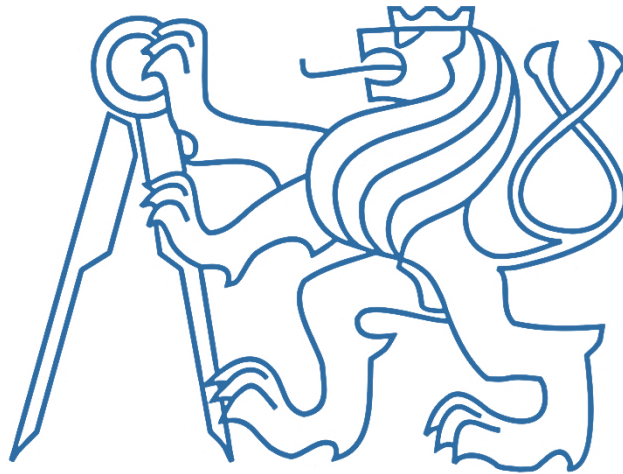


České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta dopravní  
K618Ústav mechaniky a materiálů



Mapování podpovrchových defektů  
robotickým ramenem se speciální  
koncovkou

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

*Vypracoval:* **David Hanč**  
*Vedoucí práce:* **Jaroslav Valach**  
*Rok:* **2021**



**K618** ..... **Ústav mechaniky a materiálů**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE** (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**David Hanč**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**B 3710 – DOS – Dopravní systémy a technika**

Název tématu (česky): **Mapování podpovrchových defektů robotickým ramenem se speciální koncovkou**

Název tématu (anglicky): Mapping of Subsurface Defects by a Robotic Arm with a Special Terminal

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Úkolem práce je naprogramovat robota s připojeným akustickým nástavcem pro skenovací pohyb nad zkoumaným povrchem, provést zvukový záznam odezvy povrchu a najít zvukovou charakteristiku podpovrchového defektu. Dosažení tohoto cíle provést v těchto krocích:
- Navrhnout a podílet se na výrobě vibrační koncovky k robotickému rameni.
- Vytvořit program řízení robota, který na základě zadané polohy a tvaru zkoumané plochy vygeneruje pohyb ramene pro oskenování povrchu vibrační koncovkou.
- V prostředí Matlab vytvořit program, který vyhodnotí akustický záznam skenování a vytvoří mapu povrchu vyjadřující v pseudobarvách jeho zvukovou charakteristiku.
- Na modelovém tělese s uměle vytvořenými podpovrchovými defekty ověřit funkčnost výstupů předchozích kroků podle empirických hledání delaminací pomocí robotického ramene - akustická odezva na poklep zahrnuje informaci o vlastnostech materiálu do určité hloubky.



Rozsah grafických prací: není stanoven

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Skłodowski R, Drdácý M, Skłodowski M (2013)  
Identifying subsurface detachment defects by acoustic tracing. NDT E Int 56:56–64  
KUKA System Software 8.3 Operating and Programming Instructions for End Users

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Valach, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **9. srpna 2021**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

prof. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu mechaniky a materiálů



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

David Hanč  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 9. října 2020

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem k tomu pouze zdroje uvedené na konci práce, a to v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským.

V Praze dne: ...9.8.2021.....

.....David Hanč....

Jméno a Příjmení

## Poděkování

Děkuji Ing. Jaroslavu Valachovi, Ph.D. a Ing. Janu Bryscejnovi za vedení mé bakalářské práce a za podnětné návrhy, které ji obohatily. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, která mě i mou tvorbu po celou dobu psaní práce podporovala a zajišťovala vhodné a příjemné podmínky pro práci, a že vždy bylo dostatek dřeva na štípání, jež bylo nejlepší formou meditace a pročištění hlavy. Velké díky také patří Ondrovi Švejstilovi a Davidovi Gernerovi za jejich odbornou pomoc při sestavení speciální koncovky pro poklep. Dále Gabriele Milerové za její blízkou spolupráci v oblasti akustických experimentů a poutavé předání vědomostí nejen v oblasti akustiky. Miroslavu Horkému patří díky především jeho ochotě věnovat mi v průběhu práce svůj čas ze zahraničí a tím přicházet na nové nápady. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat lidem, které jsem v průběhu práce pravidelně potkával, a kteří mě přiváděli na nové nápady, jmenovitě: Kryštof Dostál, Jirka Dacko, Michal Lipert, Veronika Husáková, Eliška Kořínková, Barbora Hartmanová, Ivo Čecham, Tomáš Borolič, Honza Zarcký, Alan Ráček, Richard Šelbický a paní Eva Kočková.

.....David Hanč.....

Jméno a Příjmení

Název práce: Mapování podpovrchových defektů robotickým ramenem se speciální koncovkou

Autor: David Hanč

Obor: Dopravní systémy

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Valach, Ph.D.

Ústav mechaniky a materiálů, Fakulta dopravní, České vysoké učení technické v Praze

Konzultant: Jan Bryscejn

*Abstrakt: Bakalářská práce je zaměřena na problematiku nedestruktivních zkoušek materiálu s využitím klasifikace audiosignálu. Cílem práce je identifikace podpovrchových vad na základě analýzy zvukové odezvy materiálu a ověřit funkčnost zvolených kritérií a jejich programové implementace experimentálně. K experimentu byla zkonstruována speciální koncovka, která provádí poklep, který vybudí akustickou odezvu. Akustická odezva poklepu je zaznamenána na mikrofon a poté ve formátu WAV analyzována a vyhodnocena v programu Matlab, s jehož pomocí jsou data klasifikována do dvou skupin vzhledem k tomu, jestli došlo k poklepu v porušeném nebo neporušeném místě. K experimentu bylo využito robotického ramene od firmy KUKA, jehož využití si kladlo za účel částečnou automatizaci nedestruktivní zkoušky.*

Klíčová slova: Nedestruktivní zkouška materiálu, robotické rameno, kompozit, akustika, zvukový záznam, audio signál, zpracování audio signálu, klasifikace dat, rozpoznání zvuku, mikrofon, KUKA, strojové učení, Classification learner, Matlab

Title: Mapping of Subsurface Defects by a Robotic Arm with a Special Terminal

Author: David Hanč

*Abstract:* The bachelor thesis is focused on the problem of non-destructive testing of material using audio signal classification. The aim of the thesis is to perform an experiment based on which we will be able to map the subsurface defects in the analyzed material. For the experiment, a special end cap has been constructed which performs a tapping that makes an acoustic response. The acoustic response of the tap is recorded on a microphone and then analyzed in WAV format and evaluated in Matlab, with the help of which the data is evaluated and classified into two groups with respect to whether the tap occurred in a breached or unbroken area. A robotic arm from KUKA was

used for the experiment, the purpose of which was to partially automate the non-destructive test.

*Key words:* Non-destructive material testing, robotic arm, composite, acoustics, audio recording, audio signal, audio signal processing, data classification, audio recognition, microphone, KUKA, machine learning, Classification learner, Matlab

# Obsah

1	Úvod.....	5
2	Dotčené oblasti z materiálového inženýrství .....	7
2.1	Kompozity .....	7
2.1.1	Definice .....	7
2.1.2	Uhlíkové vlákno a jeho využití .....	9
2.1.3	Budoucnost kompozitů .....	10
2.2	Nedestruktivní zkoušky.....	10
2.3	Akustická emise .....	11
2.3.1	Pojem .....	11
2.3.2	Princip .....	12
2.3.3	Použití .....	12
2.4	Zkouška rentgenovým zářením .....	13
3	Audio signál a jeho zpracování .....	14
3.1	Zvuk.....	14
3.2	Záznam zvuku .....	16
3.2.1	Mikrofony .....	17
3.3	Digitalizace .....	18
3.3.1	Vzorkování.....	18
3.3.2	Kvantování.....	19
3.4	Fourierova transformace .....	20
3.4.1	Diskrétní Fourierova transformace .....	21
4	Základní parametry zvuku pro analýzu v prostředí Matlab.....	23
4.1	Matlab.....	23
4.2	Manipulace s audio daty.....	24
4.3	Rozdělení na rámce.....	25
4.4	Spektrogram .....	25
4.5	MelSpektrogram .....	26
4.6	Statistické zpracování signálu .....	27



4.6.1	Střední hodnota.....	27
4.6.2	Maximum .....	29
4.6.3	Minimum .....	29
4.6.4	Medián .....	29
4.6.5	Peak to Peak .....	30
4.6.6	Efektivní hodnota RMS.....	30
4.6.7	Standardní odchylka .....	30
4.6.8	Kurtosis (Koefficient šikmosti).....	30
	Praktická část .....	32
5	Dotčené oblasti pro provedení experimentu .....	32
5.1	Zkoumaný materiál .....	32
5.2	Speciální koncovka.....	34
5.3	Robotické rameno .....	38
5.3.1	Program pro robotické rameno .....	39
5.3.2	Kompletní sestavení experimentu .....	40
6	Vyhodnocení experimentu .....	43
6.1	Získaná data a potřebná data .....	43
6.2	Vyhodnocení audiosignálu .....	44
6.3	Klasifikace dat .....	46
6.3.1	Mapování defektů.....	49
	Závěr .....	51
	Citovaná literatura .....	52
	Seznam zkratk.....	57
	Seznam tabulek.....	58
	Seznam obrázků .....	59
	Seznam příloh .....	61

# 1 Úvod

Technická díla si uchovávají při namáhání svůj tvar a odolávají silám během provozu díky vhodné kombinaci tvaru a použitých materiálů. Nejen pro stavbu mostů a budov, ale také konstrukcí jako dopravní prostředky je velice důležitá volba materiálů, ze kterých je daná věc zkonstruována. O tom, co rozhoduje, zda bude daný materiál při řešení použit, jsou jeho vlastnosti. Materiály byly od pradávna podrobovány nejrůznějším zkouškám k zjištění materiálových vlastností. V dávných dobách mohly takové zkoušky stát i život <sup>1</sup>, ovšem díky technologickému pokroku a rozvojem vědních disciplín byly vyvinuty přístroje, které určité vlastnosti materiálu mohou měřit. Takové zkoušky se vyznačují namáháním samotného materiálu a zkoumáním jeho chování. Příklad takové zkoušky je například tahová zkouška, při které se na přístroji normovaný vzorek namáhá tahem do té doby, než se přetrhne. Výsledkem takové zkoušky jsou například hodnoty meze pevnosti a meze kluzu. Takový postup je velice účinný. Problémem je ale znehodnocení zkoumaného materiálu, který není možné dále použít. [1]

Znalosti materiálových vlastností při výrobě samotného materiálu jsou důležité. Ovšem v praxi nás dost často zajímá také životnost materiálů. Při provozu mohou vznikat v materiálech defekty pod povrchem, které nelze zrakově zaznamenat. Právě takové defekty představují velké riziko vzhledem k náročnosti jejich detekce. Při jejich detekci je žádoucí materiál neporušit tak aby po případě součástka mohla fungovat dál.

Tato bakalářská práce je zaměřena na nedestruktivní zkoušku (NDT- non-destructive testing) materiálu, která ke svému vyhodnocení využívá akustickou odezvu materiálu. Stejně jako všechny nedestruktivní metody si i zkouška vytvořená v této práci klade za cíl zajistit neporušenost a spolehlivost výrobků, mohla by pomoci při kontrole výrobního procesu, eventuálně přispět ke snížení výrobních nákladů a udržení trvalé kvality výroby. Mezi cíle práce patří i snaha

---

<sup>1</sup> Stavitelé, kteří byli podrobováni takto náročným zkouškám, nesli ve starém Římě čestný titul Pontifex, který v doslovném překladu znamená „stavitel mostů“. Takový titul původně užíval římský kněz. Z takového titulu lze odvodit, že stavitelé byli ve starém Římě velmi ceněni. Titul si mohli vysloužit jen ti, co přežili námahovou zkoušku svých mostů. Taková kolaudace mostů probíhala tak, že stavitel se postavil pod svůj most, na kterém projížděly plně naložené vozy. Procedura vedla stavitele k maximální odpovědnosti a také svým nevybíravým způsobem po sobě zanechávala jen ty kvalitní. [1]

akustickou metodu co nejvíce zautomatizovat a přiblížit komerčnímu využití, kde dochází ke kontrole výrobků. Z toho důvodu je v praktické části této práce pracováno využíván robot **KUKA Agilus KR 6 R700-2**.

Pro úspěšný návrh a realizaci akustické zkoušky se zaměříme na několik oblastí, které budou představeny jako samostatné kapitoly a podkapitoly této práce. Jako první se budeme zabývat otázkou kompozitních materiálů a jejich technického využití (kapitola 2.1). Následně bude pozornost v práci věnována vybuzení akustického signálu ze zkoumaného vzorku, k čemuž byla zkonstruována speciální koncovka, která je umístěna na robotickém rameni, které naprogramujeme tak, aby byly akustické signály vyvolány a zaznamenány po celé ploše zkoumaného vzorku (kapitola 3.2). Akustická odezva materiálu je zaznamenána na mikrofon. Poté je třeba odezvu vyhodnotit, k čemuž byl sestaven program v prostředí Matlab (kapitola 6), který dokáže vyhodnotit nahrané zvuky na základě strojového učení a vytvořit jednoduchou mapu, kde ke nestandardním akustickým odezvám došlo, a kde je tak pravděpodobný výskyt defektu materiálu (kapitola 6.3.1).

Při pokusu využíváme vlastnoručně vyrobený kompozit tvořený dvěma vrstvami netkané textilie s isotropně orientovanými sekanými skleněnými vlákny spojené epoxidovým lepidlem s uměle vytvořenými podpovrchovými defekty. Vzorek a veškeré vytvořené součásti nebo nástroje použité pro vytvoření nebo vyhodnocení experimentu jsou detailně popsány v praktické části této práce.

# Teoretická část

## 2 Dotčené oblasti z materiálového inženýrství

### 2.1 Kompozity

#### 2.1.1 Definice

Dle americké společnosti NASA je kompozit definován následovně:

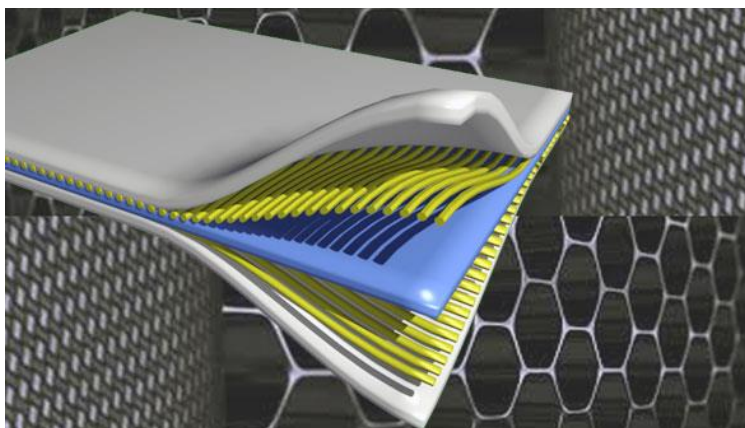
*„Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn. vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní.“* [14]

Dle G. F. Milтона, Cambridge je kompozit definován takto:

*„Kompozity jsou materiály, ve kterých jsou délkové nehomogenity v rozměrech mnohem větších, než jsou atomární (což nám umožňuje používat pro tyto nehomogenity rovnice klasické fyziky), které jsou ale v makroskopickém měřítku přirozeně (statisticky) homogenní.“* [14]

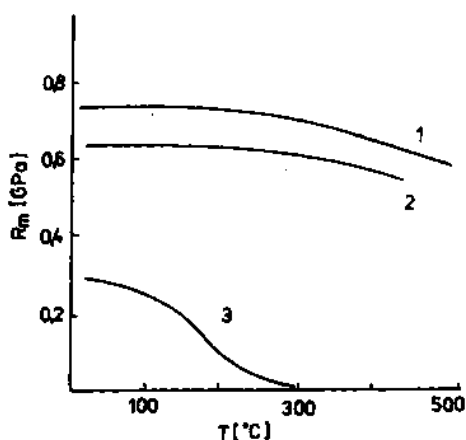
Jinými slovy, kompozity jsou složené materiály ze dvou nebo více substancí, které mají odlišné vlastnosti, ovšem při spojení vzniká materiál nový s novými vlastnostmi, které mohou překonávat samotné substance homogenních materiálů.

Klasickými homogenními materiály rozumíme kovy, sklo, keramika, polymery a elastomery. U každého zmíněného materiálu dokážeme vyjmenovat řadu vlastností, ve kterých materiál vyniká a také vlastnosti, pro které se využití daného materiálu nehodí. Například kovy jsou houževnaté, polymery a elastomery lehké, sklo a keramika křehké. Kompozity nám umožňují kombinovat materiály tak, aby bylo možno dosáhnout celkově lepších vlastností materiálů, a „vzít“ si od každého materiálu jeho kvalitní vlastnosti. [12]



Obrázek 1 Skladba kompozitního materiálu [7]

Za lepšími vlastnosti kompozitu stojí tzv. synergický efekt. Jednotlivé složky kompozitu nedosahují určitých kvalit, ovšem ve spojení ano. Příklad takového synergického efektu může být například spojení grafitového vlákna s hliníkovými slitinami. Grafitové vlákno má velmi dobré mechanické vlastnosti, ale oxiduje. Hliníkové slitiny neoxidují, ale jejich pevnost výrazně klesá s teplotou. Pokud tyto dvě složky spojíme dostaneme kompozit, který vykazuje pevnost do 500 °C a nepodléhá oxidaci. [12]



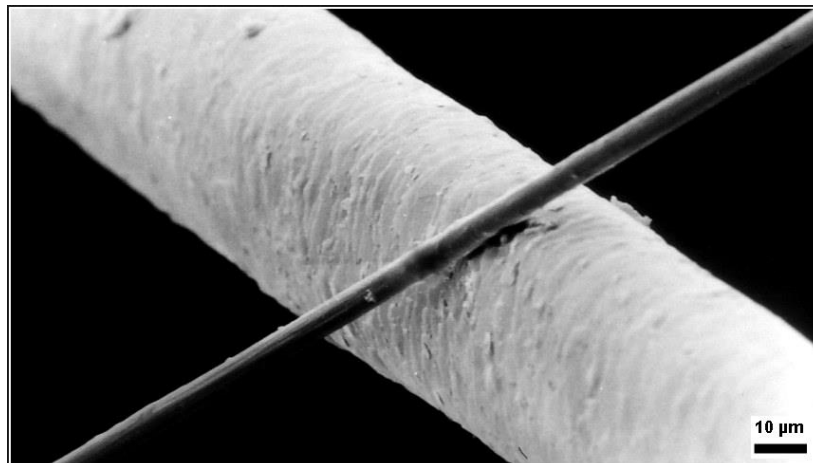
Obrázek 2 Porovnání hliníkové slitiny a jejich kompozitů [11]

Na obrázku výše vidíme slitinu hliníku AlMgSi znázorněnou křivkou 3. Pokud do slitiny přidáme uhlíková vlákna, dostaneme materiál vykazující vlastnosti křivkou 1 a 2 (záleží jaká vlákna do slitiny přidáme). Dalšími běžnými kompozity jsou například železobeton, asfalt nebo skelný laminát. Vždy jedna složka kompozitu musí fungovat jako pojivo, spojitou fází, které drží materiál pohromadě a druhá jako plnivo. Mezi další složky patří pomocné prvky jako například silan, který zajišťuje spojení pojiva a plniva.

