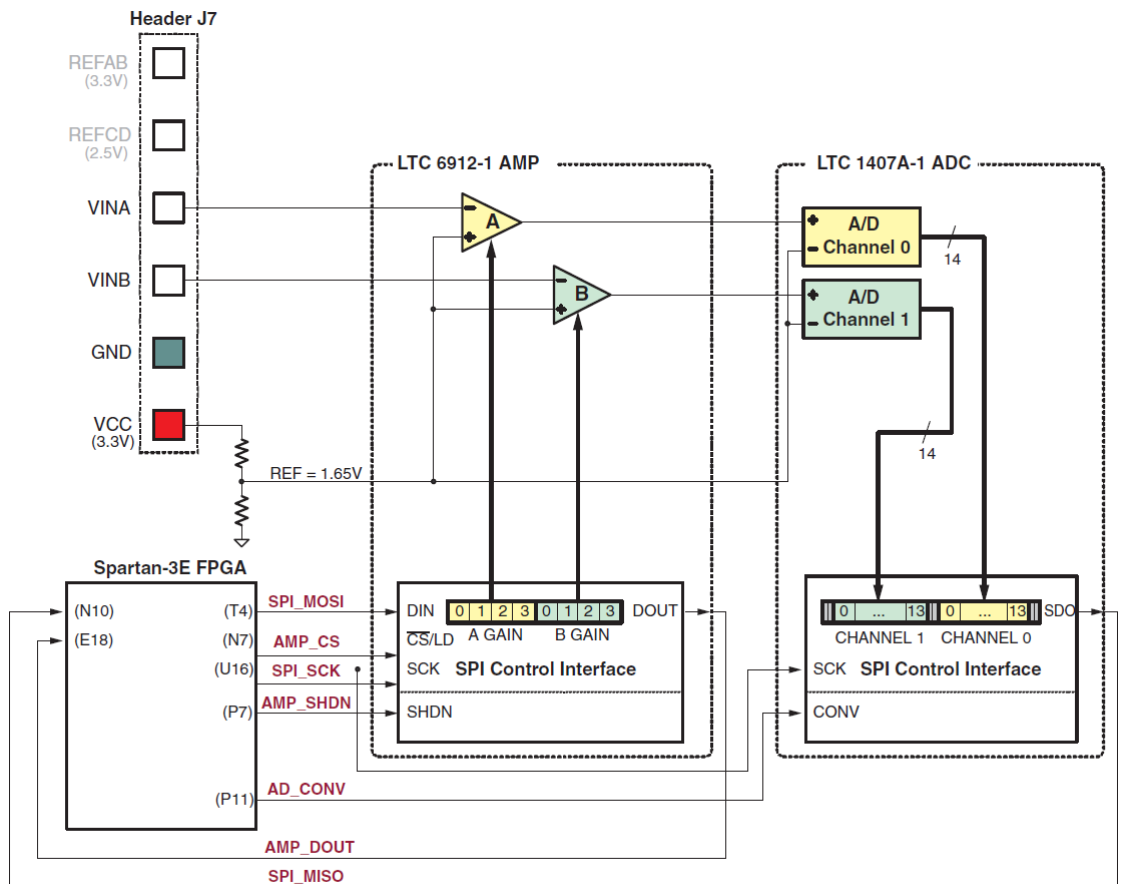
Snímač nainštalovaný na stranu konštrukcie, v daný moment natočenú do hlbokého vesmíru, zachytí signál ktorý oproti ostatným snímačom vykazuje najsilnejšiu amplitúdu. Potom je možné tvrdiť, že častica narazila vysoko pravdepodobne do oblasti kde je tento snímač umiestnený a teda pochádza z hlbokého vesmíru. Takýto náraz by navyše nebol započítaný do štatistických dát množstva orbitálneho odpadu vo výške tohto satelitu, pretože častica pravdepodobne neletela na orbite.

Tvrdenie by bolo v tomto smere nepravdivé, pokiaľ by častica obiehajúca Zem narazila pod veľmi ostrým uhlom a bola najintenzívnejšie vyhodnotená zrovna týmto snímačom. Uhol, pod ktorým častica na povrch dopadne je veľmi náročné a obvykle realizované inými, zložitejšími detekčnými metódami. Rozhodujúca by teda bola aj amplitúda signálu, keďže častice z hlbokého vesmíru obvykle dosahujú vyšších rýchlostí.

## 8 OBVOD ADC XILINX SPARTAN 3-E

Táto kapitola popisuje obvod programovateľného operačného predzosilňovača Linear Technology LTC6912 a 14-bitového A/D prevodníku Linear Technology LTC1407A-1 s rýchlosťou 1,5 MSPS na kanál podľa príručky [xilinx]. Obe zariadenia na doske fyzicky zdieľajú SPI zbernicu, ale zároveň pracujú na odlišných maximálnych frekvenciách hodinového signálu SPI\_SCK [24].

Signál pomenovaný vstup v nasledujúcom texte znamená, že je definovaný ako vstup do FPGA a výstup zase výstup z FPGA, nie výstup z popisovaného ADC alebo zosilňovača.

