

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta

**Návrh a realizace měřicího přístroje na měření rychlosti šíření
zvukových vln ve dřevě.**

Bakalářská práce

Patrik Musil

Vedoucí práce: Ing. Michal Šerý, Ph.D.

České Budějovice 2019

Bibliografické údaje:

Musil, P., 2019: Návrh a realizace měřicího přístroje na měření rychlosti šíření zvukových vln ve dřevě. [Design and realization of measuring device to measure propagation speed of sound waves in wood, Bc. Thesis, in Czech.] – 37 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Abstrakt:

Bakalářská práce pojednává o principech využití zvukových vln pro zjišťování mechanických vlastností konstrukčních materiálů. Praktická část se věnuje možnosti využití mikrokontrolerů AVR a piezoelektrických snímačů pro stromovou tomografii.

Klíčová slova:

Zvukové vlny, detekce zvuku, piezoelektrický měnič, stromová tomografie, AVR

Abstract:

This thesis describes use of sound waves for evaluation of mechanical properties of construction materials. Practical part is focused on possible usage of AVR microcontrollers and piezoelectric diaphragms for tree tomography.

Keywords:

Sound waves, sound detection, piezoelectric diaphragm, tree tomography, AVR

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 22. listopadu 2019

Patrik Musil

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Michalovi Šerému Ph.D. za věcné rady a připomínky.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Šíření zvuku v materiálu	1
2.1	Typy vln.....	1
2.1.1	P-vlny (primární)	1
2.1.2	S-vlny (sekundární)	1
2.1.3	R-vlny (Rayleigh).....	1
2.2	Rychlost šíření jednotlivých vln	2
2.3	Odraz a lom.....	2
2.4	Akustická impedance	3
3	Využití zvuku pro zjišťování vlastností materiálů	4
3.1	Pulse-echo a pitch-catch metoda (ultrazvuk).....	4
3.2	Impact-echo metoda (kladivo)	5
3.3	Vozmistr.....	7
3.4	Stromová tomografie	7
3.4.1	Interpretace dat naměřených kolmo na vlákna	7
4	Jednočipové mikropočítače (mikrokontrolery)	9
5	Koncept přístroje	10
5.1	Popis funkce měřicího přístroje	10
5.2	Popis složení sondy.....	11
5.3	Struktura naměřených dat	11
6	Zpracování naměřených dat	12
6.1	Popis funkce skriptu.....	12
7	Programování	12
7.1	Použitý mikrokontroler	12
7.2	Atmel studio (AVR C).....	13
7.3	Nastavení Atmel studia pro nahrávání programu do Arduina	13

7.4	Přerušení	15
7.4.1	Rutina přerušení.....	15
7.4.2	Výkon přerušení	16
7.5	Časovač/čítač	16
7.5.1	Operační módy časovače/čítače 0 v AVR	16
7.5.2	Ovládání časovače/čítače 0 v AVR	17
7.6	Asynchronní sériová komunikace.....	17
7.6.1	Přenosová rychlost.....	17
7.6.2	USART v AVR.....	18
7.6.3	Popis aplikace	19
7.7	TWI (I ² C).....	19
7.7.1	I ² C Uzly	19
7.7.2	Přenos dat	19
7.7.3	Ovládání TWI periferie v AVR.....	20
7.7.4	Uvážení vhodnosti aplikace.....	21
8	Konstrukce sondy	22
8.1	Možnosti využití piezoelektrického snímače.....	22
8.2	Prvotní pokus o detekci zpoždění zvukové vlny	23
8.2.1	Popis experimentu	23
8.2.2	Konstrukce hrotu	23
8.2.3	Vzorek	23
8.2.4	zapojení.....	24
8.2.5	Postup měření	24
8.2.6	Shrnutí experimentu	24
8.3	Experiment simulující reálné nasazení	25
8.3.1	Popis experimentu	25
8.3.2	Konstrukce hrotu	25
8.3.3	Vzorek	25

8.3.4	Výbava.....	26
8.3.5	Zapojení.....	26
8.3.6	Postup měření.....	27
8.3.7	Výsledky.....	29
9	Realizace.....	30
9.1	Vývojové diagramy.....	30
9.2	Schéma zapojení.....	32
9.3	Desky plošných spojů.....	33
10	Závěr.....	34
11	Seznam obrázků.....	35
12	Seznam tabulek.....	36
13	Seznam literatury.....	37