Kompozitní neboli složené materiály obvykle vyžadují výrobu s vysokým podílem ruční práce, a tedy možností výskytu chyb. Díky svým vlastnostem jsou kompozity čím dál častěji využívány pro provoz letadel, kde části z kompozitů představují mnoho rizik vzniku vad, které mohou být znásobeny náhodnými ději při provozu, jako jsou impakty s ptáky nebo živelnými jevy. Při servisu na letišti je proto velice důležité provést důkladnou prohlídku částí letadla a vyhodnotit, jestli je letadlo schopné dalšího letu. Velké množství poruch a defektů může vznikat pod povrchem, důkladně zvládnutá defektoskopie je nezbytným předpokladem. Mezi všemi metodami jsou nejdůležitější ty nedestruktivní.

## 2.1.2 Uhlíkové vlákno a jeho využití

Nejvíce pozornosti na sebe poutá kompozit, jehož vlákna jsou vyrobena z uhlíku. Uhlíkové neboli karbonové vlákno je druh vlákna obsahující uhlík v jeho různých modifikacích. Karbonové vlákno je dlouhý a tenký pramen materiálu o průměru 5-8  $\mu\text{m}$ . Skládá se převážně z atomů uhlíku a je typicky využíváno jako výztuž kompozitů. Díky uspořádání atomů uhlíkového vlákna vyniká uhlíkové vlákno svou vysokou pevností v poměru ke své velmi malé tloušťce. [8]



Obrázek 3 Velikost uhlíkového vlákna [14]

Uhlíková vlákna našla uplatnění téměř ve všech oblastech průmyslu. Nejdůležitějšími odvětvími jsou letecký průmysl, stavební průmysl, energetický průmysl, automobilový a dopravní průmysl. Uhlíková vlákna mohou nabídnout lehkost, ale zároveň vyšší tvrdost nebo odolnost. Takových vlastností lze využít téměř všude, kde je cena úměrná výsledkům. Z uhlíkových vláken se vyrábí předměty od golfových holí přes jízdní kola až po křídla letadel nebo nádrže vesmírných raket. Právě v letecké dopravě je kladen důraz na maximalizaci užitečných vlastností, tedy maximalizaci měrných veličin jako poměr tuhost/hustota a pevnost/hustota, které nejlépe splňují právě kompozitní materiály. [12]

V leteckém průmyslu za použití uhlíkového vlákna lze dosáhnout nižší váhy a tím menší spotřeby paliva a tím zvýšit vzdálenost doletu a snížit dopad letecké dopravy na životní prostředí. Takových vlastností se nevyužívá jen pro přepravu po Zemi, ale také při letech do vesmíru, kde je spotřeba paliva v raketových motorech násobným problémem. Společnost SpaceX si nechala pro své obnovitelné vesmírné rakety vyrobit palivovou nádrž z kompozitu z uhlíkových vláken. [8]

### **2.1.3 Budoucnost kompozitů**

V následujících letech bude spotřeba a využití kompozitních materiálů narůstat. V příštím desetiletí se očekává, že letecký trh s kompozitními materiály společně s obranným průmyslem poroste ve srovnání s minulými roky zvýšeným tempem o předpovídaných 7,2% ročně. Mezi budoucnost kompozitů se také řadí výzkum tzv. robotických materiálů. [24]

Robotické materiály jsou kompozity, které mohou nezávisle měnit svůj vzhled a tvar. To znamená, že by cítily, počítaly a reagovaly na své okolí bez jakékoli vnější počítačové síly a veškeré výpočty by byly prováděny uvnitř materiálu na základě signálu z okolí. Mezi aplikace, kde by se v budoucnu mohli robotické kompozity využít, patří křídla letadel, vozidla se schopností přizpůsobit svůj aerodynamický profil či kamufláž v prostředí nebo například robotická kůže se schopností vnímat dotek a jemné textury. [25]

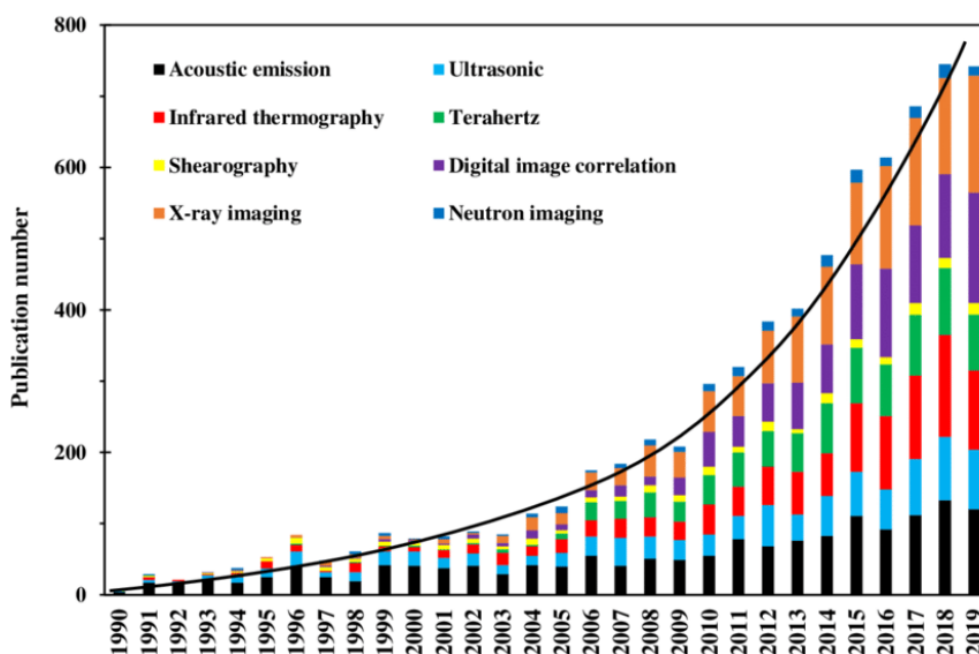
## **2.2 Nedestruktivní zkoušky**

Při výrobním procesu materiálu je určitá pravděpodobnost výskytu nějaké vady, které můžeme základně rozdělit do dvou skupin: vnější defekty a vnitřní defekty. Zejména druhé zmiňované vady jsou při výrobě a provozu problémem a mohou ohrozit správný chod stroje, ve kterém jsou součástky použity nebo všeobecnou bezpečnost při použití vadného výrobku. Mezi nejčastější vady

patří bubliny, sraženiny, vměstky, trhliny, studené spoje aj. Pokud chceme zjistit, jestli výrobek obsahuje podpovrchové defekty, musíme provést zkoušku. Taková zkouška si klade za cíl odhalit podpovrchovou vadu a zároveň neporušit materiál. [3]

Nedestruktivní zkoušky materiálu (dále NDT) je metoda používaná ve vědě a technologickém průmyslu k ohodnocení vlastností materiálu, komponent nebo systémů bez porušení zkoumanému objektu. Díky této vlastnosti je metoda velice užitečná a žádaná technika, která dokáže ušetřit peníze, materiál a čas při kontrole výrobku. Mezi nejčastěji využívané nedestruktivní metody řadíme zkoušky akustickou emisí, rentgenovým zářením, ultrazvukem a magnetické. [4]

V posledních letech si nedestruktivní zkoušky materiálu získaly velkou pozornost vědeckých výzkumů a jsou předmětem diskuse pro širší využití v provozu hlavně díky úsporám, které přinášejí. Na obrázku (Obrázek 4) můžeme vidět vývoj počtu vydaných publikací zaměřující se na nedestruktivní zkoušky kompozitů v rozsahu třiceti let.



Obrázek 4 Porovnání počtu publikací vydaných v posledních třiceti letech týkajících se nedestruktivních zkoušek materiálů. [5]

## 2.3 Akustická emise

### 2.3.1 Pojem

Pojmem akustická emise (AE) se označuje fyzikální jev, při němž pozorujeme akustické signály vysílané mechanicky nebo tepelně namáhaným tělesem. Akustická emise se řadí mezi NDT a k vyhodnocení využívá akustický signál.



Na základě akustického signálu se snaží o detekování poškození, prasklin nebo jiných podpovrchových defektů. Metoda je vhodná pro veliké spektrum materiálů, jako jsou kompozity, dřevo, sklolaminát, keramika, plast, beton nebo polymery. Díky své všestrannosti nachází uplatnění v řadě oborů (dopravní průmysl, strojírenský průmysl, automotive, těžební průmysl aj.) [4]

### 2.3.2 Princip

Metoda akustické emise se často v dostupné literatuře označuje jako pasivní ultrazvuk. AE je jev vyzařování akustických vln v pevných látkách, ke kterému dochází, když v materiálu vznikají nevratné změny například v důsledku trhlin, tvorby plastické deformace způsobené vnitřními silami, plastické deformace způsobené vnějšími silami nebo deformace v důsledku stárnutí materiálu. Nejčastěji dochází k AE během procesu mechanického zatížení materiálu, které mohou doprovázet strukturální změny. Právě při těchto změnách dochází k rychlému uvolnění elastické energie v materiálu nebo na jeho povrchu. Metoda akustické emise využívá právě těchto uvolněných elastických vln a snaží se je pomocí snímačů zachytit. Souhrnně se popsané vlny označují jako akustická emise. Akustické emise lze detekovat ve frekvenčních oblastech od 1kHz do 10MHz, ovšem většina uvolněné energie je v rozsahu od 1kHz do 1MHz. [4] [10]

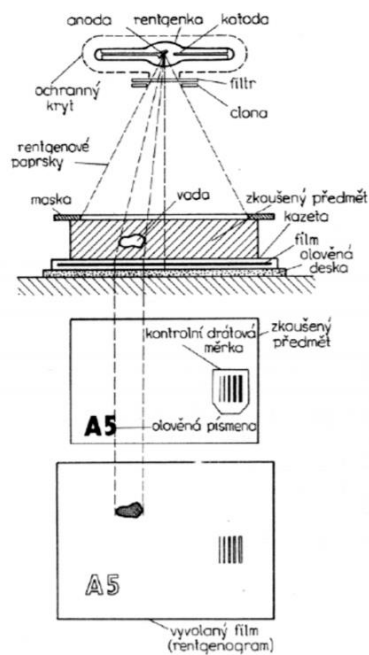
### 2.3.3 Použití

Nástroje AE jsou navrženy pro monitorování akustických emisí produkovaných materiálem během poruchy nebo napětí, nikoli pro vliv materiálu na externě generované vlny. V praxi jsou na tělese umístěné snímače akustické emise, které těleso monitorují a zaznamenávají akustické signály. Těleso lze monitorovat během bezobslužného monitorování a v případě zjištění akustické emise v důsledku nějaké strukturální změny jsou uživatelé upozorněni. Metoda je schopna detekovat počáteční fázi iniciace defektů ve struktuře a tím předejít fatálním následkům. Metodu lze aplikovat v následujících oblastech [10]:

- Detekce těsnosti zařízení
- Tlakové zkoušky
- Detekce a monitoring strukturálních defektů
- Postprodukční kontrola svarových spojů při jejich chladnutí
- Výzkum v oblasti kompozitních tlakových nádob a únavy materiálu

## 2.4 Zkouška rentgenovým zářením

Rentgenové záření je používané při zkouškách svarů tlakových nádob, potrubí, konstrukcí atd. Rentgenové záření je elektromagnetické vlnění s velmi malou vlnovou délkou, kratší než je délka viditelného světla. Když prochází rentgenové záření materiálem, dochází k oslabení jeho intenzity podle materiálových vlastností materiálu jako je hustota nebo tloušťka. Za zkoumaný objekt je vložen detektor (např. film). Při prozáření vznikne na fotografickém filmu v místě vady tmavší obraz, díky oslabení materiálu vadou jako je vzduchová bublina, trhlina, vměstek.



Obrázek 5 Schéma rentgenové zkoušky materiálu [13]

## 3 Audio signál a jeho zpracování

Audiosignály jsou dominantní složkou vnímání okolního světa každého člověka. Akustické signály jako jsou řeč nebo hudba jsou základem mezilidské komunikace a společnosti. V dnešní době si můžeme všimnout velkého rozvoje akustické komunikace mezi lidmi a stroji, která se stále zlepšuje. Pohyb mechanických soustav se projevuje také vznikem zvuků, které lze studovat a uvádět v souvislost charakter zvuku a stav mechanického systému. Zvuky lze tedy využít k průběžnému nebo plošnému zjišťování problémů zařízení.

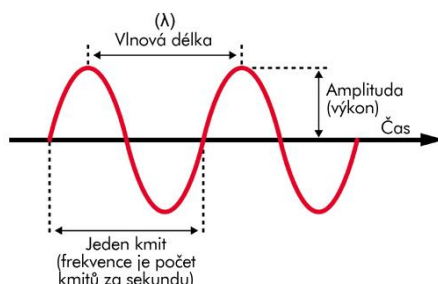
### 3.1 Zvuk

Zvuk chápeme jako mechanické vlnění v látkovém prostředí, které je schopno vyvolat sluchový vjem. U člověka dokáže vyvolat sluchový vjem vlnění o frekvenci od 16 Hz do 20 000 Hz. Přestože vlnění mimo tento frekvenční rozsah u člověka nevyvolává, je často také označováno jako zvuk. Někteří živočichové dokážou vnímat vlnění i mimo lidskou slyšitelnou frekvenci, a tedy označení pro vlnění s frekvencí mimo slyšitelnou oblast 16-20000 Hz není chybné. Zvuk s nižší frekvencí než 16 Hz se nazývá infrazvuk a zvuk s vyšší frekvencí než 20 kHz se nazývá ultrazvuk. Infrazvuk jsou schopni vnímat například sloni. Ultrazvuk jsou schopni vnímat zase například kočky, psi, delfíni či netopýři. [\[15\]](#) [\[21\]](#)

Zvukem komplexně přes celé frekvenční pásmo společně s ději, které se zvuky souvisí, jako jsou vznik, šíření a vlnění se zabývá vědní disciplína zvaná akustika. Jedná se o rozsáhlý vědní obor, který zaštiťuje velké množství dílčích disciplín. Zvuky můžeme rozdělit na tóny a hluky. Tóny, též označovány jako hudební zvuky, jsou žádoucí akustické signály, které jsou generovány například hudebními nástroji. Hluky jsou nežádoucí akustické signály označovány též jako nehudební zvuky, které mohou být lidskému zdraví škodlivé a lze je považovat za akustický smog. V současné době je moderní akustika převážně zaměřena na nežádoucí akustické signály, hluky. [\[16\]](#) [\[20\]](#)

Zdrojem infrazvuku a nízkofrekvenčních zvuků mohou být přírodní jevy jako například bouřka, zemětřesení, laviny, vulkanická činnost nebo silný vítr. Infrazvuky také mohou být vytvářeny uměle jako vedlejší produkt například provozu elektráren, při provozu průmyslových a technických strojů a zařízení. Jedním z nejvýznamnějších zdrojů nízkofrekvenčního vlnění jsou dopravní prostředky, na jejichž vlivy je v poslední době kladen velký důraz. [\[16\]](#)

Každý zdroj zvuku je zdrojem mechanického kmitání, které se šíří prostředím. Každá akustická vlna má vlnovou délku, frekvenci a intenzitu. Zvukové vlnění se šíří prostředím, a když udeří energie do molekul prostředí, způsobí, že molekuly začnou vibrovat a vytváří vlnu, která přenáší zvukovou energii. [18]



Obrázek 6 Základní parametry mechanické vlny [19]

Vlnění je vhodné popsat tvarem, který umožňuje určit okamžitou výchylku v kterémkoliv bodě v libovolném časovém okamžiku. [18]

$$y = y_m \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = y_m \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) \quad (1)$$

Kde:  $y$ -okamžitá výchylka;  $y_m$  – maximální amplituda;  $t$ - čas;  $T$ - perioda;  $\lambda$ - vlnová délka;  $x$ - poloha  $x$ ;  $v$ - rychlost vlnění;  $\omega$ - fázová rychlost

Rychlost zvuku je základní vlastností materiálu. Velikost rychlosti zvuku v daném materiálu závisí nejen na hustotě daného materiálu, ale také na jeho pružnosti, která je ovlivněna velikostí vazebných sil mezi molekulami. Pevná látka dokáže velice dobře zvuk přenášet. Kapaliny nejsou moc dobré při přenosu zvuku a plyny jsou nejhorším přenašečem. Na šířící se zvukovou vlnu má velký vliv prostředí. Rychlost zvuku není tedy konstantní a závisí na fyzikálních parametrech jako je teplota, tlak, vlhkost a další. Závislost rychlosti zvuku ve vzduchu můžeme matematicky vyjádřit zjednodušeným vztahem (2). [18] [20] [21]

$$c = (331,57 + 0,607 * t)ms^{-1} \quad (2)$$

Kde:  $t$ - teplota ve stupních Celsia;  $c$ - rychlost zvuku

V tabulce 1 můžeme vidět rozdíly mezi jednotlivými materiály, kde vidíme jasný vliv materiálového skupenství.