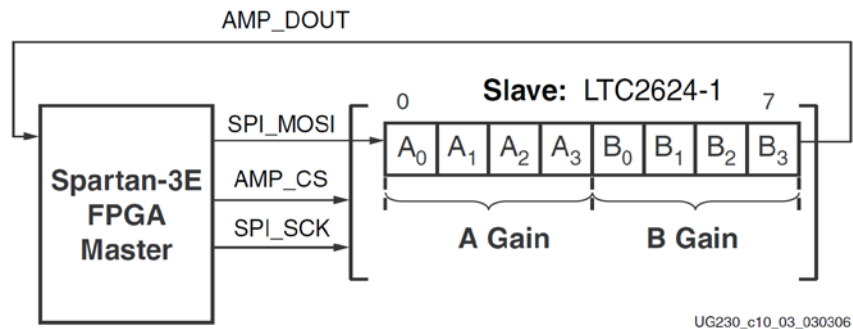


UG230\_c10\_02\_022306

Obr. 8-1: Diagram obvodu ADC a zosilňovača na doske Spartan-3E UG230 [24]

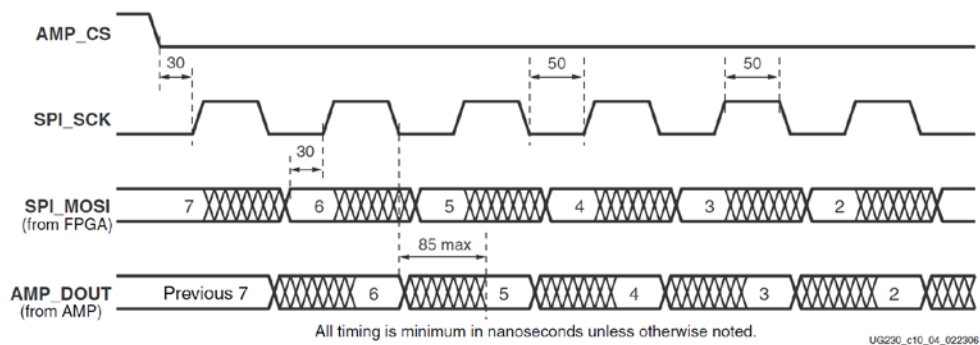
## 8.1 Programovateľný operačný zosilňovač LTC6912

Vstupné napätie je zosilnené vzhľadom k referenčnému napätiu z deliča o hodnote 1,65 V využívanému tiež A/D prevodníkom. Z toho dôvodu bol na doske meracieho zosilňovača OPA2134PA vytvorený identický napät'ový offset, z vstupného signálu je totiž táto referenčná hodnota pri zosilnení odčítaná. LTC6912 má lepšie frekvenčné vlastnosti ako OPA2134PA, preto poskytuje rezervu v možnostiach zosilnenia vyšších frekvencií.



Obr. 8-2: Diagram funkcie posuvného registru zosilňovača LTC6912 [24]

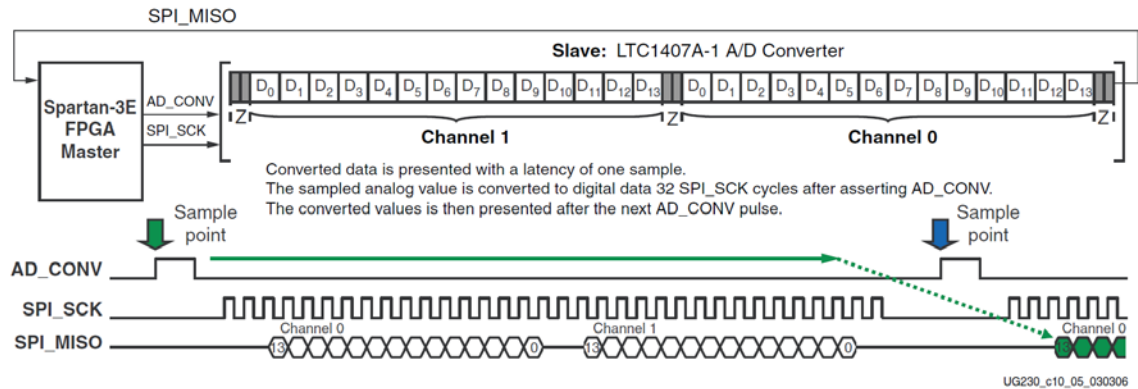
Posuvný register zosilňovača na obrázku 8-2 akceptuje dáta z výstupu SPI\_MOSI na nábežnú hranu hodinového signálu SPI\_SCK minimálne 30 ns po zostupnej hrane signálu AMP\_CS. Teda po zmene AMP\_CS na LOW je pre zosilňovač povolená komunikácia, zároveň vystavuje predchádzajúce bity registru nastavenia zosilnenia na vstup D\_OUT. Signál AMP\_CS v hodnote HIGH uzatvára komunikáciu zosilňovača a umožňuje tak využívať zdieľanú SPI zbernicu ostatnými zariadeniami. Časovanie je definované na obrázku 8-3 [24].



Obr. 8-3: Časovanie SPI komunikácie zosilňovača LTC6912 s FPGA [24]

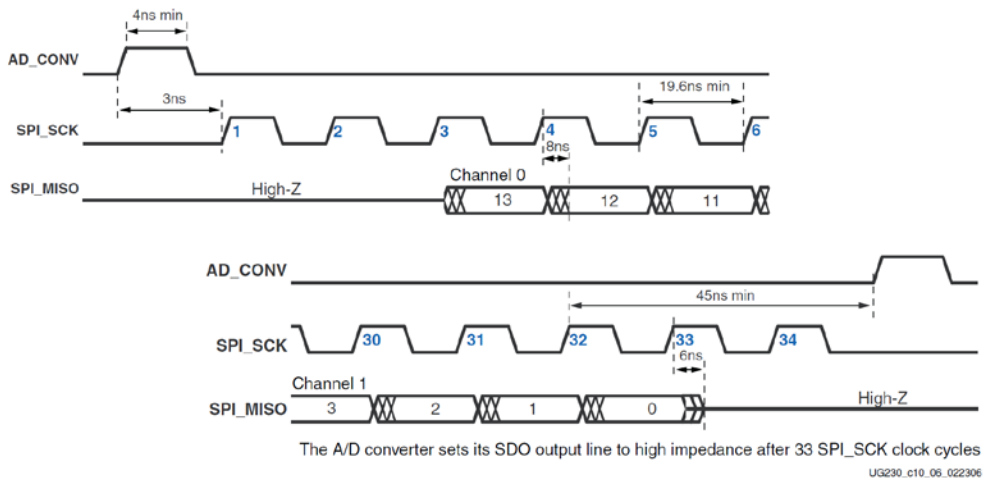
## 8.2 Analógovo číslicový prevodník LTC1407A-1

Obvod LTC1407A-1 má taktiež vlastný hlavný riadiaci signál AD\_CONV, ktorý spúšťa posielanie dát z A/D prevodníku a tým ho prakticky izoluje od rušenia zvyšnou SPI komunikáciou. Prevodník dokáže pracovať pri frekvencií SPI\_SCK odvodených od primárneho 50 MHz oscilátora na doske UG230.