1 Úvod

V posledních letech se do popředí zájmu dostávají stále více nedestruktivní metody měření různých veličin. Mezi tyto metody patří využívání zvukových vln. Tato práce měla za cíl prozkoumat problematiku šíření zvuku ve dřevě. Jednou z aplikací této metody, která kombinuje využití poznatků z oblasti elektroniky, konstrukce a programování je například stromová tomografie. Jedná se o nedestruktivní metodu pro posouzení zdravotního stavu kmene, založenou na měření akustických vlastností dřeva. Vyšetření takovýmto přístrojem vede k odstranění rizika poranění osob a poškození majetku v důsledku pádu nezdravého stromu.

Cílem práce je shrnout možnosti využití zvuku pro vyhodnocování stavu konstrukčních materiálů a navrhnout možné řešení pro již výše zmíněné posuzování vnitřní struktury kmenů, provedení testovacích měření a vytvoření výrobní dokumentace.

Motivací autora je seznámit se blíže s mikrokontrolery s architekturou AVR a možnostmi jejich nasazení v měřicích přístrojích.

2 Šíření zvuku v materiálu

2.1 Typy vln

Když je povrch pevného materiálu vystaven náhlé změně napětí, pak se celým tělesem začne šířit vzruch ve formě napěťových vln, které jsou podobné zvukovým vlnám, které se šíří vzduchem. Tyto napěťové vlny se v izotropním elastickém médiu dají rozdělit na:

2.1.1 P-vlny (primární)

Jedná se o podélné vlnění, tedy pohyb částic je ve směru šíření vlny. Tyto vlny jsou následkem změny tlakového nebo tahového napětí [1].

2.1.2 S-vlny (sekundární)

Jedná se o příčné vlnění, částice se pohybují kolmo na směr šíření vlny. Tyto vlny jsou následkem změny smykového napětí [1].

2.1.3 R-vlny (Rayleigh)

Vlny, které se šíří po povrchu tělesa. Částice se pohybují podobně jako vlny na vodní hladině, jedná se o složitější cirkulární pohyb [1].

V případě, že vyvoláme v materiálu tento vzruch úderem, P a S-vlny se šíří v polokulových vlnoplochách skrze materiál, zatímco R vlny se šíří skrze materiál ve válcových vlnoplochách [1].

2.2 Rychlost šíření jednotlivých vln

Ve většině aplikací vznikají tyto vlny z pulzu konečné délky. Materiálem se potom šíří tlumená vlna. Šíření takové vlny v heterogenním prostředí s konečnými rozměry je složitý problém. Základní pochopení vztahu fyzických vlastností materiálu lze získat z teorie šíření vln v nekonečném, izotropním a elastickém médiu [1].

Rychlost šíření P-vln v materiálu je závislá na jeho mechanických vlastnostech, konkrétně na hustotě ρ , modulu pružnosti v tahu E a na Poissonově konstantě ν [1].

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

V případě, že se P-vlna šíří materiálem s konečnými rozměry typu plech nebo dlouhá tyč, kde nejmenší rozměr tohoto objektu je menší než vlnová délka vyslané vlny λ ,

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

se rychlost P-vln určí vztahem:

$$C_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Rychlost šíření S-vln je dána vztahem:

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Kde G je modul pružnosti ve smyku, dán vztahem:

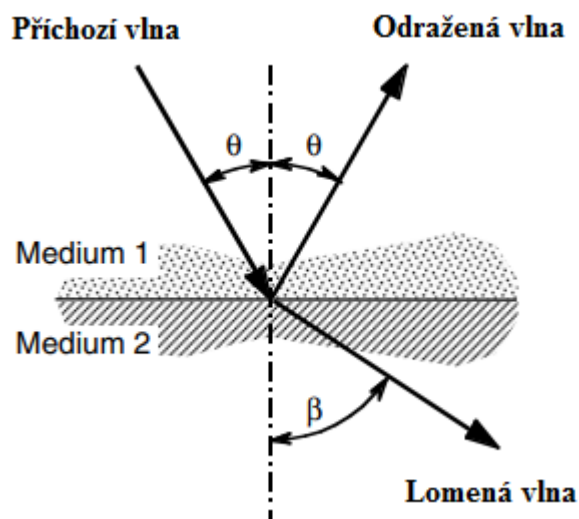
$$G = \frac{E}{2(1-\nu)}$$

[1]