Tabulka 1 Porovnání rychlosti zvuku v různých prostředích [22]

Látka	Rychlost m/s	Rychlost km/h
Oxid uhličitý (25 °C)	259	932
Kyslík (25 °C)	316	1138
Suchý vzduch (0 °C)	331	1193
Suchý vzduch (25 °C)	346	1247
Helium (0 °C)	970	3492
Vodík (0 °C)	1270	4572
Rtuť (20 °C)	1400	5040
Mořská voda (13 °C)	1500	5400
Led (-4 °C)	3250	11700
Měď (20 °C)	3500 / 4720	12600 / 16992
Ocel (20 °C)	5000 / 6000	18000 / 21600
Sklo (20 °C)	5200	18720
Hliník (20 °C)	5200 / 6400	18720 / 23040

### 3.2 Záznam zvuku

Předtím, než můžeme audio signál vizualizovat a dále zpracovávat, je nejprve potřeba jeho dostatečně věrné zaznamenání. Záznamem zvuku vytvoříme audiozáznam, který můžeme znovu reprodukovat. K vytvoření audiozáznamu používáme mikrofony, které slouží jako akusticko-elektrický převodník a dokážou přeměnit akustické vlnění na elektrický signál. Děje se tak pomocí citlivé membrány, která zachycuje akustické vlny jako pohyb. Membrána je spojena se systémem, který vytváří elektrický signál, který je obrazem daného zvuku.

. Nahrávání a reprodukce zvuku může být mechanický, elektromagnetický nebo optický způsob. Základní typy mikrofonů podle principu fungování jsou: [23]

- Kondenzátorový
- Piezoelektrický
- Elektretový

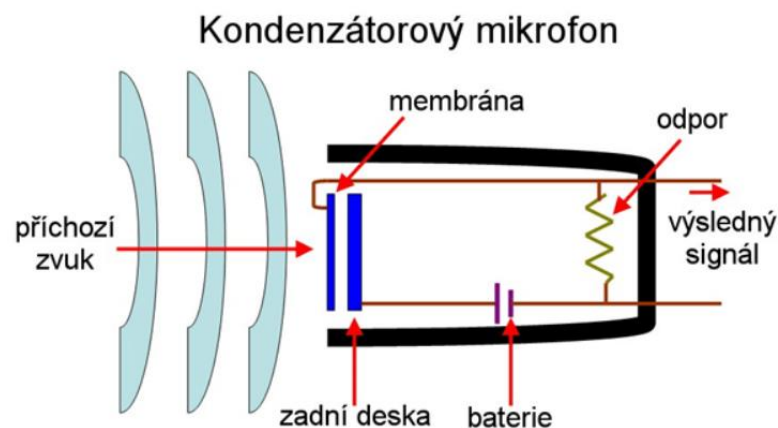
- Dynamický
- Uhlíkový
- Krystalový

### 3.2.1 Mikrofony

Představení fungování mikrofonu bude přestaveno na kondenzátorovém a dynamickém mikrofonu.

#### 3.2.1.1 Kondenzátorový mikrofon

Kondenzátorový mikrofon patří mezi nejkvalitnější a mezi nejuniverzálnější mikrofony. Byl vytvořen roku 1916 vynálezem jménem Edward Christopher Wente. Jeho princip spočívá na principu změn elektrického napětí, způsobený změnou kapacity. Pro záznam zvuku mikrofon používá vodivou pohyblivou membránu z kovu nebo pokovené plastové fólie a pevně umístěnou elektrodu. Membrána a elektroda jsou od sebe vzdáleny 0,02mm. Přední membrána reaguje na mechanické kmity, které stlačují přední desku kondenzátoru a tím mění kapacitu mikrofonu. Změna kapacity vyvolá v obvodu proud a vzniká elektrický signál. Schéma obvodu v mikrofonu lze vidět na obrázku č.7 (Obrázek 7). [26][27]

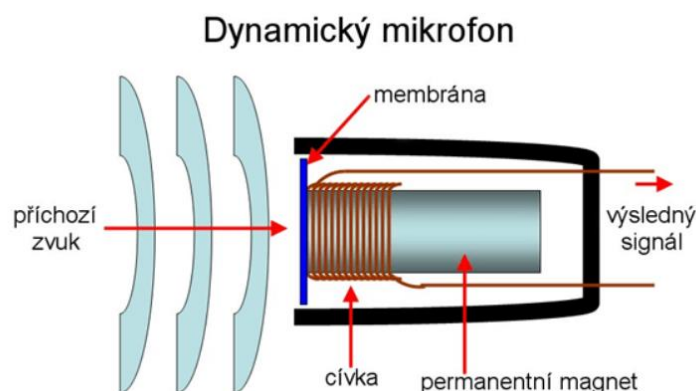


Obrázek 7 Schéma kondenzátorového mikrofonu [26]

#### 3.2.1.2 Dynamický mikrofon

Patnáct let po vynálezu kondenzátorového mikrofonu stejný člověk vymyslel první dynamický mikrofon. Tento typ je také široce využíván a jeho využití je především k nahrávání velmi hlasitých zvuků, tím že jeho konstrukce dokáže odolat většímu akustickému tlaku. Principem mikrofonu je pohyblivá membrána, která je tentokrát připevněna k cívce a zachytává mechanické vlny. Cívka se v návaznosti na mechanické vlny zachycené na membráně pohybuje v magnetickém poli a tím indukuje napětí, a tím vzniká elektrický proud. Vzniklý elektrický proud je ovšem velmi malý a je potřeba použít

transformátor. Schéma obvodu v mikrofону lze vidět na obrázku 8 (Obrázek 8). [26][27]



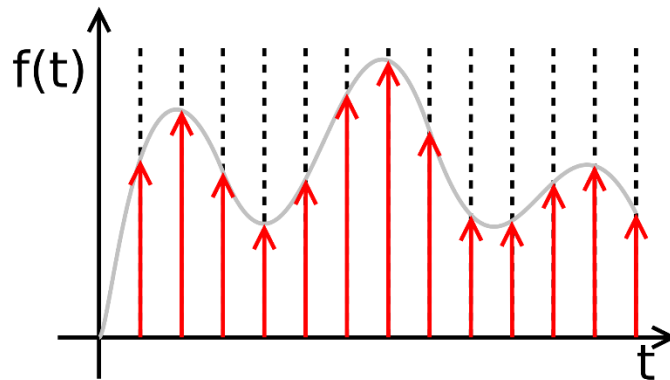
Obrázek 8 Schéma obvodu dynamického mikrofónu. [26]

## 3.3 Digitalizace

Digitalizace signálu je proces, při kterém převádíme analogový signál do digitální podoby. Proces digitalizace se skládá ze dvou kroků, vzorkování a kvantování. Nejprve probíhá vzorkování, ke kterým je následně přiřazena hodnota. Druhým krokem je kvantování signálu. Po provedení zmíněných kroků dostaneme digitální a diskretní signál.

### 3.3.1 Vzorkování

Vzorkováním dokážeme ze spojitého analogového signálu získat omezený počet vzorků v určitých pravidelně se opakujících časových intervalech (vzorkovací perioda) a tím signál diskretizovat. Ze spojitého signálu si bereme prvky v pouze některých časových okamžicích. Platí, čím víc vzorků z daného analogového signálu vezmeme, tím přesnější dostaneme digitální reprezentaci signálu. Při procesu vzorkování musíme dbát na vzorkovací periodu  $T_{vz}$  a vzorkovací frekvenci  $f_{vz}$ , které jsou nejdůležitějšími parametry pro vzorkování signálu. Vzorkovací perioda je vzdálenost (doba) mezi dvěma sousedními vzorky v sekundách a vzorkovací frekvence je převrácená hodnota  $T_{vz}$  v jednotkách Hz. Naznačení procesu vzorkování lze vidět na obrázku níže (Obrázek 9). [18] [29] [30]



Obrázek 9 Vzorkování bez kvantizační úrovně [32]

Pro získání kvalitního signálu po vzorkování je podmínkou dodržet Shannon-Kotělnikův (Nyquistův) vzorkovací teorém, který říká, že vzorkovací frekvence  $f_{vz}$  musí být větší než dvojnásobek nejvyšší frekvence harmonické složky obsažené ve vzorkovacím signálu. Teorém můžeme vyjádřit vztahem (3)

$$f_{vz} > 2f_{max} \quad (3)$$

$f_{max}$  (Hz) – maximální frekvence v signálu

V praxi se vzorkovací frekvence volí ještě o něco málo větší než dvojnásobek maximální frekvence jako taková rezerva pro zaručení dobrého vzorkování. Při dodržení Shannonova – Kotelnikova teorému je možná přesná rekonstrukce spojitého signálu bez aliasingu<sup>2</sup>.

### 3.3.2 Kvantování

Při procesu kvantování se jedná o úrovněovou diskretizaci neboli diskretizaci oboru hodnot. Proces je ztrátový a nevratný. Tento proces se provádí v tzv. kvantizéru a podstatou jeho činnosti je zaokrouhlení hodnot signálu získaného při vzorkování na předem definované tzv. kvantizační hladiny. Při kvantování přiřazujeme velikost jednomu vzorku pomocí kvant. Velikost daného vzorku je přiřazena pomocí kvantovacích hladin. Počet kvantovacích hladin závisí na zvoleném bitovém kódování kvantování, které je dáno  $2^N$ . Zvuková technika využívá často 16bitového kvantování, což znamená, že počet kvantovacích hladin bude  $2^{16}$ , tedy 1 048 576. Můžeme rozlišovat dva základní druhy kvantování.

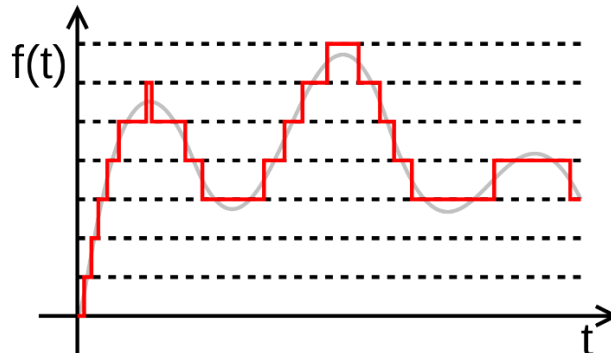
- Lineární – kvantizační hladiny jsou od sebe stejně vzdáleny.

<sup>2</sup> Aliasing je nežádoucí jev, který může vzniknout při nesprávně zvolené vzorkovací frekvenci, při čemž dojde ke ztrátě důležitých informací v signálu a diskretizovaný signál neodpovídá reálnému spojitému signálu.



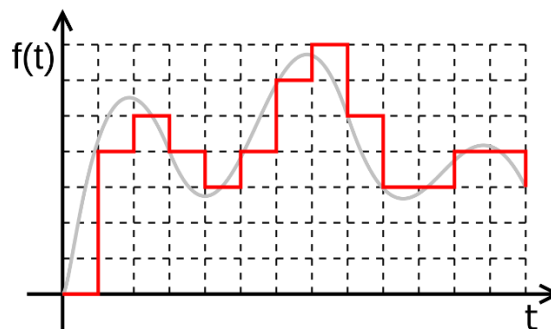
- Nelineární – kvantizační hladiny nejsou od sebe stejně vzdáleny a jejich vzdálenost je přizpůsobena konkrétním účelům

Nedostatečný počet kvantizačních hladin může způsobit kvantizační šum, při kterém může docházet ke zkreslení původního analogového signálu. [18] [28] [29][30]



Obrázek 10 Kvatizovaný signál bez vzorkování [32]

Jak bylo napsáno v úvodu této sekce, výsledkem vzorkování a kvantizace dostáváme digitální signál.

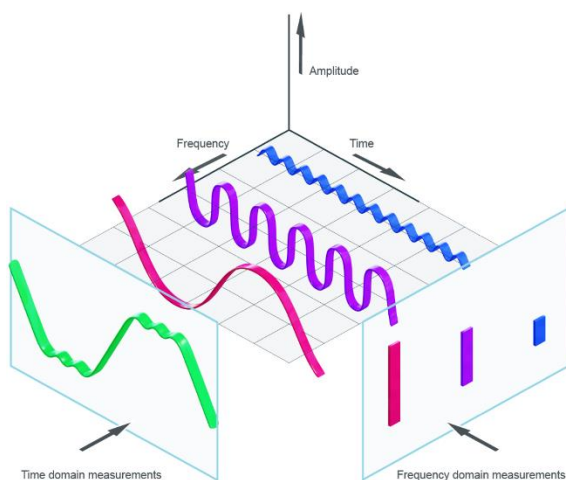


Obrázek 11 Výsledný digitální signál [32]

### 3.4 Fourierova transformace

Fourierova transformace (FT) je integrální transformace, která slouží pro převod signálu z časové do frekvenční domény a nazpět. Ve frekvenční doméně se zobrazí složky vlnění vytvářející signál a jejich intenzity a získá se tzv. spektrum signálu. Transformace je vyjádřena pomocí harmonických funkcí sinus a cosinus. Spektrum není závislé na čase a lze si je představit jako pole všech možných frekvencí, kde každý index odpovídá intervalu určitému frekvenčnímu pásu. Jednotlivé pásy obsahují informaci o tom, jak moc je daná frekvence v analyzovaném signálu zastoupena. Existují dva typy Fourierovy transformace, a to spojitá a diskrétní. Spojitá FT pracuje se spojitým časem, a tedy spojitou časovou doménou, kterou převádí do spojitého spektra. Diskrétní FT naopak pracuje s diskrétním časem a diskrétním spektrem. Při práci s digitálním signálem softwarově využívají pro výpočet diskrétní Fourierovy

transformace algoritmu, který se nazývá Fast Fourier Transform označovaný jako FFT. [33] [34] [35]



Obrázek 12 Představení časové a frekvenční domény [35]

### 3.4.1 Diskrétní Fourierova transformace

V případě, kdy pracujeme s digitálním signálem, tak muselo proběhnout vzorkování a tedy v takových případech se využívá diskretní FT. Diskretní FT našla velké uplatnění s vývojem výpočetní techniky, protože záznamy reálných měření zpracovatelné na počítači jsou ve většině případů diskretní a v softwarech dále využíváme diskretní transformaci, která je spočítána podle algoritmu FFT. Definice diskretní Fourierovy transformace je popsána vztahem (4). [33] [34] [35]

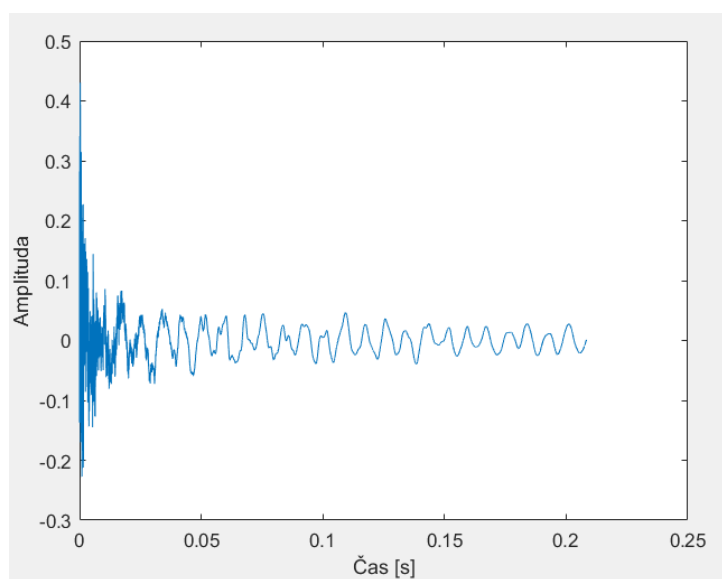
$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] * e^{-j2\pi \frac{k}{N}n} \quad (4)$$

Kde:  $X[k]$  – výsledek transformace;  $k$  – index DFT ve frekvenční oblasti;  $x[n]$  vstupní signál;  $n$  – daný vzorek;  $k/N$  – normovaná frekvence.

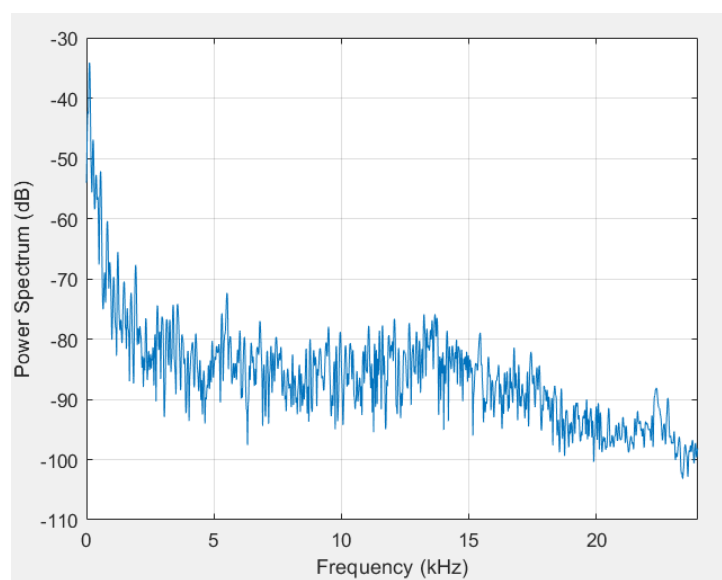
Normovaná frekvence je frekvence vztažená k vzorkovací frekvenci  $f_{vz}$ . Normovaná frekvence je bezrozměrná veličina a je dána vztahem (5).

$$f = \frac{f_{skutečná}}{f_{vz}} \quad (5)$$

Kde:  $f$  - normovaná frekvence [-];  $f_{vz}$  – vzorkovací frekvence



Obrázek 13 Vstupní signál v časové doméně



Obrázek 14 Frekvenční spektrum signálu

## 4 Základní parametry zvuku pro analýzu v prostředí Matlab

Pro klasifikaci a popis akustického signálu je důležité ze záznamu zvuku extrahovat jeho charakteristické parametry. Takovému procesu přezdíváme parametrizace. Získané parametry dále slouží k porovnání několika akustických signálů a jejich rozlišení. Zpracování akustických signálů obsahuje jejich analýzu v časové i frekvenční doméně. Pro analýzu v časové doméně využíváme základní statistické metody. Při frekvenční analýze využíváme možnosti Fourierovy transformace. Ze získaných parametrů je možné vyhodnotit signál a nalézt například odlišnosti mezi dvěma signály. [20] [36]

Dle popisu signálu lze parametrizaci dělit na:

- neparametrický popis signálu – vychází z poznatků o zpracování signálu (filtrace, Fourierova transformace, korelace atd.)
- parametrický popis signálu – Vychází z vlastností akustického signálu vztahených k mechanismu vzniku signálu.