Obr. 8-4: Časovanie komunikácie a dáta A/D prevodníku LTC1407A-1 [24]

Na prvý signál AD\_CONV, ktorý musí vždy trvať minimálne 4 ns, ADC spustí konverziu, dáta sú k dispozícii na odčítanie až po začiatku nového cyklu, detail na obrázku 8-5. Na tretiu nábežnú hranu SPI\_SCK od nábežnej hrany AD\_CONV prevodník vystaví MSB (z angl. Most Significant Bit) 14-bitového registru kanálu 0 (A), vyjadrujúceho digitálnu hodnotu meraného signálu v dvojkovom doplnku, na vstup SPI\_MISO. Na každú nasledujúcu nábežnú hranu je vystavený ďalší bit, až po LSB (z angl. Least Significant Bit). Po odoslaní LSB ADC dve periódy SPI\_SCK čaká a na nasledujúcu nábežnú hranu vystaví MSB z kanálu 1 (B) až po LSB, následne opäť čaká opäť dve periódy SPI\_SCK. Tento cyklus trvajúci 34 periód znázornený obrázkom 8-4 sa opakuje po každej zostupnej hrane AD\_CONV, ktorá tak určuje frekvenciu konverzie [24].



Obr. 8-5: Detail časovania a signálov komunikácie s ADC LTC1407A-1 [24]

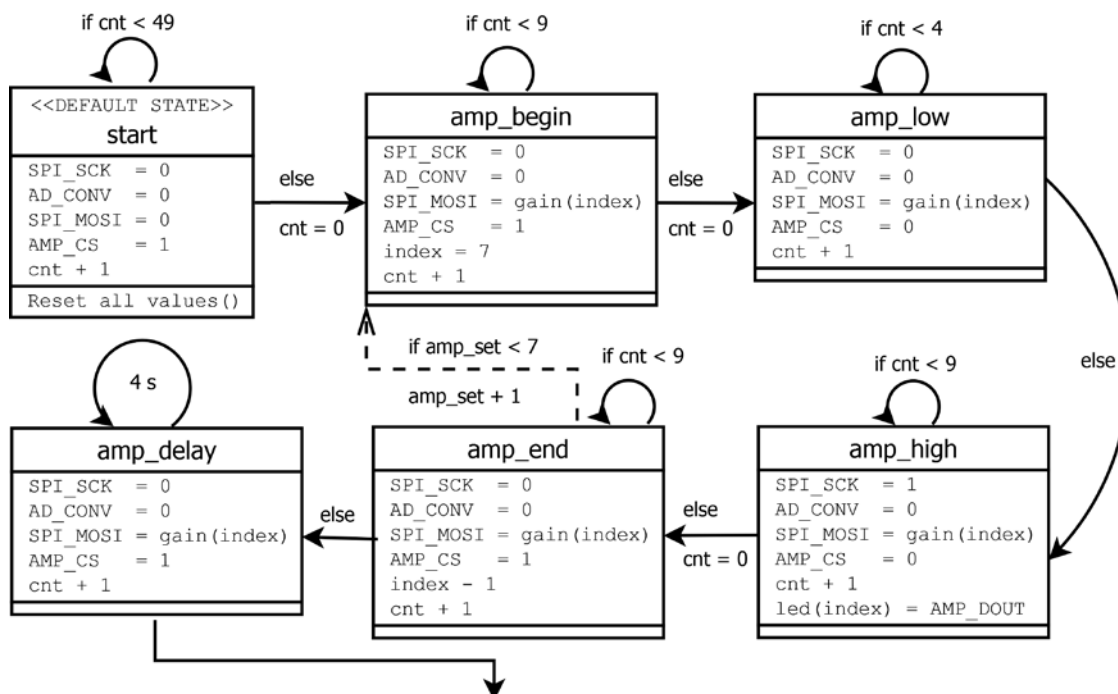
## 9 VYHODNOCOVACÍ STAVOVÝ AUTOMAT

Posledná časť práce je venovaná obvodovému riešeniu vyhodnotenia dát, stavovému automatu, ktorý programuje a riadi zosilňovač a A/D prevodník na vývojovej doske UG230 Spartan-3E. Účelom automatu je tiež vyhodnotenie dát, ak bola na analógovom vstupe prekročená stanovená hranica detekcie a kritickej hodnoty, ktorých hodnota sa nastavuje pomocou 14-bitového čísla v dvojkovom doplnku priamo do VHDL kódu. Výsledný automat v jazyku VHDL bol simulovaný, syntetizovaný a implementovaný v prostredí Xilinx ISE Design Suite 14.3. Konfigurácia hradlového poľa prebiehala pomocou programu Xilinx ISE iMPACT cez USB rozhranie.

### 9.1 Stavový diagram programovania LTC6912-1

Stavový diagram na obrázku 9-1 popisuje funkciu prvej časti automatu, v ktorej sa programuje zosilnenie LTC6912-1 na požadovanú hodnotu, ktorá je reprezentovaná 8-bitovým vektorom podľa tabuľky v príručke [24]. Signál gain obsahuje túto postupnosť bitov posielanú do SPI\_MOSI pomocou indexu, ako vidieť na obrázku 9-1.