2.3 Odraz a lom

Podobně jako v optice lze takovou vlnu šířící se prostředím nahradit paprskem. Platí zde také zákon odrazu, tedy úhel dopadu paprsku θ je stejný jako úhel odrazu paprsku, a Snellův zákon, který udává vztah mezi úhlem dopadu paprsku θ a úhlem lomu paprsku β v závislosti na rychlosti šíření vlnění dvěma rozdílnými prostředími [1].

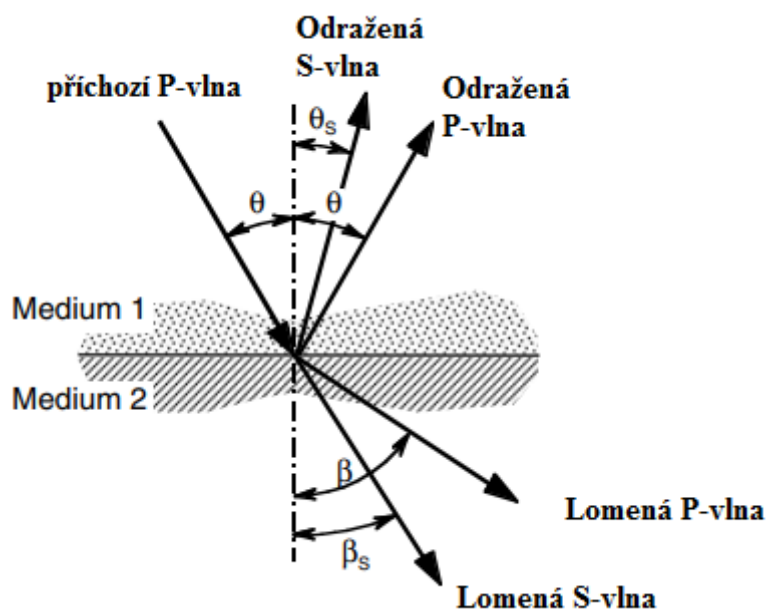
$$\sin \beta = \frac{c_1}{c_2} \sin \theta$$



Obrázek 1, Snellův zákon. Zdroj: [1]

Na rozdíl od světelných paprsků tyto vlny při dopadu na rozhraní dvou materiálů pod kosým úhlem mění mód svého šíření, tedy dopadající P-vlna je odrazena i lomena částečně jako P-vlna a částečně jako S-vlna, opět zde platí Snellův zákon [1].

$$\frac{\sin \theta}{c_{p1}} = \frac{\sin \beta}{c_{p2}} = \frac{\sin \theta_s}{c_{s1}} = \frac{\sin \beta_s}{c_{s2}}$$



Obrázek 2, Změna módu šíření vlny. Zdroj: [1]

2.4 Akustická impedance

Amplituda odražených vln závisí na rozdílu akustické impedance Z obou prostředí, úhlu dopadu, na vzdálenosti rozhraní od zdroje vlnění a na útlumu po dráze šíření vlny [1].

$$Z = \rho C_p^*$$

*akustická impedance pro P-vlny, tato rovnice platí i pro určení impedance pro S-vlny v případě, že dosadíme C_s

Amplituda odraženého paprsku je maximální v případě, že je úhel dopadu kolmý na rozhraní dvou materiálů (tedy $\theta = 0^\circ$). Amplituda odraženého paprsku je ponížena poměrem R_n vůči amplitudě dopadajícího paprsku [1].