V této bakalářské práci k analýze akustických signálů budeme využívat výpočetní program Matlab, a tedy další text se bude věnovat akustické analýze v tomto prostředí. [20] [36]

### 4.1 Matlab

Matlab, jak už bylo zmíněno v úvodu ([Úvod](#)), je výpočetní technický program, který poskytuje programovací jazyk vysoké úrovně. Kromě programovacího jazyka prostředí Matlabu nabízí interaktivní prostředky pro vývoj, vizualizaci a analýzu dat, možnost tvorby aplikací s grafickým rozhraním a samozřejmě prostředí pro provádění numerických výpočtů. V historii byl program využíván pro univerzitní účely, ale postupem času byl zdokonalen a v dnešní době je používán i pro komerční účely především v technické oblasti. Program nabízí širokou škálu předpřipravených funkcí a algoritmů, které mohou být využity pro analýzu dat z nejrůznějších odvětví. Prostředí nabízí editor kódu, ladící program (debugger), analyzátor kódu a také nápovědu k programovacímu jazyku. Matlab dále disponuje velkým počtem knihoven. [37] [31]

Matlab je zkratkou anglického spojení slov Matrix Laboratory, což lze přeložit jako maticová laboratoř. Jako základní datový typ je tedy použita matice. Typy jako vektor, skalár a více rozměrné pole jsou jen speciálními případy matic (v novějších verzích je zaveden objektový přístup). Programovací jazyk podporuje OOP. [37]

Veškeré výše popsané možnosti programovacího prostředí zvyšují pohodlí práce s programem a jeho efektivitu. Další jeho velkou výhodou je snadné rozšíření o další uživatelem nadefinované funkce v podobě M-souborů (z angl. M-file) či o celé aplikace. K Matlabu lze také jednoduše přidat řadu specificky zaměřených nadstaveb, tzv. toolboxů, které jsou zaměřeny na konkrétní problematiku a nabízí velkou škálu předpřipravených funkcí, což je vlastně sbírka předdefinovaných M- souborů. Výše zmíněné funkce a výhody pomáhají ke snadnému užívání programu a je vhodný pro použití v praktické části této bakalářské práce [38]

## 4.2 Manipulace s audio daty

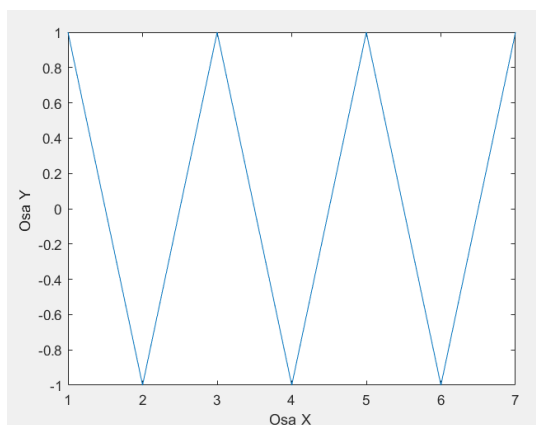
Program Matlab podporuje zvukové soubory ve formátech WAV, AVI, FLAC, MP3, MPEG-4 AAC. Všechny tyto formáty dokáže nahrávat i přehrávat. Nejpoužívanějším formátem v prostředí Matlab je formát WAV, se kterým bylo pracováno v praktické části této práce. Formát WAV (z angl. Waveform Audio Format) byl vyvinut americkými společnostmi Microsoft a IBM. Jedná se o bezztrátový formát a soubory uložené v tomto formátu nesou příponu .wav. Zaznamenaný zvukový soubor v tomto formátu obsahuje kromě vlastních dat také informace nutné pro správnou interpretaci, jako jsou použitá vzorkovací frekvence, počet kanálů, bitové rozlišení a další identifikátory. Níže (vztah(6)) je ukázka jedné z možných syntaxí, jak lze v prostředí Matlabu načíst zvukový signál. [38]

$$[y, Fs] = \text{audioread}(\text{"filename"}) \quad (6)$$

Příkaz (6) přečte data ze souboru „filename“ a vytvoří dvě proměnné pro vzorkovaná data, kde je každý vzorek uložen jako reálná číselná hodnota- $y$  a pro použitou vzorkovací frekvenci  $F_s$ . Proměnná  $y$  je uchována v jednom nebo více sloupcových vektorech v závislosti na tom, zda je zvukový záznam jednokanálový (mono), dvoukanálový (stereo) nebo vícekanálový. [20]

Prostředí Matlab také nabízí nahrání zvukového signálu prostřednictvím příkazů *waverecord* nebo *audiorecorder*, při čemž je zapotřebí připojený mikrofón do požadovaného vstupu počítače.

Při načteném audio signálu můžeme provést vizualizaci dat. K vykreslení základního časového průběhu signálu se využívá příkaz *plot* na obrázku níže (Obrázek 15). V programu je samozřejmě možné zvukové záznamy přehrát, což je u akustických signálů v slyšitelné oblasti velice užitečné a žádoucí. V takovém případě můžeme použít například příkazu *sound*, který zvukový záznam přehraje. [37] [38]



Obrázek 15 Ukázka příkazu plot

Výše zmíněné příkazy jsou jen ukázkou, jak je možné v prostředí Matlabu se zvuky pracovat. Ovšem v případě hlubší analýzy a klasifikace zvuků je zapotřebí využití matematických operací pro zjištění požadovaných charakteristik a funkce konkrétního toolboxu pro následné vyhodnocení. [38]

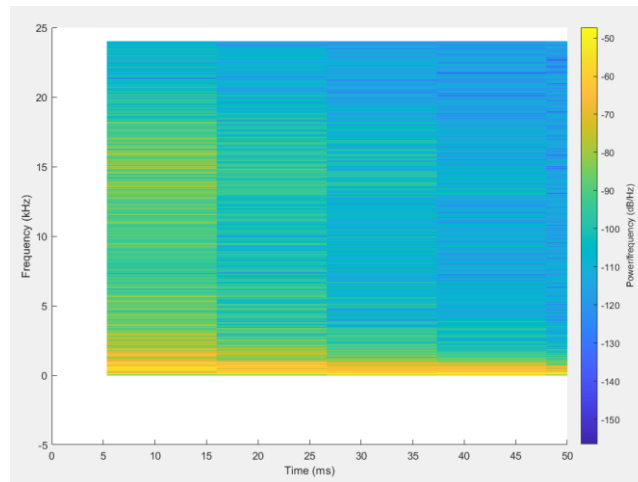
## 4.3 Rozdělení na rámce

Při práci s akustickým signálem je vhodné analyzovaný objekt rozdělit na rámce (frames). Akustický signál je považován za náhodný. Pro potřeby analýzy daného signálu je žádoucí získat jeho krátké časové úseky, které můžeme považovat za stacionární. Pro rámec jsou důležité hodnoty: délka, překrytí a posun. Okénko se přizpůsobí daným potřebám a daným akustickým signálům, u kterých je klíčová délka zkoumaného zvuku a vzorkovací frekvence. [36]

Pro výběr rámců signálu a pro selekci analyzovaného signálu se využívají okénkové funkce. Úkolem okénkové funkce je vybrat část analyzovaného signálu, aby jeho spektrum bylo co nejvhodnější pro extrakci parametrů. Nejčastěji používaným „okénkem“ je Hammingovo okno, které se vyznačuje tím, že maximum signálu je orientováno uprostřed a utlumením spektra na krajích. [36]

## 4.4 Spektrogram

Spektrogram je grafické zobrazení akustického záznamu, které nám podává detailní a vizuálně přívětivý záznam signálu, na kterém lze sledovat rozložení frekvencí v čase. Barevná škála spektrogramu udává energii analyzovaného signálu. Existují 2D spektrogramy, kde na jedné ose je čas na druhé frekvence a barva znázorňuje amplitudu. U 3D spektrogramů je amplituda reprezentovaná třetím rozměrem. Ukázka spektrogramu jednoho poklepu do materiálu o délce 0,2s je na obrázku níže (Obrázek 16).



Obrázek 16 Příklad spektrogramu v prostředí Matlab

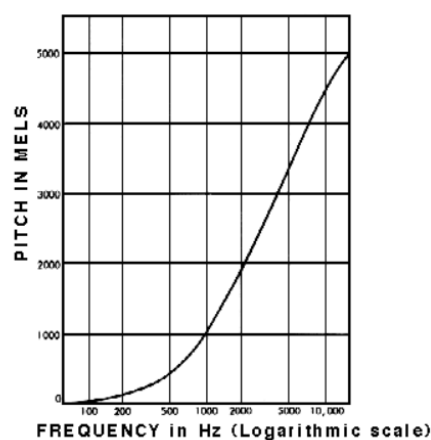
## 4.5 MelSpektrogram

Studování zvuku ukázalo, že lidé nevnímají frekvence podle lineárního měřítka. Lidé spíše rozpoznají rozdíly u nízkých frekvencí než u vysokých. Například člověk dokáže jednoduše rozlišit zvuky o frekvenci 500 Hz a 1000 Hz, ale velmi složitě člověk rozliší zvuky o frekvencích 10 000 Hz a 10,500 Hz, přestože vzdálenost mezi páry zvuků je stejná. [40] [41]

Převod z Herzů na Mely:

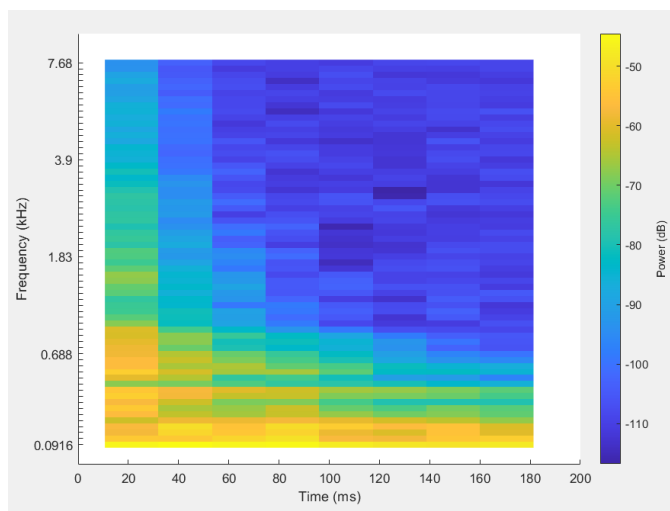
$$F_{Mel} = 2959 * \log_{10} \left( 1 + \frac{F_{Hz}}{700} \right) \quad (7)$$

Z těchto důvodů byla navržena roku 1937 jednotka výšky tónu uzpůsobená lidskému uchu, tak aby posluchači rozdíly ve frekvencích zvuku připadaly stejně vzdálené.



Obrázek 17 Mel stupnice [39]

MelSpektogram je poté grafické zobrazení stejné spektrogramu, kde jsou frekvence převedeny do mel stupnice. Tedy MelSpektogram logaritmicky vykresluje frekvence nad určitou prahovou hodnotu, kterou člověk již vnímá rozdílně. Například v lineárně škálovaném spektrogramu je vertikální prostor mezi 1 000 a 2 000 Hz polovinou vertikálního prostoru mezi 2 000 Hz a 4 000 Hz. V melSpektogramu je prostor mezi těmito rozsahy přibližně stejný. Toto měřítko je analogické lidskému sluchu, kde je pro člověka snazší rozlišovat mezi podobnými nízkofrekvenčními zvuky než podobnými vysokofrekvenčními zvuky. [40] [41]



Obrázek 18 Příklad melSpektogramu v prostředí Matlab

## 4.6 Statistické zpracování signálu

Audio signál se řadí do signálů stochastických, a tedy pro jeho zpracování může být výhodné použít metody statistického zpracování. Tyto metody mohou být použity v časové doméně, tak i ve frekvenční doméně. Samotné statistické výpočty zvuk neklasifikují, ale je výhodné použít získaných charakteristik v případě, kdy od sebe chceme rozlišit nějaký určitý počet signálů. Dobrým ukazatelem mohou být statistické charakteristiky v případě rozdělení jen dvou zvuků. [42]

### 4.6.1 Střední hodnota

Střední hodnotou rozumíme statistickou veličinu, která se obvykle používá, máme-li na mysli přesný parametr  $\mu$  popisující skutečný střed (průměr) základního souboru. Střední hodnota je též označována jako populační průměr. Zvuk převedený do digitální podoby obsahuje diskrétní data, vektor  $x$ . Střední hodnota na diskrétních datech se vypočítá podle vzorce (8). [42]



$$\mu = \sum_i x_i p_i \quad (8)$$

Kde:  $\mu$  ...střední hodnota populace o  $N$  prvcích;  $x_i$  ...množina vzorkovaných hodnot;  $p_i$  ...pravděpodobnost výskytu dané hodnoty.

V případě digitalizovaného stacionárního náhodného signálu, jehož hustota pravděpodobnosti není závislá na čase a je uložen v podobě vzorkovaných dat délky  $N$ , což znamená, že je k dispozici pouze jeho jediná realizace (zaznamená časový průběh), lze všechny vzorkované hodnoty považovat za statistický výběr se stejnou pravděpodobností výskytu  $p_i$ . Pravděpodobnost  $p_i$  lze tedy vyjádřit jako  $p_i = 1/N$  a výpočet střední hodnoty se nám změní na výpočet běžného aritmetického průměru souboru dat podle vzorce (9). [44]

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \quad (9)$$

Kde:  $N$  ...délka analyzovaných dat

## 4.6.2 Maximum

Při hledání maxima u akustického signálu dostáváme velikost maximální energie obsažené v analyzovaném akustickém signálu.

## 4.6.3 Minimum

Získáme minimální energii obsaženou v analyzovaném akustickém signálu.

## 4.6.4 Medián

Medián dělí soubor hodnot tak, že je polovina hodnot menší než medián a druhá polovina větší než medián. U mediánu hraje roli počet prvků souboru, zda je sudý nebo lichý. U lichého počtu prvků soubor seřadíme od nejmenšího k největšímu; prvek uprostřed je medián. U sudého počtu prvků bereme dva prostřední prvky, ze kterých uděláme aritmetický průměr. Jeho základní výhodou je, že není ovlivněn extrémními hodnotami. Obecný vzorec pro výpočet mediánu je uveden níže (10)(11). [42]

jeli	n	$\tilde{x} = X_{\frac{N+1}{2}}$	(10)
liché			
číslo			

jeli	n	$\tilde{x} = \frac{X_N + X_{\frac{N+1}{2}}}{2}$	(11)
sudé			
číslo			

## 4.6.5 Peak to Peak

K určení parametru peak to peak potřebujeme znát maximální amplitudy signálu. Poté parametr peak to peak udává hodnotu danou rozdílem maximální a minimální amplitudy analyzovaného signálu. [48]

## 4.6.6 Efektivní hodnota RMS

V matematice je efektivní hodnota RMS (root mean square) definována jako odmocnina aritmetického průměru druhých mocnin daného souboru dat. Užitečná je u periodických veličin, jejichž hlavní využití je v elektrotechnice. Je možné ji také využít u akustických signálů. [43]

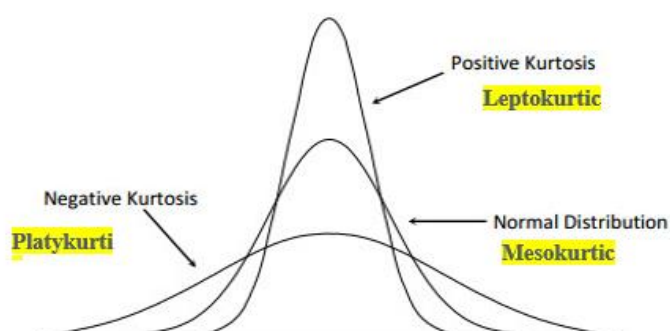
## 4.6.7 Standardní odchylka

Jedná se o statistickou veličinu, která měří rozptyl hodnot souboru vzhledem k jejím průměrům a vypočítá se jako druhá odmocnina rozptylu určením odchylek mezi jednotlivými datovými body vzhledem k průměru dle vztahu (12). Pokud jsou datové body dále od průměru, je vyšší odchylka. [42]

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

## 4.6.8 Kurtosis (Koeficient šikmosti)

Kurtosis je statistická veličina, která vyjadřuje plochost náhodné veličiny, v našem případě analyzovaného akustického signálu, vzhledem k jeho střední hodnotě. Zjišťuje, jak jsou data distribuována v okolí průměru. [46]



Obrázek 19 Grafické znázornění typů Kurtosis [46]

Podle parametru K- kurtosis můžeme rozlišovat tři druhy rozložení

- $K = 3$  Mesokurtic - jedná se o normální rozložení
- $K < 3$  Platykurtic - plošší rozdělení
- $K > 3$  Leptokurtic – špičatější rozložení

# Praktická část

## 5 Dotčené oblasti pro provedení experimentu

Praktická část této práce byla velice komplexní a obsáhla několik oblastí včetně elektrotechniky, robotiky, programování a výroby materiálu. Všechny dotčené oblasti stručně představím v této kapitole 5.

### 5.1 Zkoumaný materiál

Cílem této bakalářské práce je nedestruktivní zkouška materiálu, která si klade za cíl nalézt podpovrchové defekty v materiálu. V praktické části jsme zkoumali vlastnoručně vyrobený kompozit. V jednoduchých podmínkách laboratoře byl vyroben vzorek kompozitního materiálu o rozměrech 37x22cm se dvěma vrstvami rohoží s náhodně orientovanými sekanými skleněnými vlákny spojenými epoxidem.