Stav start je úvodný stav v ktorom sa všetky hodnoty zdefinujú, stav sa opakuje určitú dobu, pretože pomocou osciloskopu bola zistená potreba časového odstavu než je možné správne komunikovať so zosilňovačom.



Obr. 9-1: Stavový diagram procesov programovania zosilňovača LTC6912-1

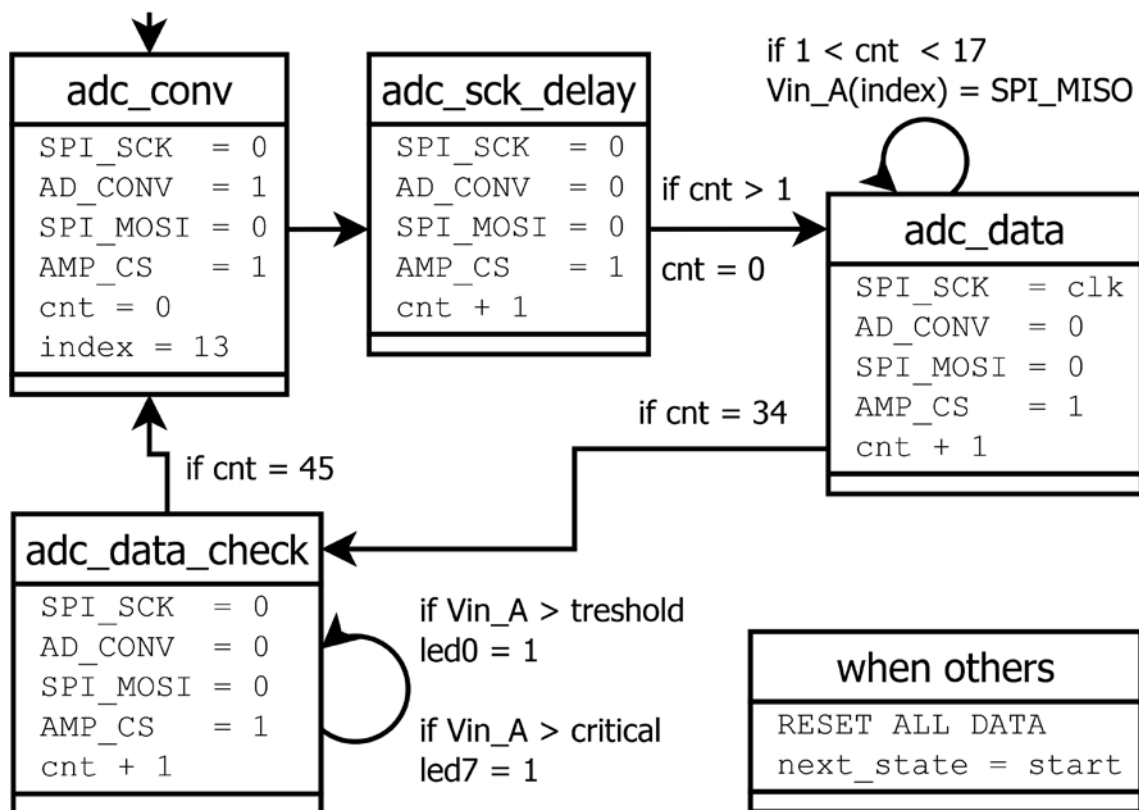
Stavom amp\_begin začína prvý cyklus posielania dát gain cez SPI\_MOSI do zosilňovača, index sa nastaví na hodnotu 7. Po 10 periódach clk, teda hlavného 50 MHz hodinového signálu, nasleduje stav amp\_low, ktorý otvára komunikáciu logickou nulou na AMP\_CS a reprezentuje nulovú hodnotu umelo vytvoreného 5 MHz hodinového signálu potrebného pre komunikáciu s LTC6912-1. Stav amp\_low a amp\_high trvá preto každý presne 5 periód clk.

Nasledujúci stav amp\_high je teda logická jednotka 5 MHz hodinového signálu, na jeho nástupnú hranu si zosilňovač zaznamená dáta z SPI\_MOSI. V prvom z piatich opakovaní amp\_high sa vždy zapisuje hodnota z AMP\_DOOUT do led bufferu, ktorý výsledne počas 4 sekúnd trvania stavu amp\_delay poskytuje vizuálnu kontrolu nastavenia dát zosilnenia do zosilňovača pomocou 8 led na doske.

Stav amp\_end uzatvára komunikáciu logickou jednotkou na AMP\_CS a zisťuje počet prebehnutých cyklov programovania LTC6912-1. Nasledujúci stav je amp\_begin, ak signál amp\_set nedosiahol hodnotu 7. Pokiaľ sa jedná o siedmi cyklus, zosilňovač musel byť úspešne naprogramovaný a nasledujúci stav je amp\_delay. Minimálny počet cyklov sú 4, optimálne bol zvolený mierne vyšší počet. Po skončení cyklu amp\_delay sa uzatvára programovacia časť a nasleduje stav adc\_conv.

## 9.2 Stavový diagram ADC a vyhodnotenia

Na obrázku 9-2 je znázornený diagram stavov druhej časti automatu.



Obr. 9-2: Stavový diagram čítania a vyhodnocovania dát z ADC LTC 1407A-1

Stavom `adc_conv` začína nekonečný cyklus čítania dát z prevodníku a ich vyhodnocovania. Trvá jednu periódu `clk` a jeho úlohou je resetovať počítačadlo, index a vystaviť počas svojho trvania logickú jednotku do `AD_CONV`.