$$R_n = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

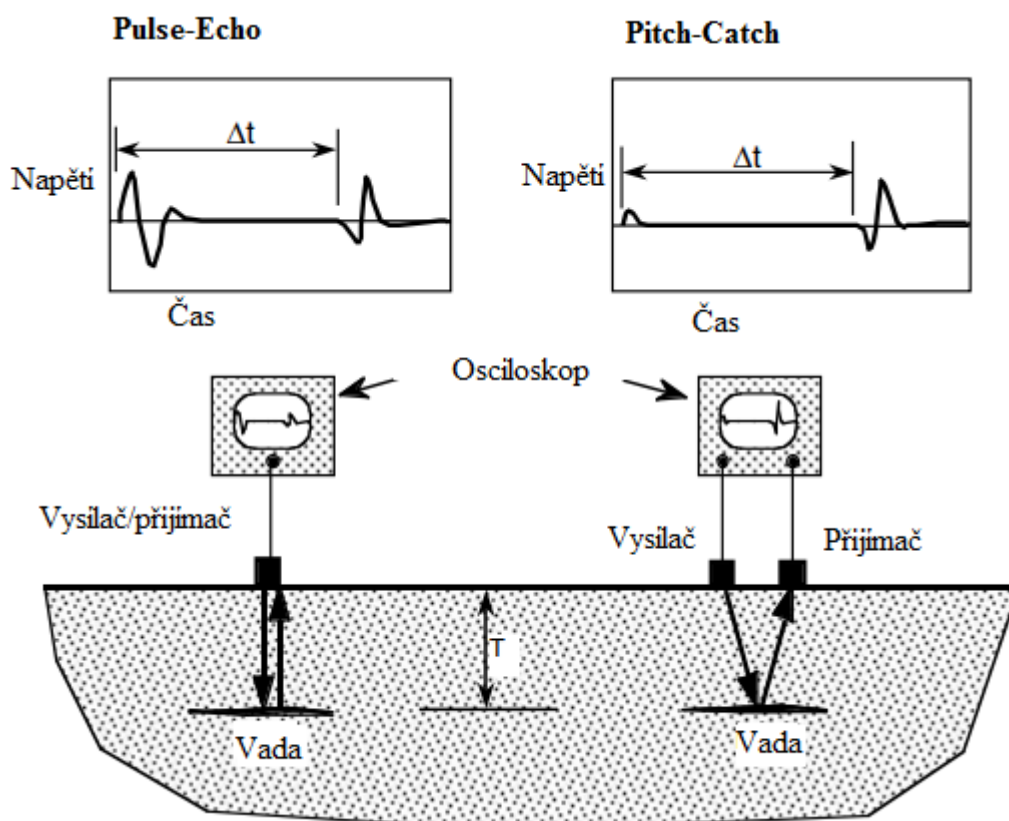
3 Využití zvuku pro zjišťování vlastností materiálů

3.1 Pulse-echo a pitch-catch metoda (ultrazvuk)

Princip této metody spočívá v tom, že se do testovaného objektu vyšle vlna, která je poté odrazena od vad v materiálu, nebo od konce testovaného objektu. Tato vlna je poté zachycena vysílačem, který se dokáže chovat i jako přijímač (pulse-echo metoda), nebo přijímačem umístěným v blízkosti vysílače (pitch-catch metoda). V případě, že známe rychlost šíření vln daným materiálem, lze určit hloubku odrazové plochy [1].

$$T = \frac{1}{2} \Delta t C_p$$

Kde T je hloubka odrazové plochy, Δt zpoždění signálu a C_p rychlost šíření P-vln. V případě že tuto rovnici chceme použít i pro pitch-catch metodu musíme počítat s tím, že se dopouštíme chyby tím, že zachytáváme signál v jiném místě než v místě vyslání signálu [1].