Obrázek 20 Vyrobený kompozit s defekty

Mezi tyto vrstvy byl na dvou místech vložen umělý defekt simulující nespojení vrstev. Jako emulaci defektů jsme použili fólii čtvercového průřezu na obrázku

níže (Obrázek 21). Sklolaminát byl vhodným materiálem pro experiment i díky tomu, že je poloprůhledný a při experimentu jsme tak mohli snadno ověřovat správnost dat.



Obrázek 21 Uměle vytvořené defekty

Vytvořená deska sloužila jako materiál, se kterým bylo při experimentu pracováno a veškeré výsledky se váží právě k tomuto subjektu. Defekty je možné odhalit poklepem, ovšem jen v případě, kdy deska neleží celou svojí plochou na stole nebo jiné podložce. Deska musí být zavěšená nebo jinak přichycená ve vzduchu. To ovšem pro pokus, kdy desku poklepává robotické rameno, není vhodné. Proto bylo využito ploché obdélníkové nádoby, do které byla nalita voda, na kterou se deska položila. Nádoba s vodou byla ještě zabalena do ochranné fólie jednak kvůli bezpečnosti s prací s robotem, a také aby zkoumaný materiál nebyl vystaven působení účinků vody a nebyl narušen. Takový způsob zaručil i lepší a jednodušší fixaci pozice v prostoru než varianta, kdy by byla deska zavěšena ve vzduchu. Nádoba s vodou a celá deska na vodní hladině je na následujících obrázcích (Obrázek 22, Obrázek 23) :



Obrázek 22 Vodní Nádoba s ochrannou fólií



Obrázek 23 Sklolaminátový kompozit na hladině vodní nádoby

Na desce jsou vyznačeny orientačně body, které budou sloužit jako vodítko při plánování cesty robotického ramene po desce. Volbou kapalin různé viskozity je možné "ladit" rychlost útlumu mechanických kmitů (voda, olej, líh, nebo voda o různých teplotách). V experimentu bylo ovšem pracováno pouze s vodou o pokojové teplotě, jakožto s nejdostupnějším materiálem.

## 5.2 Speciální koncovka

K experimentu bylo potřeba sestavit zařízení, které bude simulovat poklep do materiálu. Toto zařízení se následně připevní na konec robotického ramene, které bude naprogramované, tak, aby prošlo analyzovanou plochu materiálu.

Spojením koncovky a robotického ramene bude zaručen poklep na celé ploše materiálu.

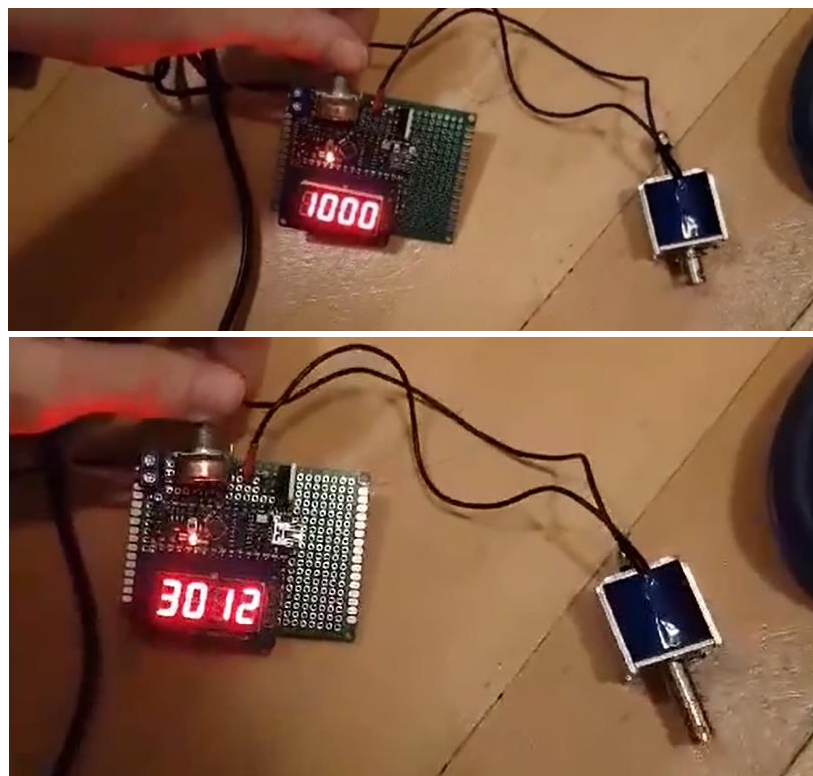
Na začátku procesu sestavení koncovky proběhla diskuse, jestli koncovka bude pracovat na mechanickém principu, kdy motorek bude vytvářet točivý pohyb, který bude jednoduchým mechanismem převeden na pohyb lineární. Od této varianty se upustilo z důvodu, že takto sestrojená koncovka by byla hlučná. Druhá varianta, která byla k experimentu zvolena, pracovala na principu elektromagnetu, kdy energie elektromagnetického pole je převáděna na mechanickou energii. K takové variantě byla použita elektromagnetická součástka *solenoid* (Obrázek 24), která pracuje na principu elektromagnetu. Je sestavena z dutého jádra a cívky. Přivedení proudu do cívky uvede do pohybu jádro. Ovšem, jak se později ukázalo, při takovém pohybu také dochází k hlasitému cvaknutí, které muselo být poté ve vyhodnocování z akustického signálu odstraněno.



Obrázek 24 Solenoid [47]

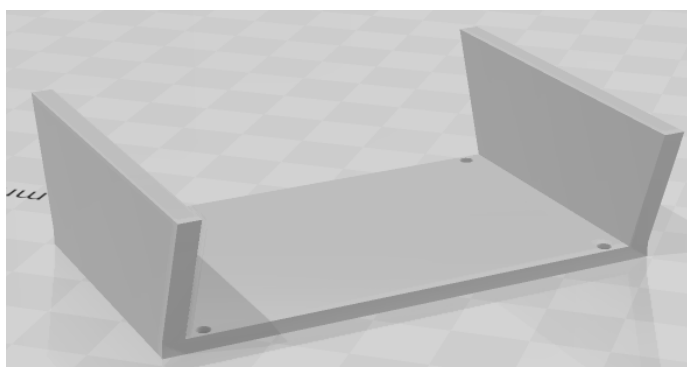
Proud proudící do solenoidu byl řízen pomocí mikročipu naprogramovaného v prostředí Arduino. Celý kód je v příloze ([Přílohy](#)). Součástí zařízení je rovněž display, indikující aktuální frekvenci koncovky, potenciometr, kterým se frekvence řídí a další nezbytné součástky. Frekvence lze nastavit v rozmezí 1-3Hz.



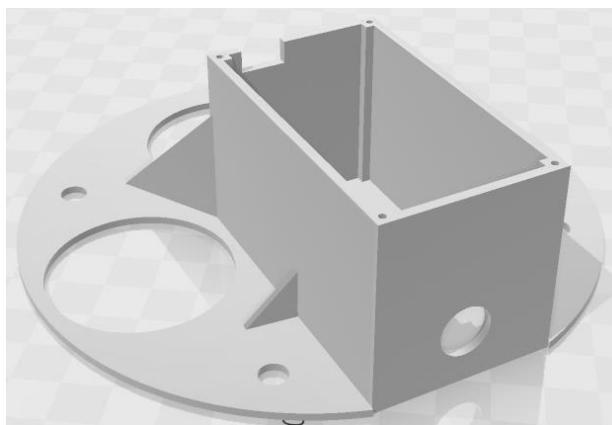


Obrázek 23 Zařízení nastavené na frekvence 1 a 3 Hz.

Aby bylo možné takto sestavenou součástku uchytit na konec robotického ramene, musel být vytvořen obal na součástku, která je kompatibilní s úchytným mechanismem robota. K vytvoření modelu bylo využito 3D tisku a modelovacího softwaru Fusion360. Obal se tisknul ve dvou kusech – víčka a těla. Oba kusy jsou zobrazeny na obrázcích níže.

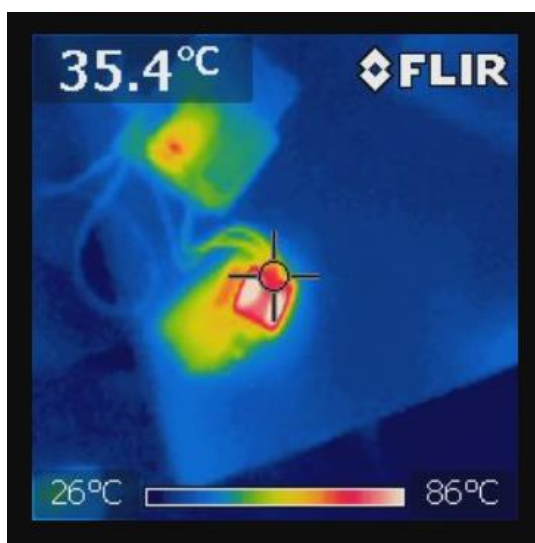


Obrázek 25 Víčko obalu pro elektro součásti



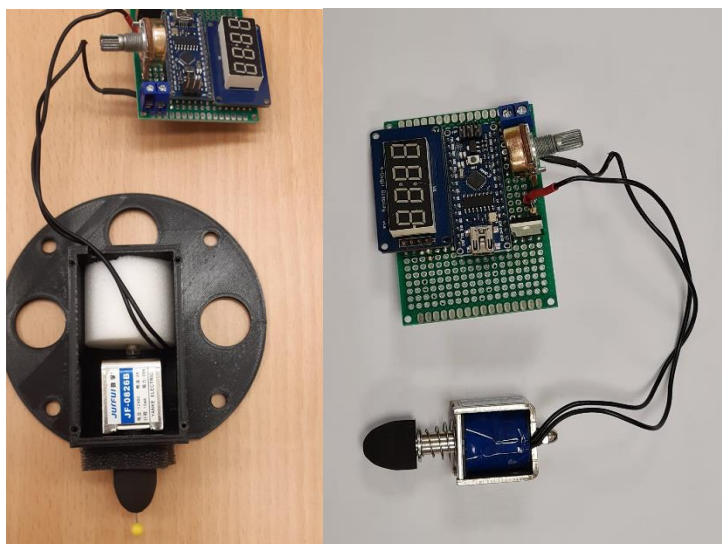
Obrázek 26 tělo obalu koncovky

Vzhledem k vysokému zahřívání solenoidu se při 3D tisku musel brát zřetel na materiál, ze kterého je obal tisknut. Zahřátí solenoidu dosahovalo 90 °C. Byl použit materiál PLA, který experiment vydržel, ovšem tento materiál není 100% vhodný, protože špatně snáší dlouhodobé teploty nad 60°C. Do budoucna je možné vylepšení a to za použití materiálu ABS, který si zachovává pevnost do 100°C nebo technickým řešením snížit teplotu koncovky.



Obrázek 27 Solenoid pod termokamerou

Jak bylo v textu výše zmíněno, i takto provedená koncovka při pohybu vydávala nežádoucí zvuk, který musel být při analýze akustického signálu odstraněn. Při sestavení byly provedeny i kroky pro mechanické odhlučnění v podobě jak pěnových vložek uvnitř obalu se solenoidem, tak i zvenku obalu. Kovový konec solenoidu byl nejprve doplněn dílem z pevné gumy. Takové zakončení ale nebylo schopné vybudit zvuk potřebné intenzity a charakteru ve zkoušeném objektu. Proto byla gumová část vybavena kulovou hlavičkou z tvrdého plastu, která sloužila i pro přesnější kontakt koncovky s materiálem. Kompletně sestavená koncovka je na následujících obrázcích.



Obrázek 28 Vnitřek obalu koncovky s pěnovými tlumiči

Obrázek 29 Kompletní mechanická část koncovky s gumovým nástavcem

## 5.3 Robotické rameno

Při experimentu nedestruktivní zkoušky materiálu bylo využíváno robotického ramene s názvem **KUKA Agilus KR 6 R700-2**. Robotické rameno bylo využíváno hlavně z důvodu dosažení určité míry automatizace a ušetření času a snadné opakovatelnosti při provádění zkoušky. Robotické rameno nám zaručí opakovaný pohyb po materiálu na jedno „kliknutí“. Stručný popis částí robota je popsán na obrázku níže (Obrázek 30).



Obrázek 30 Části robota [45]

Kde: 1 – Manipulátor; 2- Propojovací kabely; 3- Ovladač robota  
4- Manipulační konzole

Robot Agilus je šestiosý, to znamená, že je ovládán šesti osami, které se můžou natáčet v kinematickém prostoru povolených úhlových rozpětí, tak aby do sebe robot sám nenaboural nebo nedošlo k mechanickým potížím. Dle výrobce robot vyniká v několika oblastech [49]

- Maximální pracovní rychlost
- Maximálně přesný (v absolutní souřadné soustavě dosahuje předepsané polohy s přesností pod desetinu milimetru). Robot může pracovat i v potenciálně výbušných prostorách
- Prostorově úsporný. Robota je možné přizpůsobit každé montážní pozici a lze jej umístit třeba nad hlavou na stropě nebo bočně na stěně.
- Chráněný před elektrostatickým nábojem
- Nosnost robota je až 6 kg
- Dosah robota je až 700mm (proto označení KR6 R700)

Robot v reálném prostředí je vyfocen na obrázku níže (Obrázek 31)



Obrázek 31 Robot Kuka při experimentu

### 5.3.1 Program pro robotické rameno

Robotické rameno má v sobě zabudovaný software, který je zodpovědný za základní operace a funkce robota jako je data management, I/O management a plánovač trasy. Software se jmenuje The KUKA System Software (KSS) a běží na rozhraní varianty OS Windows. Uživatelsky se dá robot ovládat pomocí prostředí nazývané KUKA smartHMI (smart Human-Machine Interface), které umožňuje:

- Uživatelskou administraci
- Upravování programů
- KRL (KUKA Robot Language)
- Konfigurace
- A jiné

Programy, kterým robotické rameno úkolujeme, se programují v jazyce KRL (KUKA Robot Language). V praktické části bylo zapotřebí naprogramovat pohyb robota v rovině. Zvolili jsme lineární pohyb, který nám po řádcích projel celou zkoumanou desku. Program byl napsán na manipulační konzoli, zobrazené na obrázku č. 28. Ukázka programu je uvedena níže (Obrázek 32). Kompletní zdrojové kódy jsou obsažené v příloze [E.1](#) a [E.2](#). [\[49\]](#)

```
INI

SPTP HOME Vel=10% Default

SPTP P1 Vel=10% PDAT1 Tool[1]: Tool1 Base[0]

SLIN P2 Vel=0.04 m/s CPDAT1 Tool[1]: Tool1 Base [0]

SLIN P3 Vel=0.04 m/s CPDAT2 Tool[1]: Tool1 Base [0]

SLIN P4 Vel=0.04 m/s CPDAT3 Tool[1]: Tool1 Base [0]

SLIN P5 Vel=0.04 m/s CPDAT4 Tool[1]: Tool1 Base [0] |
.
.
.
.
.
```

Obrázek 32 Ukázka programu KRL

V kódu můžeme pozorovat pohyb robota z jednoho bodu do druhého. Příkaz SLIN určuje, jak se robot z počátečního bodu dostane do bodu koncového. V našem případě jde o lineární pohyb po přímce s rychlostí 0.04 m/s. Tool1 (nástroj) a Base (Báze) značí jakou prostorovou bázi, a který nástroj používáme. Báze i nástroj musely být před zprovozněním robota nastaveny a zkalibrovány.

### 5.3.2 Kompletní sestavení experimentu

S naprogramovaným robotem a nastavenou speciální koncovkou experiment probíhal tak, že robotické rameno, s nastavenou rychlostí úměrnou k nastavené frekvenci koncovky, projelo předem definovanou cestu nad materiálem. Koncovka poté svým „tukavým“ pohybem zprostředkovávala poklep do materiálu, který vybudil akustický signál, který byl zaznamenaný na mikrofón.



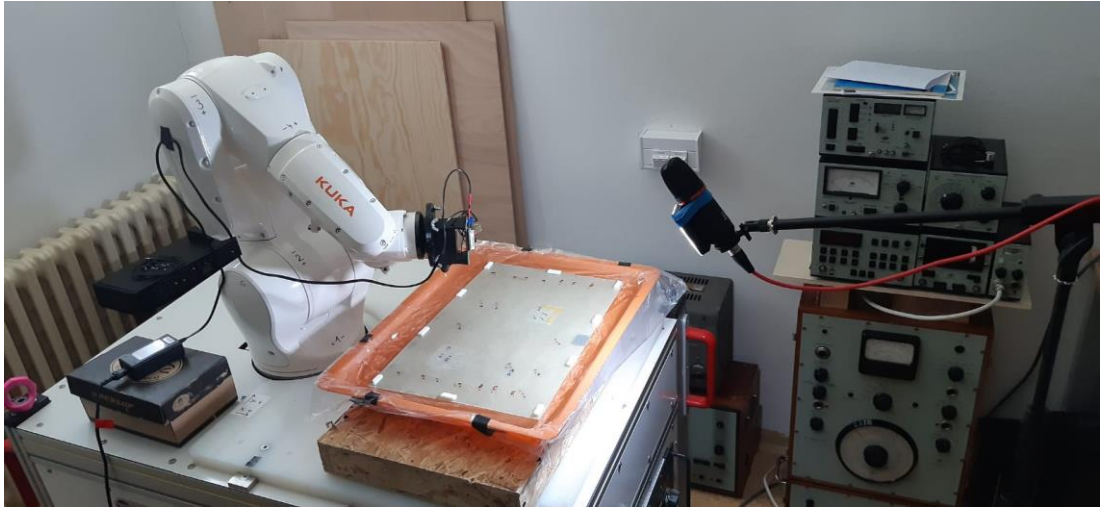


Obrázek 33 poloha koncovky při kontaktu s materiálem



Obrázek 34 Cesta robotického ramene nad materiálem

Celý setup experimentu po veškerém zkompletování je zachycen na obrázku č. 35.