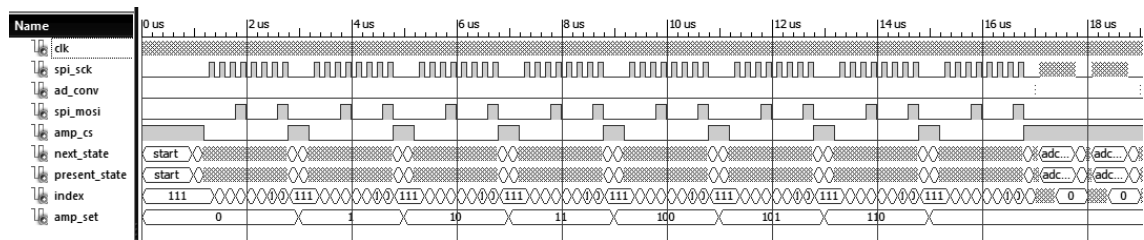
Nasledujúci stav `adc_sck_delay` slúži na jednoduché oneskorenie počiatku odčítania dát z bezpečnostných dôvodov dobou troch periód `clk`.

Stav `adc_data` je realizácia sekvencie odčítania dát kanálu A z `SPI_MISO` do vektoru `Vin_A`, bližšie popísanej na obrázku 8-4. Po 33 cykloch stavu už `LTC1407A-1` odoslalo všetky dáta a automat pokračuje stavom `adc_data_check`.

V tomto stave prebieha porovnanie stanovenej prahovej a kritickej hodnoty s meranými dátami. V prípade prekročenia prahovej hodnoty sa na doske rozsvieti led 0 a pri kritickej led 7.

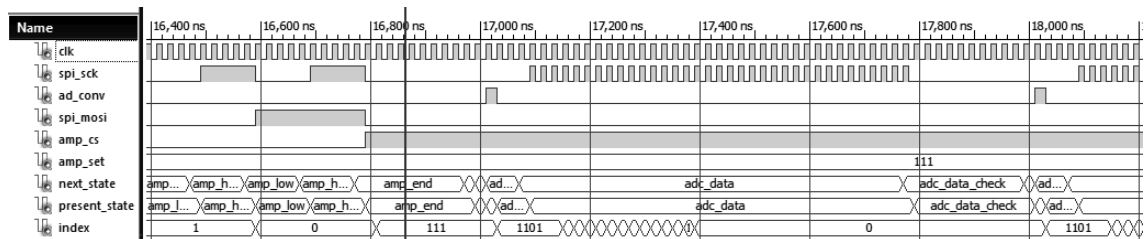
### 9.3 Simulácia v Xilinx ISim

Na obrázku 9-3 je priebeh simulácie programovania zosilňovača. Po siedmych cykloch sa automat prepne do nekonečnej sekvencie odčítavania dát v čase približne 17 us.



Obr. 9-3: Simulácia 7 cyklov programovania zosilnenia LTC6912-1

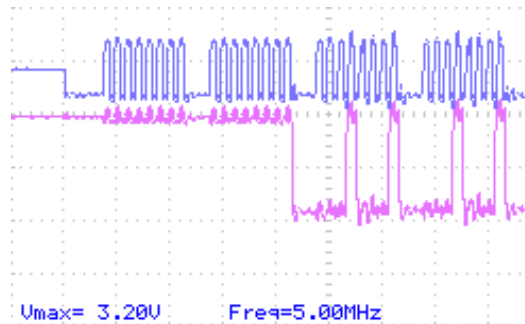
Obrázok 9-4 bližšie znázorňuje prechod posledného cyklu programovania na odčítavanie dát, výrazne zjavný je tiež rozdiel frekvencie `SPI_SCK` pri komunikácii so zosilňovačom a s ADC.



Obr. 9-4: Simulácia prechodu na riadenie a odčítanie dát z ADC LTC1407A-1

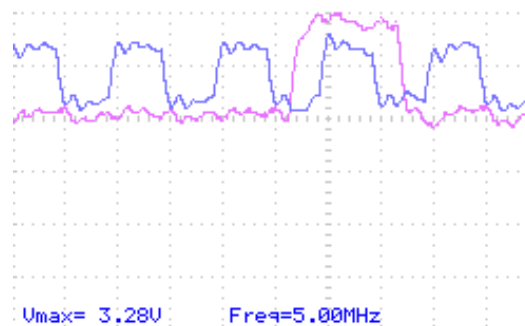
## 9.4 Komplikácie s LTC6912-1

Programovanie zosilňovača, ktoré bolo prvotne vykonané iba dva krát, malo problémy s výstupom dát z AMP\_DOUT. Zosilňovač by mal údajne zrkadliť predchádzajúce nastavenie zosilnenia z posuvného registra pri jeho plnení novými dátami. Deje sa tak však až na tretí cyklus, a aj to vyžadovalo dodatočné predĺženie úvodného stavu start, aby dáta vystupovali na tretí cyklus bez chýb. Z toho dôvodu bol počet cyklov nastavený na zvolených 7. Celý priebeh popisuje obrázok 9-5.



Obr. 9-5: Záznam SPI\_SCK (modrá) a AMP\_DOUT (fialová) osciloskopom

Ďalším problémom s AMP\_DOUT bolo zistenie, že zosilňovač vystavuje dáta o niečo neskôr, ako je príručkou definované. Bity predchádzajúceho zosilnenia majú byť prístupné na zostupnú hranu SPI\_SCK avšak na úspešný zápis nestačilo ani oneskorenie 40 ns. Záznam bitov bol teda presunutý zo stavu amp\_low do prvého opakovania stavu amp\_high, kedy je zaručené vystavený správny bit, ako vidieť na obrázku 9-6.



Obr. 9-6: Záznam SPI\_SCK (modrá) a AMP\_DOUT (fialová) osciloskopom

Posledný problém ostal nevyriešený. Výstup dát z A/D prevodníku sa nezapisuje správne a príčina problému doposiaľ nebola zistená, môže existovať napät'ová chyba v reťazci medzi zosilňovačom a prevodníkom alebo nesprávnom nastavení zosilnenia. Nakoľko sa zistili nedostatky v príručke, nevyklučuje sa problém v oblasti časovania alebo vstupných napät'ových úrovní.