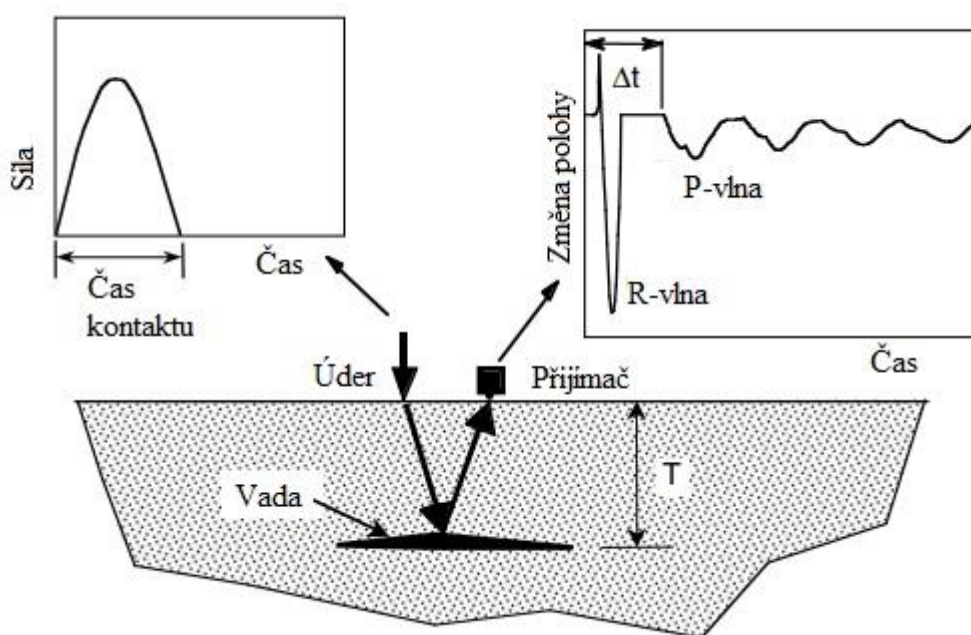


Obrázek 3, Pulse-echo a Pitch-catch metoda. Zdroj: [1]

Základní vybavení potřebné pro tyto metody jsou vysílací a přijímací měniče se systémem, který je schopný nahrávat a zobrazovat časový průběh signálu z nich. Většina moderních měničů používá piezoelektrické materiály pro generování i zachytávání signálu. Piezoelektrický materiál vystavený elektrickému poli náhle změní své rozměry a poté osciluje, tato oscilace po čase daném konstrukcí měniče odezní. Stejně naopak, když je piezoelektrický materiál vystaven deformaci, generuje elektrický náboj, který je proporcionální k aplikovanému mechanickému napětí. Díky těmto vlastnostem piezoelektrických materiálů lze použít pouze jeden měnič pro generování a zároveň i přijímání signálu, ale musí být vhodně navržen, aby vysílaný signál odezněl dříve, než se vrátí odražený signál [1].

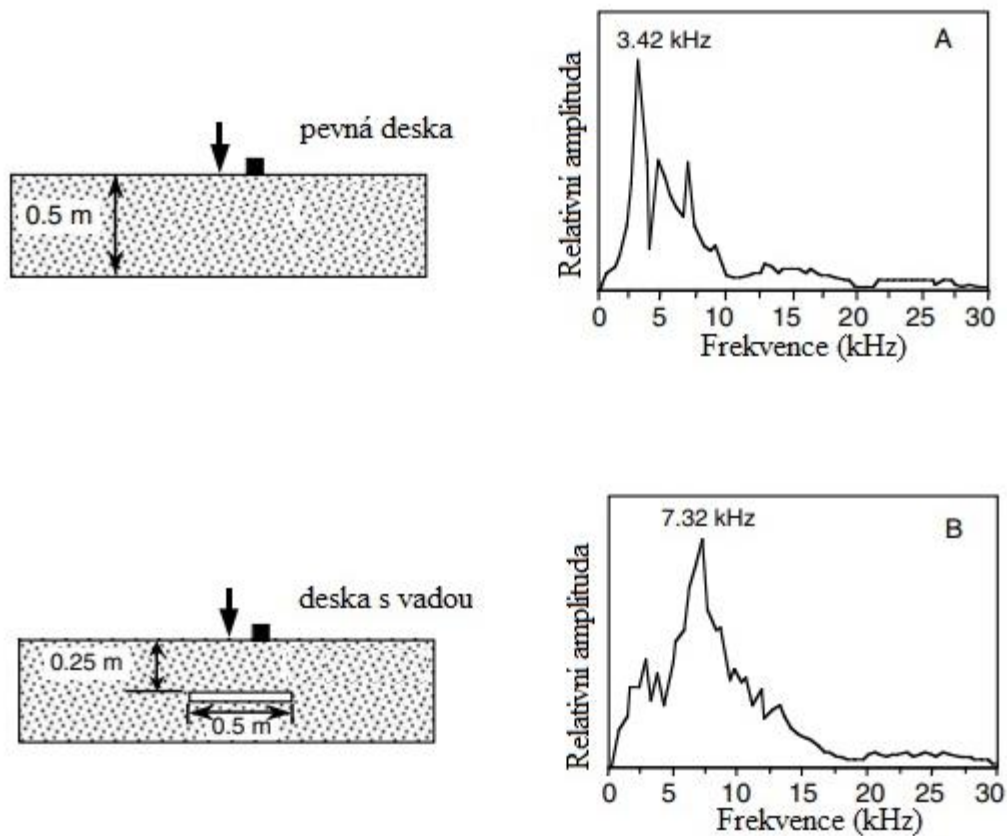
3.2 Impact-echo metoda (kladivo)