Obrázek 35 Kompletní setup pro experiment

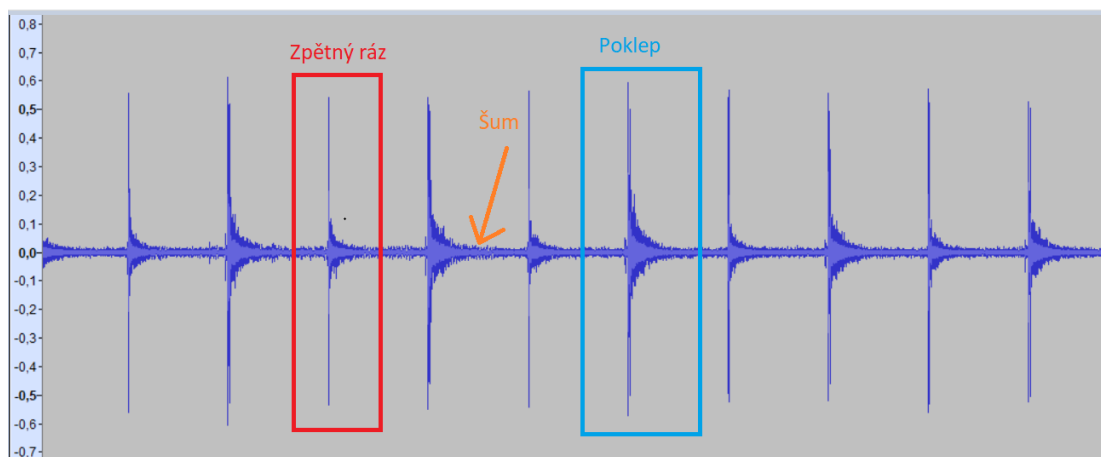
## 6 Vyhodnocení experimentu

Cílem experimentu bylo získat akustické nahrávky jednotlivých poklepů. Díky tomu musel být nahráván celý experiment od začátku do konce, tak abychom všechny poklepy zachytili. Ovšem do audio nahrávky se nedostaly jen zvuky poklepů, ale také okolní zvuky jako zvuk robota a šum nebo zvuk při zpětném rázu speciální koncovky. Celý audio záznam musel být v první řadě v několika krocích editován a poté mohl být vyhodnocen.

### 6.1 Získaná data a potřebná data

Pro vyhodnocení audio signálu z kompletního experimentu jsme kromě nahrávky experimentu potřebovali nahrát i další podpůrná data. Museli jsme nahrát samotný zvuk robota, abychom pak tento šum dokázali z nahrávky odstranit. Dále bylo potřeba nahrát zvuky poklepu pouze do neporušeného materiálu a poté pouze do porušeného materiálu, které sloužily pro konečné vyhodnocení.

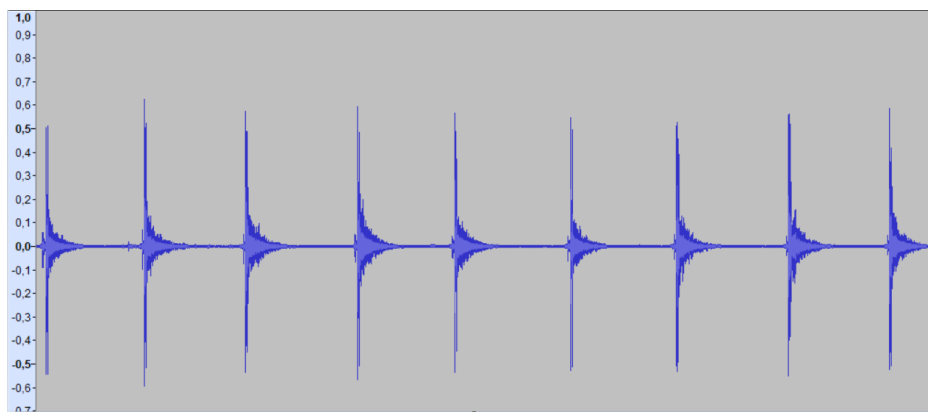
Do audio signálu vstupují zvuky z poklepů, zvuk robota, okolní šum a také zvuk zpětného rázu koncovky. Původní audio záznam je zobrazen na obrázku níže (Obrázek 36)



Obrázek 36 Záznam zvuku z experimentu

Na obrázku výše (Obrázek 36) můžeme vidět záznam poklepu do materiálu, zpětný ráz i šum mezi těmito dvěma zvuky. Pro kvalitní vyhodnocení v programu Matlab musíme odstranit šum a odstranit zvuk zpětného rázu. K odstranění šumu byl využit software Audacity a jeho funkce Noise Reduction. Upravený audio signál z nahrávky experimentu viz na obrázku níže (Obrázek 37). V audio signálu zůstaly pouze audiosignály z poklepů a šum společně se zvukem robota byly redukovány na možné minimum.





Obrázek 37 Upravený audiosignál

Jako další záznam jsme nahráli zvuky pouze z míst neporušeného materiálu a poté z místa porušeného materiálu. Úprava těchto záznamů probíhala stejně jako v předchozím případě, kdy jako první byl odstraněn šum a zvuk robota a následně zvuk zpětného rázu.

Normalizace, jak bylo zjištěno v tomto případě, není vhodná úprava. Robot se po zkoumané desce pohybuje a poklepy nejsou ve stejné vzdálenosti od mikrofону, což má za následek různou hlasitost poklepů. Navíc zpětný ráz je také o něco tišší než samotné poklepy a normalizace na takové audio nahrávce, jak se později ukázalo, poté zkresluje jednotlivé poklepy, které jsou vyhodnocovány vzhledem k samostatně nahraným poklepům do porušeného a neporušeného materiálu.

## 6.2 Vyhodnocení audiosignálu

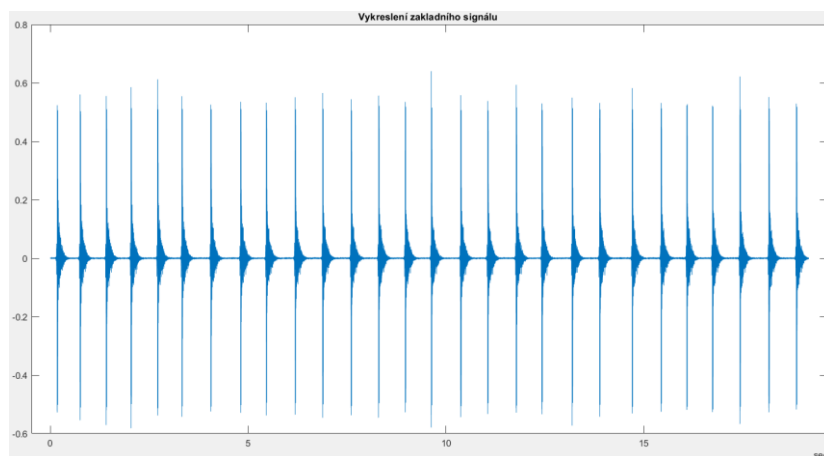
Vyhodnocování audiosignálu probíhalo v prostředí Matlab. Signály upravené podle popisu v sekci [6.1.](#) byly nahrány postupně do Matlabu pomocí příkazu *audioread*, byl vytvořen vektor času a poté byl signál vykreslen. Kód a graf jsou na následujících obrázcích.

```
%% Načtení a vykreslení audiosignálu
[y, Fs] = audioread('spravný materiálNEN.wav');
t = linspace(0, length(y)/Fs, length(y));

figure(1)
plot(t, y(:,1))
title("Vykreslení základního signálu ")
```

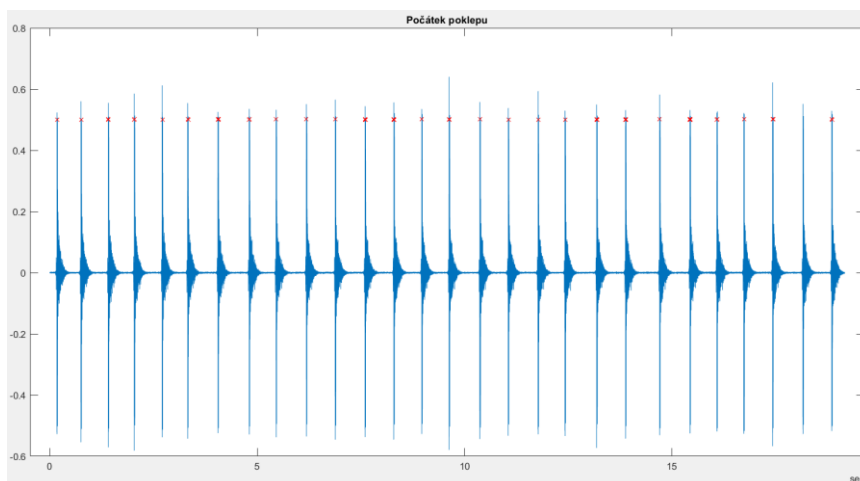
Obrázek 38 Kód pro vykreslení signálu

Výsledkem byl graf:



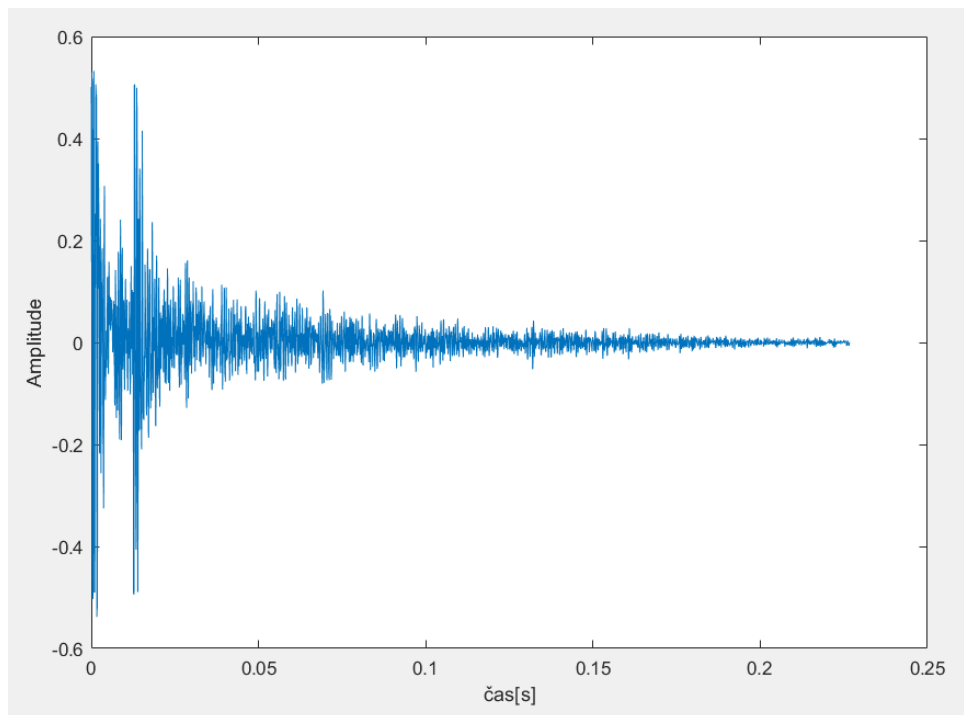
Obrázek 39 Zobrazení audiosignálu v programu Matlab

Pro další analýzu bylo třeba od sebe oddělit jednotlivé poklepy. V Matlabu jsme podle definovaných podmínek v kódu (příloha [B.1](#), [B.2](#)) rozlišili počátky jednotlivých poklepů.



Obrázek 40 Počátky jednotlivých poklepů

Od definovaného začátku jsme vždy brali u každého poklepu shodný časový úsek trvání, 10000 záznamů, což při vzorkovací frekvenci 44 100 vychází na přibližně 0,23 sekundy. Jednotlivé poklepy jsme si uložily, tak abychom s nimi mohli dále pracovat. Profil poklepu je zobrazen na obrázku níže (Obrázek 41).



Obrázek 41 Průběh samostatného poklepu

Lze si všimnout, že v poklepu jsou dvě významná amplitudová maxima, která dělala při identifikaci počátku poklepu problém. Po separování všech poklepů bylo nutno ještě manuálně odfiltrovat špatně identifikované poklepy, kterých bylo okolo dvou desítek.

Separace jednotlivých poklepů byla důležitá pro získání statistických atributů, popsané v sekci [4.6](#), jednotlivých poklepů. Tyto atributy bylo potřeba získat ze všech potřebných nahrávek: z nahrávky poklepu do materiálu bez vady, poklepu do místa defektu a z kompletního pokusu. Identifikace poklepů v nahrávkách a jejich úprava a separace byly provedeny stejným způsobem jako demonstrováný postup výše.

## 6.3 Klasifikace dat

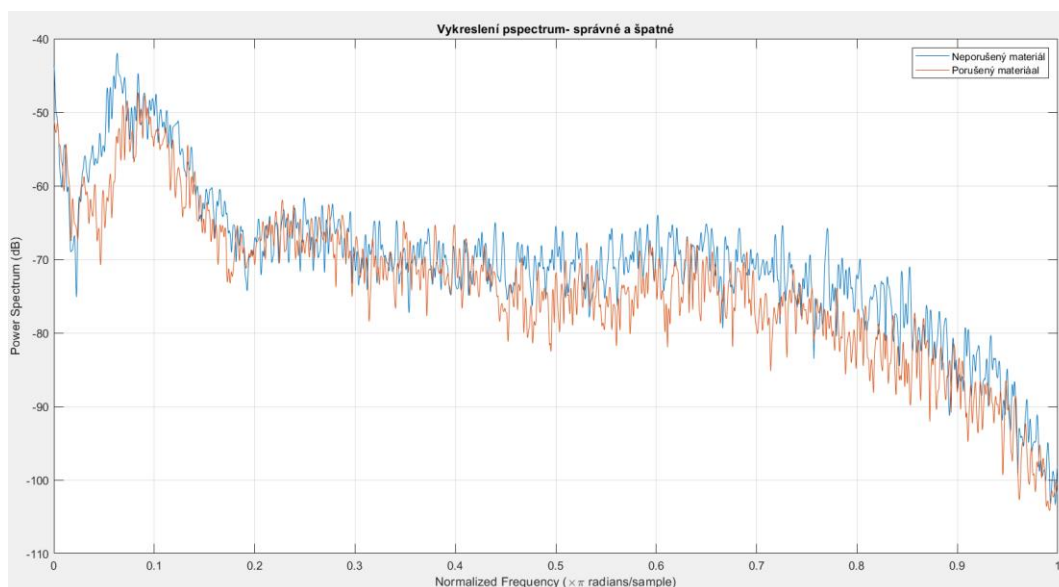
Úkolem práce bylo při experimentu analyzovat poklepy a rozhodnout, které byly do porušeného materiálu. Audio nahrávky, kde jsme nahrávali separátně poklepy do neporušeného a do porušeného materiálu, využijeme jako testovací data, ze kterých získáme významné atributy pro jednotlivé poklepy, které budou sloužit pro klasifikaci.

Ze všech separovaných poklepů v programu Matlab získáme statistické atributy poklepů, které si uložíme do tabulky. Pro náš experiment bereme devět statistických atributů z frekvenční oblasti signálu. Ukázka dat je na obrázku níže (Obrázek 42). Veškerá data pro poklep do porušeného materiálu i do neporušeného materiálu jsou v příloze [C.2](#) a [C.3](#).

maxs	means	medians	peak2peaks	peak2rmss	rmss	stds	vars	kurtosis0s
1,93982E-05	5,73872E-07	5,20705E-08	1,93981E-05	9,79097222	1,98123E-06	1,89653E-06	3,59681E-12	34,8964395
2,38332E-05	5,73695E-07	4,95271E-08	2,38332E-05	11,8341356	2,01394E-06	1,93073E-06	3,72773E-12	41,9354061
2,10979E-05	5,44165E-07	4,82012E-08	2,10978E-05	11,2574007	1,87413E-06	1,79361E-06	3,21705E-12	38,4991919
2,10516E-05	5,7408E-07	5,32477E-08	2,10516E-05	10,6112898	1,98389E-06	1,89925E-06	3,60714E-12	42,6452182
1,9207E-05	5,31131E-07	4,6253E-08	1,9207E-05	10,3962206	1,8475E-06	1,76972E-06	3,13192E-12	41,8065883
1,91566E-05	5,28857E-07	4,5766E-08	1,91566E-05	10,4071501	1,84072E-06	1,76332E-06	3,10931E-12	41,7383323
1,94796E-05	6,09907E-07	5,02663E-08	1,94796E-05	9,24407332	2,10725E-06	2,01731E-06	4,06953E-12	32,941059
1,84671E-05	5,4023E-07	5,11355E-08	1,84671E-05	9,96653614	1,85291E-06	1,77263E-06	3,14221E-12	37,1016458
1,84817E-05	5,23402E-07	4,75089E-08	1,84817E-05	10,2235085	1,80777E-06	1,73055E-06	2,99481E-12	37,5955505
1,89097E-05	5,43146E-07	5,03493E-08	1,89097E-05	10,0754042	1,87682E-06	1,79673E-06	3,22823E-12	40,1614818
1,8921E-05	5,27983E-07	4,73818E-08	1,89209E-05	10,3108053	1,83506E-06	1,75768E-06	3,08944E-12	40,3330362
1,90071E-05	5,29146E-07	4,53121E-08	1,9007E-05	10,4297724	1,82239E-06	1,74409E-06	3,04184E-12	40,7813526
2,01098E-05	5,37616E-07	5,09684E-08	2,01097E-05	10,8772479	1,84879E-06	1,76911E-06	3,12976E-12	40,5458914
1,82847E-05	5,50394E-07	5,35313E-08	1,82847E-05	9,92247448	1,84276E-06	1,75886E-06	3,09358E-12	32,910459
1,8218E-05	5,30695E-07	5,02575E-08	1,8218E-05	10,2016216	1,7858E-06	1,70533E-06	2,90814E-12	33,7053621
1,82164E-05	5,30096E-07	5,0185E-08	1,82164E-05	10,2102233	1,78413E-06	1,70377E-06	2,90284E-12	33,7401792
1,92267E-05	5,64862E-07	5,24943E-08	1,92266E-05	10,0511224	1,91289E-06	1,82781E-06	3,34089E-12	31,4819282
1,91431E-05	5,40502E-07	4,98229E-08	1,91431E-05	10,4332949	1,83481E-06	1,7536E-06	3,07513E-12	32,5433273
1,91449E-05	6,03326E-07	5,04471E-08	1,91449E-05	9,40292088	2,03606E-06	1,94486E-06	3,78247E-12	28,2202422
1,90566E-05	5,78296E-07	4,77319E-08	1,90565E-05	9,74988466	1,95454E-06	1,86726E-06	3,48667E-12	28,7416281
1,90545E-05	5,77547E-07	4,76447E-08	1,90545E-05	9,76064826	1,95217E-06	1,86501E-06	3,47827E-12	28,7672906
1,79364E-05	5,58405E-07	4,99652E-08	1,79363E-05	9,59746016	1,86887E-06	1,78371E-06	3,18162E-12	29,7128182
1,78492E-05	5,3604E-07	4,8348E-08	1,78491E-05	9,92385015	1,79861E-06	1,71709E-06	2,94838E-12	30,6746534
1,78425E-05	5,33968E-07	4,82648E-08	1,78425E-05	9,95534286	1,79226E-06	1,71108E-06	2,92778E-12	30,7897296
1,85166E-05	5,12117E-07	4,75527E-08	1,85166E-05	10,5778456	1,75051E-06	1,67413E-06	2,8027E-12	33,3008442
1,61879E-05	5,43948E-07	5,21908E-08	1,61879E-05	8,86455515	1,82614E-06	1,74346E-06	3,03965E-12	27,3632744
1,61341E-05	5,20674E-07	5,00823E-08	1,61341E-05	9,20810501	1,75217E-06	1,67322E-06	2,79966E-12	28,0847942

Obrázek 42 Ukázka dat statistických atributů poklepu do neporušeného materiálu

Statistická data bereme z frekvenční domény; z analyzovaných grafů to dává dobrý smysl a rozdílnost signálů je zřetelná, jak ukazuje např. obrázek níže (Obrázek 43).