## 10 ZÁVER

Preskúmanie fyzikálnych prejavov HVI a možností, akými sa dajú konkrétne mechanické prejavy kolízie zisťovať, viedlo k úsudku o vhodnosti snímačov pre navrhovaný detekčný systém a spôsoboch jeho realizácie.

Než bolo možné vykonávať testovanie a meranie snímačov, musel byť vyrobený vhodný zdroj mechanického vlnenia a akustickej emisie v oblasti ultrazvuku. Na tento účel sa overovali elektromechanické zdroje ako vibračný stôl a reproduktory, ktoré neuspeli. Riešenie sa preorientovalo na piezoelektrický aktuátor. Štvorstupňový aktuátor bol však bez zosilňovača výkonom obdobný piezoelektrickému disku, navyše svojou vyššou kapacitou a konštrukciou prinášal viac negatívnych aspektov popísaných v kapitole 6.

Aktuátor v podobe piezoelektrického disku sa preukázal pozitívne a pri statickej montáži takmer dokonale opakovateľný zdroj budenia mechanického vlnenia. Problém vzniká pri akejkolvek zmene jeho uchytenia na nosník, výrazne sa tak mení amplitúdové aj frekvenčné spektrum vybudeneho vlnenia. Z toho dôvodu sa tiež práca nezaobera frekvenčnou analýzou. Dodatočným referenčným prostriedkom tvorby emisie bol Hsu-Nielsenov zdroj spomínaný v kapitole 7.

Potenciálne využitie novej technológie piezoelektrických MEMS mikrofónov spoločnosti Vesper Technologies podnietilo k praktickým experimentom, ktoré však nedokázali preukázať ich použiteľnosť na snímanie vibrácií a akustickej emisie v ich pôvodnom púzdre. Teoreticky by piezoelektrické pláty mikrofónu mohli dosahovať dobrú citlivosť na povrchové vlnenie v prípade priameho kontaktu. To by však vyžadovalo významnú modifikáciu púzdra kremikového čipu, ktorá nie je v náplni tejto práce. Testovaný akcelerometer MEMS technológie ADXL350 je pre meranie relatívne slabých nárazov, ktorým sa táto práca venuje taktiež nevhodný.

Piezoelektrické fólie sa preukázali ako potenciálne použiteľný snímač povrchového vlnenia z nárazu, pokiaľ by sa zvolil vhodný typ. Hlavným negatívom je slabá teplotná odolnosť, piezoelektrické vlastnosti PVDF snímačov výrazne klesajú pri 70 °C až 100 °C podľa konkrétnej technológie.

Piezoelektrický disk sa osvedčil ako najlepšie riešenie merania akustickej emisie vyvolanej nárazmi častíc. Meranie pomocou týchto snímačov a zisťovanie ich vlastností je popísané v kapitole 7. Vhodná kombinácia rozmerov a materiálu substrátu, vlastností keramiky a ďalších aspektov výroby piezoelementov dokáže zabezpečiť spoľahlivú detekciu HVI udalostí. Po preskúmaní vhodných riešení montáže piezoelementov na konštrukciu CubeSatu, rozmiestnení jedného alebo viacerých snímačov na danú konfiguráciu a po finálnej kalibrácii je možné referenčne merať amplitúdu jednotlivých nárazov do satelitu. Podmienkou je ale kalibrácia snímacej aparatúry každého satelitu samostatne, nakoľko bolo zistené veľmi významné ovplyvnenie meraných hodnôt pri zmenách prítlaku a plochy kontaktu snímača s nosníkom.

Stavový automat popísaný kapitolou 9, realizovaný na vývojovej doske Spartan-3E UG230, bol vytvorený ako príklad spôsobu detekcie mechanických vlnení a vyhodnotenia ich amplitúdy na základe stanovených referenčných hodnôt. Komplikácie s programovaním zosilňovača LTC6912-1 spôsobené nezrovnalosťami v príručke vývojovej dosky spotrebovali významný podiel času určenému vývoju

obvodu. Automat má preto stále problémy so zápisom dát s A/D prevodníku a nebol posunutý na sofistikovanejšiu úroveň. Celý projekt a VHDL kód sa nachádza na priloženom kompaktnom disku.

Zníženie spotreby detekčného obvodu je možné realizovať znížením vzorkovacej frekvencie A/D prevodníku na minimum potrebné pre zachytenie zmeny amplitúdy meraného vlnenia určitej frekvencie, takéto riešenie však vylučuje spektrálnu analýzu. Spotreba významne závisí od vstupného zosilňovača a v prípade použitia dostatočne citlivého piezoelementu môže potreba zosilnenia úplne odpadnúť.