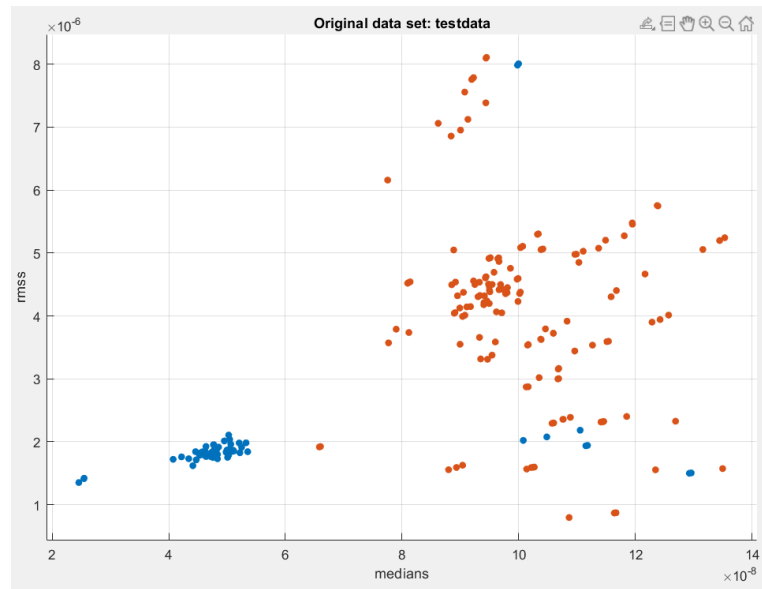
Obrázek 43 Frekvenční doména signálů

Data získaná z nahrávek pro porušený i neporušený materiál sloučíme a přidáme jeden sloupec s údajem, o jaký typ poklepu se jedná. V našem případě jsme zvolili označení *správná* pro poklep do neporušeného materiálu a označení *špatná* pro poklep do porušeného materiálu. Ukázku takto utříděných dat lze vidět na obrázku (Obrázek 44). Kompletní data jsou v příloze [C.4](#).

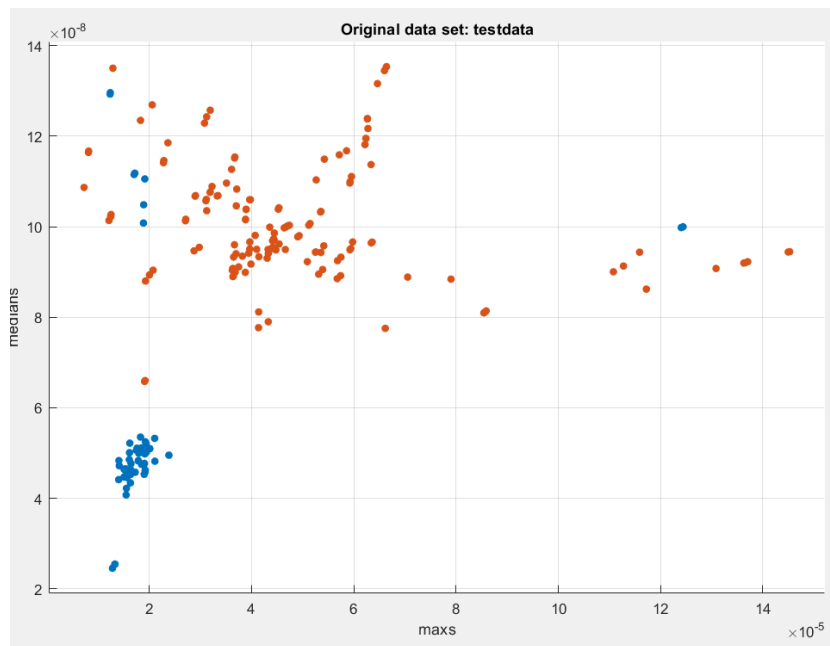
0,000136546	1,54245E-06	9,20408E-08	0,000136546	17,57893772	7,76759E-06	7,61383E-06	5,79704E-11	144,2094301	spravna
0,000136292	1,54108E-06	9,19587E-08	0,000136292	17,56793208	7,75802E-06	7,60435E-06	5,78261E-11	144,025024	spravna
0,000130852	1,51231E-06	9,07513E-08	0,000130852	17,31480549	7,55725E-06	7,40529E-06	5,48383E-11	140,009526	spravna
0,000117223	1,44052E-06	8,62022E-08	0,000117223	16,60104709	7,06121E-06	6,91355E-06	4,77972E-11	128,6839678	spravna
4,32809E-05	1,04537E-06	7,89944E-08	4,32809E-05	11,41992862	3,78995E-06	3,64337E-06	1,32741E-11	44,04924399	spravna
1,32889E-05	4,13176E-07	2,54868E-08	1,32889E-05	9,352510093	1,4209E-06	1,35966E-06	1,84868E-12	28,92271297	spatna
1,32781E-05	4,12647E-07	2,54504E-08	1,32781E-05	9,358245929	1,41887E-06	1,3577E-06	1,84335E-12	28,91402179	spatna
1,32671E-05	4,12122E-07	2,5443E-08	1,32671E-05	9,363829365	1,41685E-06	1,35575E-06	1,83806E-12	28,90546316	spatna
1,3256E-05	4,11598E-07	2,54465E-08	1,3256E-05	9,36926018	1,41484E-06	1,35381E-06	1,83281E-12	28,8970324	spatna
1,27982E-05	3,95309E-07	2,45648E-08	1,27982E-05	9,462072971	1,35258E-06	1,29368E-06	1,67362E-12	28,65794846	spatna
2,07407E-05	5,91071E-07	9,03897E-08	2,07407E-05	12,74366019	1,62753E-06	1,5166E-06	2,30006E-12	40,92433643	spravna
2,00285E-05	5,77859E-07	8,93277E-08	2,00284E-05	12,5779329	1,59235E-06	1,48398E-06	2,2022E-12	40,29778084	spravna
1,92571E-05	5,64317E-07	8,79883E-08	1,92571E-05	12,37428921	1,55622E-06	1,45048E-06	2,10388E-12	39,5556765	spravna
1,82851E-05	5,83426E-07	1,23467E-07	1,8285E-05	11,76275385	1,55449E-06	1,44103E-06	2,07656E-12	37,57351246	spravna
1,91796E-05	6,00884E-07	6,60122E-08	1,91796E-05	9,968661249	1,92399E-06	1,82798E-06	3,34151E-12	28,365527	spravna
1,90846E-05	5,9926E-07	6,58261E-08	1,90846E-05	9,948154937	1,91841E-06	1,82263E-06	3,32198E-12	28,289199	spravna
0,000124401	1,66624E-06	9,99794E-08	0,000124401	15,53485457	8,00788E-06	7,83357E-06	6,13648E-11	101,1165737	spatna
0,000124054	1,66189E-06	9,97952E-08	0,000124054	15,53535444	7,9853E-06	7,8114E-06	6,1018E-11	101,15195	spatna
0,0001159	1,54534E-06	9,43617E-08	0,0001159	15,69114372	7,38636E-06	7,22378E-06	5,2183E-11	102,3772198	spravna
0,00011274	1,49378E-06	9,12924E-08	0,00011274	15,82561442	7,12391E-06	6,96639E-06	4,85306E-11	103,1977148	spravna
0,000110776	1,4601E-06	9,00286E-08	0,000110775	15,93163911	6,95318E-06	6,79898E-06	4,62261E-11	103,8744893	spravna
1,28817E-05	6,1074E-07	1,34982E-07	1,28817E-05	8,182483466	1,5743E-06	1,45119E-06	2,10594E-12	26,17616622	spravna
1,23732E-05	5,88094E-07	1,29594E-07	1,23732E-05	8,222090727	1,50487E-06	1,38537E-06	1,91926E-12	24,63535619	spatna
1,2353E-05	5,87216E-07	1,29383E-07	1,2353E-05	8,222887257	1,50227E-06	1,38292E-06	1,91246E-12	24,59116235	spatna
1,23328E-05	5,86341E-07	1,29276E-07	1,23328E-05	8,22361867	1,49968E-06	1,38047E-06	1,90571E-12	24,54837218	spatna

Obrázek 44 Testovací data pro klasifikaci

Připravená data využijeme na vytvoření modelu, který na základě těchto dat dokáže klasifikovat budoucí data z reálných experimentů. Pro vytrénování modelu použijeme aplikaci zabudovanou v Matlabu Classification learner, která vyžaduje přípravu dat v podobě jako je na obrázku výše (Obrázek 44). Na základě těchto dat se model naučí rozpoznávat data. V našem případě data klasifikuje do dvou skupin *spravna* a *spatna*. Na obrázcích níže je uveden příklad rozložení dat, a jak jsou v aplikaci klasifikovány.



Obrázek 45 Klasifikace dat podle rms a mediánu



Obrázek 46 Klasifikace dat podle maxim a mediánu

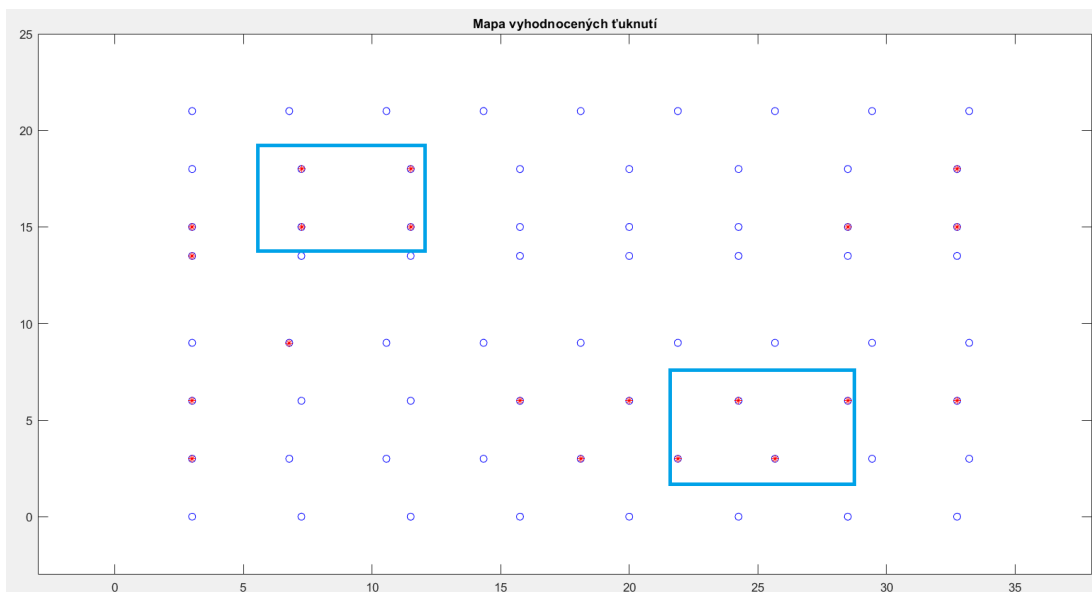
Je patrné, že na základě statistických atributů lze data klasifikovat. Některé atributy jsou pro klasifikaci užitečnější než jiné, ale dohromady poslouží pro dostatečnou klasifikaci do dvou skupin zvuků. Po vytrénování několika modelů byl vybrán model, který klasifikoval data na základě algoritmu KNN (k nearest neighbors); dosáhl největší pravděpodobnosti při klasifikaci dat, která byla 98.6%.

### 6.3.1 Mapování defektů

S vytrénovaným modelem jsme mohli provést kompletní experiment. Robotické rameno projelo definovanou dráhu, při které bylo zaznamenáno určené množství poklepů. Získaný audio signál zachycený na mikrofon byl zpracován a rozdělen na jednotlivé poklepy stejným způsobem popsaným v sekci [6.2](#). Ze separovaných poklepů byly vypočteny statistické atributy způsobem popsaným v sekci [6.3](#). Vytrénovaný model a testovací data jsou v přílohách [B.3](#) a [C.1](#). Získané separované poklepy jsme uložili do matice. Do vytrénovaného modelu jsme poté tuto matici vložili a model jednotlivé poklepy klasifikoval do dvou definovaných skupin a výsledky uložil do vektoru

Získané výsledky byly poté zpětně přiřazeny k jednotlivým poklepům. Přiřazení dat k jednotlivým poklepům bylo provedeno pomocí video záznamu z experimentu. Takové přiřazení bylo v tomto případě nejjednodušší zaprvé proto, že při identifikaci počátku poklepů se nějaké poklepy identifikovaly vícekrát, a tedy programově bylo obtížné zjistit, který záznam dat odpovídá jakému poklepu. Poloha poklepu by se také dala zjistit z rychlosti robotického ramene a času, ovšem to se ukázalo rovněž jako příliš komplikovaný úkol,

protože robot na konkrétních bodech zastavoval, což způsobovalo těžko predikovatelná zdržení a při velkém množství bodů i velkou časovou odchylku měření. Také při rozjezdech byl pohyb ovlivněn zrychlením, které na krátkých vzdálenostech nešlo rozumně měřit.



Obrázek 47 Výsledná mapa identifikovaných poklepů

Na obrázku si můžeme všimnout, že poklepy nejsou rovnoměrně rozloženy, a to kvůli frekvenci nastavené koncovky, rychlosti a definované dráhy robota. Získané výsledky lze zhodnotit tak, že v některých případech máme falešně pozitivní příznak defektu, ale co je důležitější, nestává se, abychom měli falešně negativní indikaci – tedy nebezpečnou situaci, kdy přehlédneme místo s defektem jako nepoškozené. Falešně pozitivně vyhodnocené poklepy byly především na okraji zkoumané desky, kde díky nespojitosti materiálu docházelo k deformaci audiosignálu.

# Závěr

V práci byl navržen postup a vytvořena nezbytná zařízení, přípravky, aplikace a řídicí moduly pro nedestruktivní zkoušku materiálu, která byla poté provedena na testovacím materiálu, kompozitu. Pro realizaci experimentu byla zkonstruována speciální koncovka, která prováděla poklep do materiálu. Koncovku ovládal jednodeskový počítač na základě platformy Arduino, pro který byl vytvořen řídicí skript. Zkouška byla částečně automatizována díky využití robotického ramene, jehož pohyb procházející nad zkoušeným objektem byl v rámci práce také naprogramován. K vyhodnocení zkoušky bylo využito zvukové odezvy poklepu. Pro analýzu audiosignálu bylo využito toolboxu strojového učení v programu Matlab pomocí algoritmu KNN (k-tý nejbližší soused; k nearest neighbour). Audio signál se úspěšně podařilo na testovacích datech rozpoznat do dvou skupin s přesností 98.6%. Samotné rozpoznání v reálném experimentu ovšem takové úspěšnosti nedosahovalo a lokalizace defektů také nedosahovala 100% úspěšnosti. Obecně můžeme hovořit o celkové úspěšnosti okolo 70%.

Po provedení experimentu bylo zjištěno, že lokalizace jednotlivých poklepů je náročná a přesnější lokalizace by vyžadovala lepší algoritmus na separaci jednotlivých poklepů. Dále bylo zjištěno, že poklepy na okraji materiálu působí při vyhodnocování problém. Možným řešením a vylepšením do budoucna by mohla být klasifikace dat do tří skupin, kde by samostatně byly analyzovány poklepy na okraji zkoumaného objektu, což by vyžadovalo i více testovacích dat. Samozřejmě platí, že čím více testovacích dat, tím přesnější bude model. I při klasifikaci do dvou skupin by mohlo pomoci získat více testovacích dat. Lokalizace defektů by do budoucna mohla být propojena s obrazovým záznamem nebo přesnou kalibrací koncovky a pohybu robotického ramene, načež by bylo možno lokaci robota v každém bodě dopočítat. Další zlepšení by mohla přinést implementace neuronové sítě.

Cíle formulované v zadání bakalářské práce byly dosaženy. Experiment proběhl s využitím robota, zkonstruovanou koncovkou, za využití vyhodnocujícího programu včetně klasifikace dat pomocí strojového učení. Celk i dílčí kroky experimentu lze považovat za úspěšné, přičemž další práce na projektu by inkrementálně zlepšovala jednotlivé detaily provedení s cílem jak zvýšit úspěšnost nalezení defektů, tak možností postup aplikovat na složitější objekty obecnějšího tvaru. Při dalším bádání si klademe za cíl zvýšit úspěšnost výsledku.



# Citovaná literatura

- [1] RAAB, Miroslav. Materiály a člověk: netradiční úvod do současné materiálové vědy. Vydání: druhé. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2020 [cit. 2021-11-7]. ISBN 978-80-7454-901-4.
- [2] Statické zkoušky krátkodobé. Tahová zkouška. Ústav fyziky a materiálového inženýrství [online]. 2009 [cit. 2021-11-7]. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_09.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf)
- [3] ŠULC, Jan. Technologická a strojnická měření pro SPŠ strojnické: učební text pro 3. a 4. ročník středních průmyslových škol strojnických. 2., opr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982.
- [4] CARTZ, Louis. Nondestructive testing: radiography, ultrasonics, liquid penetrant, magnetic particle, eddy current. Materials Park, OH: ASM International, c1995. ISBN isbn978-0-87170-517-4.
- [5] Bing, Wang A comparison of publication numbers on various NDT methods and their applications [online] 2019 [cit. 2021-11-7]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/A-comparison-of-publication-numbers-on-various-NDT-methods-and-their-applications-to\\_fig3\\_339550855](https://www.researchgate.net/figure/A-comparison-of-publication-numbers-on-various-NDT-methods-and-their-applications-to_fig3_339550855)
- [6] Technicka-zarizeni.cz. technicka-zarizeni.cz – odborný portál zabývající se problematikou vyhrazených technických zařízení dle zákona č. 174/1968 Sb. a příbuzných oborů [online]. Copyright © 2021 Medim, spol. s r.o. Všechna práva vyhrazena. [cit. 29.07.2021]. Dostupné z: <https://www.technicka-zarizeni.cz/elona-muska-trapi-tlakove-zkousky-nadrzi-projektu-space-x/>
- [7] Pukka Partners: Custom Research and Pre-Investment Studies [online]. Copyright © 2021 Pukka Partners Advisory LLP [cit. 28.07.2021]. Dostupné z: <https://www.pukkapartners.com/insight/composite-materials-growing-application-for-lightweight-products>
- [8] Uhlíková vlákna | KORDCARBON. Výroba a prodej uhlíkových a hybridních tkanin | KORDCARBON [online]. Dostupné z: [http://www.kordcarbon.cz/uhlikove\\_vlakno](http://www.kordcarbon.cz/uhlikove_vlakno)
- [10] AT - zkoušení akustickou emisí. [online]. Copyright © 2017 PTS Josef Solnař, Všechna práva vyhrazena [cit. 28.07.2021]. Dostupné z: <https://www.ptsndt.com/cs/prodej/at-zkouseni-akustickou-emisi>
- [11] KMT TU Liberec [online]. Copyright ©T [cit. 28.07.2021]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf)

- [12] W.Milton, Graeme. The theory of composites. Cambridge University Press, University of Utah. 2009 [cit. 2021-11-7]. ISBN 9780511613357. [online] Dostupné z: <http://assets.cambridge.org/97805217/81251/sample/9780521781251ws.pdf>
- [13] Hlavní stránka - Střední průmyslová škola Ostrava - Vítkovice, příspěvková organizace [online]. Copyright © [cit. 28.07.2021]. Dostupné z: [https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/KOM\\_3\\_5\\_SPU-zkousky\\_bez\\_poruseni\\_materialu.pdf](https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/KOM_3_5_SPU-zkousky_bez_poruseni_materialu.pdf)
- [14] NASA [online]. Copyright ©w [cit. 28.07.2021]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/aeronautics\\_what\\_are\\_composites.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/aeronautics_what_are_composites.pdf)
- [15] Aron Kornhall. Pitch detection for mobile devices. 2006 [cit. 06.07.2021]. Dostupné z: [https://fileadmin.cs.lth.se/serg/old-serg-dok/docs-masterthesis/109\\_15-2006.pdf](https://fileadmin.cs.lth.se/serg/old-serg-dok/docs-masterthesis/109_15-2006.pdf).
- [16] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. MATLAB: začínáme se signály. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN isbn80-730-0200-0.
- [17] NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1995, 389 s. ISBN 80-010-2246-3.
- [17] MONSPORTOVÁ, Lucie. Zjišťování vlivu nízkofrekvenčního zvuku na lidský organismus. Ostrava, 2012. Bakalářská práce. VŠB-TU Ostrava. !!! NE
- [18] ZVUKOVÉ VLNĚNÍ :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 28.07.2021]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/152-zvukove-vlneni>
- [19] Obecné informace o zvuku - Paroc.cz. Paroc stone wool insulation solutions and products - Paroc.cz [online]. Copyright © Paroc Group 2021 [cit. 28.07.2021]. Dostupné z: <https://www.paroc.cz/knowhow/zvuk/obecne-informace-o-zvuku>
- [20] KADLEC, František. Zpracování akustických signálů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN isbn8001025888.
- [21] TARÁBEK, Pavol a Petra ČERVINKOVÁ. Odmaturuj! z fyziky. Brno: Didaktis, c2004. Odmaturuj! ISBN isbn80-86285-39-1, s. 97-103
- [22] JANOVEC, Jan. Technické materiály v primárním a preprimárním vzdělávání. V Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2013. ISBN 978-80-7414-596-4.
- [23] Mikrofon. In: Wikiwand [online]. [cit. 2019-02-21]. Dostupné z: <http://www.wikiwand.com/sk/Mikrof%C3%B3n>
- [24] I have seen the future and it is coming | CompositesWorld . Delivering the Global Composites Market | CompositesWorld [online]. Copyright © [cit.

28.07.2021]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/i-have-seen-the-future-and-it-is-coming>

[25] Robotic Materials - Science Updates - Science NetLinks. Home - Science NetLinks [online]. Copyright © Copyright AAAS 2021. All rights reserved. [cit. 28.07.2021]. Dostupné z: <http://sciencenetlinks.com/science-news/science-updates/robotic-materials/>

[26] Technikanahrávání-mikrofon-uzikantiakapely.cz. Muzikantiakapely.cz - Více než jen hudební portál [online]. Copyright © Musicians and Bands Ltd. [cit. 28.07.2021]. Dostupné z: <https://muzikantiakapely.cz/magazin/technika-nahravani-mikrofon/>

[27] Princip funkce mikrofonů. In: Haaf [online]. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <http://haaf.cz/view.php?cislocianku=2007060305>

[28] Záznam a zpracování zvuku. In: Mediální škola [online]. [cit. 2021-07-18]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/3683704-Z-v-u-k-1-analogovy-zaznam-zvuku.html>

[29] HORČÍK, Zdeněk. Snímání biologických signálů. In: ČVUT [online]. [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: [https://cw.felk.cvut.cz/wiki/\\_media/courses/a6m31let/04\\_digitalizace.pdf](https://cw.felk.cvut.cz/wiki/_media/courses/a6m31let/04_digitalizace.pdf)

[30] Analýza a zpracování signálů. In: University of West Bohemia: Department of Computer Science and Engineering [online]. 2013/2014 [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: [http://proteus.fav.zcu.cz/~mautner/Azs/Azs1\\_Uvod.pdf](http://proteus.fav.zcu.cz/~mautner/Azs/Azs1_Uvod.pdf)

[31] SEDLÁČEK, Miloš. 2002. Využití Matlabu pro potlačení prosakování energie ve spektru při DFT spektrální analýze interpolací v časové oblasti. Digital Signal and Image Processing: Institute of Chemical Technology, Prague, Department of Computing and Control Engineering [online]. České vysoké učení technické v Praze [cit. 2021-07-20]. Dostupné z: <https://www2.humusoft.cz/www/papers/tcp02/sedlacek.pdf>

[32] Audiozone.cz - Stopařův průvodce digitálním zvukem - 1. díl. Audiozone.cz • Server o digitálním zpracování zvuku [online]. Copyright © ATLANTIDA spol. s r.o. [cit. 28.07.2021]. Dostupné z: <https://www.audiozone.cz/recenze/stoparuv-pruvodce-digitalnim-zvukem-1-dil-t18487.html>

[33] Ústav automatizace a měřicí techniky | Vysoké učení technické v Brně [online]. Dostupné z: [https://www.uamt.feec.vutbr.cz/~richter/vyuka/0910\\_mпов/tmp/integral\\_tr\\_1DFT.html](https://www.uamt.feec.vutbr.cz/~richter/vyuka/0910_mпов/tmp/integral_tr_1DFT.html)

[34] [online]. Copyright © [cit. 28.07.2021]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/mat/Pavel.Pokorny/students/ft/skripta/Four.pdf>

- [35] Vibration Technology | Frequency Domain - ifm electronic. ifm - automation made in Germany [online]. Copyright © ifm electronic gmbh 2021 [cit. 28.07.2021]. Dostupné z: <https://www.ifm.com/us/en/us/real-time-maintenance/vibration/technology/frequency-domain>
- [36] ČERNOCKÝ, Jan. Zpracování řečových signálů — studijní opora [online]. 2006 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: [http://www.fit.vutbr.cz/study/courses/ZRE/public/opora/zre\\_opora.pdf](http://www.fit.vutbr.cz/study/courses/ZRE/public/opora/zre_opora.pdf)
- [37] KOZUBEK, Tomáš, Tomáš BRZOBOHATÝ, Marta JAROŠOVÁ a Václav HAPLA. Lineární algebra s matlabem [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava a Západo-česká univerzita v Plzni, 2012 [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: [http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/linearni\\_algebra\\_s\\_matlabem.pdf](http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/linearni_algebra_s_matlabem.pdf)
- [38] HERINGOVÁ, Blanka a Petr HORA. Matlab, Díl 1. Práce s programem. In: Plzeň [online]. 1995 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: <http://www.cdm.cas.cz/czech/hora/vyuka/mvs/tutorial.pdf>
- [39] Simon Fraser University [online]. Dostupné z: <https://www.sfu.ca/sonic-studio-webdav/handbook/Mel.html>
- [40] Apple Developer Documentation. [online]. Dostupné z: [https://developer.apple.com/documentation/accelerate/computing\\_the\\_mel\\_spectrum\\_using\\_linear\\_algebra](https://developer.apple.com/documentation/accelerate/computing_the_mel_spectrum_using_linear_algebra)
- [41] Understanding the Mel Spectrogram | by Leland Roberts | Analytics Vidhya | Medium. Medium – Where good ideas find you. [online]. Dostupné z: <https://medium.com/analytics-vidhya/understanding-the-mel-spectrogram-fca2afa2ce53>
- [42] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KŘÍŽ. Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4273-1.
- [43] Root-Mean-Square -- from Wolfram MathWorld. Wolfram MathWorld: The Web's Most Extensive Mathematics Resource [online]. Copyright © 1999 [cit. 28.07.2021]. Dostupné z: <https://mathworld.wolfram.com/Root-Mean-Square.html>
- [44] ZVÁRA, Karel a Josef ŠTĚPÁN. Pravděpodobnost a matematická statistika. 5. vyd. Praha: Matfyzpress, 2012. ISBN 978-80-7378-218-4.
- [45] Computer Glossary, Computer Terms - Technology Definitions and Cheat Sheets from WhatIs.com - The Tech Dictionary and IT Encyclopedia [online]. Dostupné z: [https://whatis.techtarget.com/definition/peak-to-peak-pk-pk#:~:text=Peak-to-peak%20\(pk-](https://whatis.techtarget.com/definition/peak-to-peak-pk-pk#:~:text=Peak-to-peak%20(pk-)

pk)%20is%20the,a%20waveform%2C%20as%20shown%20below.&text=For%20an%20AC%20sine%20wave,root-mean-square%20amplitude.

[48] DAINTITH, John. A dictionary of physics. 6th ed. New York: Oxford University Press, 2009. ISBN .isbn9780199233991.

[46] Skewness and Kurtosis |Shape of data: Skewness and Kurtosis. Analytics Vidhya - Learn Machine learning, artificial intelligence, business analytics, data science, big data, data visualizations tools and techniques. | Analytics Vidhya [online]. Copyright © Copyright 2013 [cit. 28.07.2021]. Dostupné z: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/05/shape-of-data-skewness-and-kurtosis/>

[49] KUKA. KUKA System Software 8.3 Operating and Programming Instructions for End User Vydání: KSS 8.3 END V1. 2013 [cit. 2021-20-7].

[47] Univerzální elektromagnet DC 12V / 2A 10mm 20N Push-Pull | dratek.cz. dratek.cz: VELKOOBCHOD, MALOOBCHOD S ARDUINEM [online]. Copyright © Copyright ECLIPSERA s.r.o. [cit. 28.07.2021]. Dostupné z: [https://dratek.cz/arduino/1259-univerzalni-elektromagnet-dc-12v-2a-10mm-20n-push-pull.html?gclid=CjwKCAjwuvvmHBhAxEiwAWAYj-M7i1WcdbuSAL8VaHVgEideJ6tECNz6DBUmTfgzYLVg7L10tbgwx6BoCH5EQA\\_vD\\_BwE](https://dratek.cz/arduino/1259-univerzalni-elektromagnet-dc-12v-2a-10mm-20n-push-pull.html?gclid=CjwKCAjwuvvmHBhAxEiwAWAYj-M7i1WcdbuSAL8VaHVgEideJ6tECNz6DBUmTfgzYLVg7L10tbgwx6BoCH5EQA_vD_BwE)

# Seznam zkratek

NDT	Non-Destructive testing
Hz	Hertz - jednotka frekvence
kHz	kiloHertz – jednotka frekvence
AE	Akustická emise
Al	Aluminium- hliník
Mg	Magnesium- hořčík
Si	Silicon- křemík
FT	Fourier transform
FFT	Fast Fourier Transform
WAV	Waveform Audio File Format
AVI	Audio Video Interleave
FLAC	Free Lossless Audio Codec
MP3	Audio Layer III
MPEG-4	Moving Pictures Expert Group 4
AAC	Advanced Audio Coding
2D	Two-dimensional space
3D	Three-dimensional space
KNN	k nearest neighbour

# Seznam tabulek

Tabulka 1 Porovnání rychlosti zvuku v různých prostředích [22]  
.....18

**Nenalezena položka seznamu obrázků.**

# Seznam obrázků

Obrázek 1 Skladba kompozitního materiálu [7] .....	8
Obrázek 2 Porovnání hliníkové slitiny a jejich kompozitů [11].....	8
Obrázek 3 Velikost uhlíkového vlákna [14].....	9
Obrázek 4 Porovnání počtu publikací vydaných v posledních třiceti letech týkajících se nedestruktivních zkoušek materiálů. [5].....	11
Obrázek 5 Schéma rentgenové zkoušky materiálu [13].....	13
Obrázek 6 Základní parametry mechanické vlny [19] .....	15
Obrázek 7 Schéma kondenzátorového mikrofonu [26] .....	17
Obrázek 8 Schéma obvodu dynamického mikrofonu. [26] .....	18
Obrázek 9 Vzorkování bez kvantizační úrovně [32] .....	19
Obrázek 10 Kvantizovaný signál bez vzorkování [32].....	20
Obrázek 11 Výsledný digitální signál [32].....	20
Obrázek 12 Představení časové a frekvenční domény [35] .....	21
Obrázek 13 Vstupní signál v časové doméně .....	22
Obrázek 14 Frekvenční spektrum signálu .....	22
Obrázek 15 Ukázka příkazu plot .....	25
Obrázek 16 Příklad spektogramu v prostředí Matlab .....	26
Obrázek 17 Mel stupnice [39].....	26
Obrázek 18 Příklad melSpektogramu v prostředí Matlab .....	27
Obrázek 19 Grafické znázornění typů Kurtosis [46] .....	30
Obrázek 20 Vyrobený kompozit s defekty .....	32
Obrázek 21 Uměle vytvořené defekty.....	33
Obrázek 22 Vodní Nádoba s ochrannou fólií .....	34
Obrázek 23 Sklolaminátový kompozit na hladině vodní nádoby .....	34
Obrázek 24 Solenoid [47].....	35
Obrázek 25 Víčko obalu pro elektro součásti.....	36
Obrázek 26 tělo obalu koncovky .....	37
Obrázek 27 Solenoid pod termokamerou .....	37
Obrázek 28 Vnitřek obalu koncovky s pěnovými tlumiči .....	38



Obrázek 29	Kompletní mechanická část koncovky s gumovým nástavcem.	38
Obrázek 30	Části robota [45].	38
Obrázek 31	Robot Kuka při experimentu.	39
Obrázek 32	Ukázka programu KRL	40
Obrázek 33	poloha koncovky při kontaktu s materiálem.	41
Obrázek 34	Cesta robotického ramene nad materiálem.	41
Obrázek 35	Kompletní setup pro experiment.	42
Obrázek 36	Záznam zvuku z experimentu	43
Obrázek 37	Upravený audiosignál	44
Obrázek 38	Kód pro vykreslení signálu	44
Obrázek 39	Zobrazení audiosignálu v programu Matlab	45
Obrázek 40	Počátky jednotlivých poklepů.	45
Obrázek 41	Průběh samostatného poklepu	46
Obrázek 42	Ukázka dat statistických atributů poklepu do neporušeného materiálu	47
Obrázek 43	Frekvenční doména signálů	47
Obrázek 44	Testovací data pro klasifikaci.	48
Obrázek 45	Klasifikace dat podle rms a mediánu	48
Obrázek 46	Klasifikace dat podle maxim a mediánu.	49
Obrázek 47	Výsledná mapa identifikovaných poklepů.	50

# Seznam příloh

## Příloha A Arduino

A.1 Arduiono pro řízení koncovky.ino

## Příloha B Matlab

B.1 Poklep\_kod\_získání klasifikačních parametrů.m

B.2 Kod pro vyhodnocení experimentu.m

B.3 VytrenovanýmodelKNN.mat

## Příloha C Excelovské data

C.1 celypokus.xlsx

C.2 featurematrix\_spatna.xlsx

C.3 featurematrix\_spravna.xlsx

C.4 testdata.xlsx

## Příloha D Audio soubory

D.1 spatny materiálNEN.wav

D.2 spravný materiálNEN.wav

D.3 cely pokus 1.wav

D.4 cely pokus 1.aup

**D.5 pouze robot.aup**

**D.6 pouze tukatko.aup**

**D.7 spatny materiál.aup**

**D.8 spravný materiál.aup**

## **Příloha E Kód robotického ramene**

**E.1 Poklep.dat**

**E.2 Poklep.src**