# LITERATÚRA

- [1] HALL, Loretta. The History of Space Debris [online]. In: *Space Traffic Management Conference*, 19. 2014 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://commons.erau.edu/stm/2014/thursday/19>
- [2] *About Space Debris* [online]. European Space Agency, last update: 21 February 2018 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: [https://www.esa.int/Our\\_Activities/Operations/Space\\_Debris/About\\_space\\_debris](https://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Space_Debris/About_space_debris)
- [3] KESSLER, J, Donald & L Johnson, Nicholas & Liou, J.-C & Matney, Mark. The Kessler Syndrome: Implications to Future Space operations. *Advances in the Astronautical Sciences*. [online]. 2010 137 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.394.6767&rep=rep1&type=pdf>
- [4] LE MAY, S., S. GEHLY, B.A. CARTER, FLEGEL, S., Space debris collision probability analysis for proposed global broadband constellations [online]. In: *Acta Astronautica*, Volume 151, 2018 [cit. 2018-12-07]. 445-455. ISSN 0094-5765. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.06.036>.
- [5] MENLONG Liu, QIANG Wang, QINGMING Zhang, RENRONG Long, ZHONGQUING Su, Characterizing hypervelocity (>2.5 km/s)-impact-engendered damage in shielding structures using in-situ acoustic emission: Simulation and experiment, In: *International Journal of Impact Engineering* [online]. Volume 111, 2018, Pages 273-284 [cit. 2018-12-07]. ISSN 0734-743X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.10.004.a>
- [6] *Sensor Systems to Detect Impacts on Spacecraft* [online]. Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, v2.1, 04.2013 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: [https://www.iadc-online.org/Documents/IADC-2008-03,%20Sensor%20Systems%20to%20Detect%20Impacts%20on%20Spacecraft,%20Version%202\\_1.pdf](https://www.iadc-online.org/Documents/IADC-2008-03,%20Sensor%20Systems%20to%20Detect%20Impacts%20on%20Spacecraft,%20Version%202_1.pdf)
- [7] MCCRORY, John. *Advanced Acoustic Emission (AE) Monitoring Techniques for Aerospace Structures*. Phd. Thesis. Cardiff: Cardiff University, Cardiff School of Engineering, 2015.
- [8] UNNTHORSSON, Runar. *Hit Detection and Determination in AE Bursts* [online]. 2013 [cit. 2018-12-07]. DOI 10.5772/54754. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/245536427\\_Hit\\_Detection\\_and\\_Determination\\_in\\_AE\\_Bursts](https://www.researchgate.net/publication/245536427_Hit_Detection_and_Determination_in_AE_Bursts)
- [9] SERRIDGE, Mark a Torben R. LICHT. BRÜEL & KJÆR. *Piezoelectric accelerometers and vibration preamplifiers: Theory and application handbook* [online]. Nærum, Dánsko, 1987 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/bb0694.pdf>
- [10] ANALOG DEVICES. *Analog and Digital MEMS Microphone Design Considerations* [online]. USA: Analog Devices, 2013 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/Analog-and-Digital-MEMS-Microphone-Design-Considerations-MS-2472.pdf>
- [11] VESPER TECHNOLOGIES. *Avoiding Epic Fails in MEMS Microphones* [online]. USA: Vesper Technologies, 2017 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <http://vespermems.com/wp-content/uploads/2017/10/Vesper-Microphone-Arrays-whitepaper-1.pdf>

- [12] AGRANAT, Ian. *Detecting Bats with Ultrasonic Microphones* [online]. Wildlife Acoustics, Inc. 2014 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.wildcare.eu/media/wysiwyg/pdfs/UltrasonicMicrophones.pdf>
- [13] MEMS Microphones – Vesper Delivers New MEMS Microphone Technology [online]. USA: audioXpress, 2017 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.audioxpress.com/article/mems-microphones-vesper-delivers-new-mems-microphone-technology>
- [14] ANALOG DEVICES. *An Introduction to MEMS Vibration Monitoring* [online]. USA: Analog Devices, 2014 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-48/number-2/articles/intro-to-mems-vibration-monitoring.pdf>
- [15] SMĚKAL, Z. *Analýza signálů a soustav – BASS*. Elektronické skripta, VUT v Brně, 2012. ISBN 978-80-214-4453-9.
- [16] RENESAS ELECTRONICS. *A Brief Introduction to Sigma Delta Conversion* [online]. Japan: Renesas Electronics, 1995 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.renesas.com/eu/en/www/doc/application-note/an9504.pdf>
- [17] UHLÍŘ, Jan, Pavel SOVKA a Roman ČMEJLA. *Úvod do číslicového zpracování signálů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02799-6.
- [18] TUMAŇSKI, Sławomir. *Principles of electrical measurement*. New York: Taylor & Francis, 2006. Sensors series. ISBN 0750310383.
- [19] HOLČÍK, Lukáš. *Spektrální analýza hudební skladby*. Brno 2009. Diplomová práce. Brno: Masarykova univerzita, Fakulta informatiky. Vedúci práce: MgA. Rudolf Růžička.
- [20] BANNATYNE, Ross., *The challenges and evolution of CubeSat Electronics* [online]. 2017 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.embedded.com/electronics-blogs/say-what-/4443299/The-challenges-and-evolution-of-CubeSat-electronics>
- [21] GROSSE, Christian. *Hsu-Nielsen source* [online]. Nemecko: NDT.net, 2002 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.ndt.net/ndtaz/content.php?id=474>
- [22] BANČÁK, M. *Snímání signálu akustické emise s využitím vlnovodů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 56 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [23] TOSHINORI, Kuwahara. *FPGA-based Reconfigurable On-board Computing Systems for Space Applications*. Germany: University in Stuttgart, Institute of Space Systems, 2010. Vedúci práce Prof. Dr. rer. nat. Hans-Peter Roser.
- [24] XILINX, *Spartan-3E FPGA Starter Kit Board User Guide* [online]. Xilinx, 2011 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: [https://www.xilinx.com/support/documentation/boards\\_and\\_kits/ug230.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/boards_and_kits/ug230.pdf)
- [25] BRÜEL & KJÆR. *Miniature DeltaTron® Accelerometers - Types 4517 and 4517-002* [online]. Nærum, Dánsko, [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/media/doc/Bp2068.pdf>
- [26] VESPER TECHNOLOGIES. *Piezoelectric MEMS Microphone PMM-3738-VM1000-R* [online]. USA: PUI Audio Inc., 2017 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/334/PMM-3738-VM1000-R-1110648.pdf>
- [27] VESPER TECHNOLOGIES. *Piezoelectric MEMS Microphone PMM-3738-VM1000-R* [online]. USA: PUI Audio Inc., 2017 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/334/PMM-3738-VM1010-R-1113381.pdf>

- [28] FIALKA, J; Benes, P; Michlovska, L; Klusacek, S; Pikula, S; Dohnal, P; Havranek, Z, 2016: Measurement of thermal depolarization effects in piezoelectric coefficients of soft PZT ceramics via the frequency and direct methods. *JOURNAL OF THE EUROPEAN CERAMIC SOCIETY* 36(11), p. 2727 - 2738, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.03.036

## ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

$E_{kin}$	kinetická energia	[J]
$f_{vz}$	vzorkovacia frekvencia	[Hz]
$f_{max}$	najvyššia frekvenčná zložka	[Hz]
MCU	Micro-Controller Unit, mikrokontrolér	
FPGA	Field Programmable Gate Array, programovateľné hradlové pole	
HVI	Hyper-velocity Impact, hyper-rýchlostný náraz	
LEO	Low-Earth Orbit, nízka obežná dráha	
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems, mikro-elektro-mechanický systém	
AE	Acoustic Emission, akustická emisia	
IR	Infrared Radiation, infračervená radiácia	
NDT	Nondestructive Testing, nedeštruktívne testovanie	
ADC	Analog-Digital Converter, analógovo-digitálny prevodník	
PDM	Pulse Density Modulation, modulácia pulznou hustotou	
I <sup>2</sup> S	Inter-IC Sound Bus, zbernica zvukových signálov	
DSP	Digital Signal Processor, procesor číslicových signálov	
DFT	Discrete Fourier Transform, Diskrétna Fourierova transformácia	
FFT	Fast Fourier Transform, rýchla Fourierova transformácia	
SPI	Serial Peripheral Interface, sériové periférne rozhranie	
MSB	Most Significant Bit,	
LSB	Least Significant Bit,	

# ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1-1: Historický vývoj množstva a typu orbitálnych objektov [2].....	7
Obr. 2-1: Efekt HVI na Whipplov štít [6].....	10
Obr. 2-2: (a) symetrické a (b) asymetrické vlny [7] .....	10
Obr. 2-3: Šírenie vlnenia v disperznom materiáli [7] .....	11
Obr. 2-4: Kalorimetrické meranie energie zo zmeny teploty $\Delta T$ [6].....	13
Obr. 3-1: Použitie snímača akustickej emisie a podoba signálu [8] .....	14
Obr. 3-2: Príklad typu akcelerometrov od firmy Bruel Kjaer [9].....	15
Obr. 3-3: Frekvenčný rozsah piezoelektrického akcelerometru [9] .....	16
Obr. 3-4: Pohľad zhora na čip (vľavo) a nákres prierezu (vpravo) [11].....	16
Obr. 3-5: Blokové schéma analógového MEMS mikrofónu [10] .....	17
Obr. 3-6: Blokové schéma pre digitálny PDM výstup (vľavo) a I2S (vpravo) [10].....	18
Obr. 3-7: Pohľad zhora na čip (vľavo) a nákres prierezu (vpravo) [11].....	18
Obr. 4-1: Sigma delta prevodník prvého rádu [16].....	20
Obr. 4-2: Popis analýzy transientného priebehu zmeraného signálu AE [8].....	21
Obr 6-1: Štvorstupňový piezokeramický aktuátor.....	26
Obr. 6-2: Vlastná mechanická odozva rôznych piezoaktuátorov. ....	26
Obr. 6-3: Vlastná odozva štvorstupňového piezoaktuátoru.....	27
Obr. 6-4: Zákmity a oscilácie počas nábehu napätia. ....	28
Obr. 6-5: Vybudené vlnenie na nábežnú a zostupnú hranu .....	28
Obr. 6-6: Finálna verzia tvaru napájacieho napät'ového pulzu a odozva .....	29
Obr 7-1: Meracie pracovisko, zostava s budeným nosníkom a prítlakom snímača .....	30
Obr. 7-2: Snímok väčšiny použitých snímačov s výnimou piezofólií.....	30
Obr. 7-3: Schéma zapojenia obvodu zosilňovača a napät'ového offsetu .....	31
Obr. 7-4: Izolácia otvoru membrány kaptonovou páskou (TDK ICS-40730).....	32
Obr. 7-5: Meraný signál z VM1000R a spektrálne zložky šumu .....	33
Obr. 7-6: Zostava na meranie nábojového koeficientu metódou priameho merania náboja [28]. ....	34
Obr. 7-7: Uchytenie snímača na nosník.....	35
Obr. 7-8: Zmeraný signál emisie z Hsu-Nielsenovho zdroja.....	36
Obr. 7-9: Zmeraný signál z piezoaktuátoru pri identickej zostave. ....	36
Obr. 7-10: Piezoelektrický menič ultrazvukového snímača vzdialenosti.....	37

Obr. 7-11: Signál zachytený ultrazvukovým snímačom vzdialenosti .....	37
Obr. 8-1: Diagram obvodu ADC a zosilňovača na doske Spartan-3E UG230 [24] .....	39
Obr. 8-2: Diagram funkcie posuvného registru zosilňovača LTC6912 [24] .....	40
Obr. 8-3: Časovanie SPI komunikácie zosilňovača LTC6912 s FPGA [24].....	40
Obr. 8-4: Časovanie komunikácie a dáta A/D prevodníku LTC1407A-1 [24] .....	41
Obr. 8-5: Detail časovania a signálov komunikácie s ADC LTC1407A-1 [24].....	41
Obr. 9-1: Stavový diagram procesov programovania zosilňovača LTC6912-1 .....	42
Obr. 9-2: Stavový diagram čítania a vyhodnocovania dát z ADC LTC 1407A-1 .....	43
Obr. 9-3: Simulácia 7 cyklov programovania zosilnenia LTC6912-1.....	44
Obr. 9-4: Simulácia prechodu na riadenie a odčítanie dát z ADC LTC1407A-1 .....	44
Obr. 9-5: Záznam SPI_SCK (modrá) a AMP_DOOUT (fialová) osciloskopom.....	45
Obr. 9-6: Záznam SPI_SCK (modrá) a AMP_DOOUT (fialová) osciloskopom.....	45