Podobný princip jako Pulse-echo metoda, rozdíl je v tom, že generujeme signál úderem kladiva na povrch testovaného materiálu. V případě, že jsme schopni generovat dostatečně krátký úder kladivem, můžeme výsledky vyhodnocovat stejně jako u Pulse-echo metody. V praxi lze vyhodnocovat v časové oblasti pouze předměty sloupového tvaru [1].



Obrázek 4, Impact-echo metoda. Zdroj: [1]

Pro vyhodnocování naměřených výsledků z předmětů tvaru desky je potřeba použít frekvenční analýzu naměřeného signálu. Hlavní myšlenka za frekvenční analýzou signálu tkví v tom, že se vyslaný signál periodicky odráží mezi místem úderu a vadou případně protější stranou testovaného vzorku [1].



Obrázek 5, Frekvenční analýza u Impact-echo metody. Zdroj: [1]

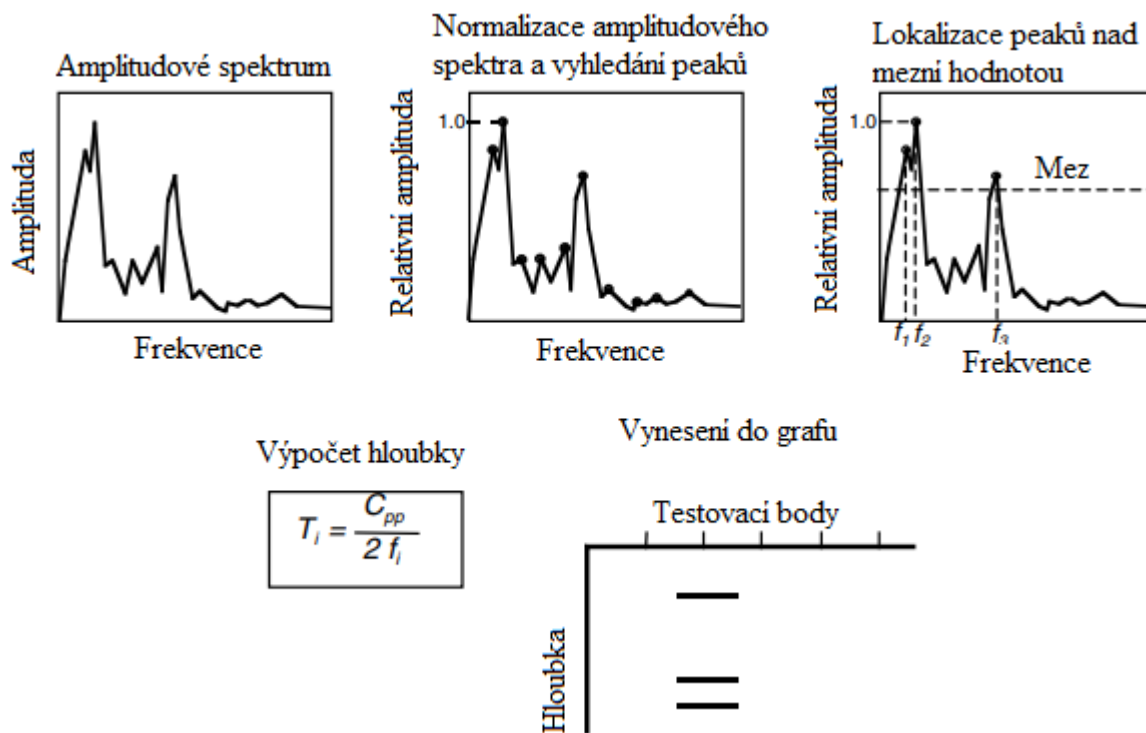
Perioda takového signálu je rovna délce dráhy $2T$ podělené rychlostí šíření P-vln. Frekvence je převrácená hodnota periody tedy platí:

$$f = \frac{c_p}{2T}$$

Kde c_p je rychlost šíření P-vln v daném materiálu naměřená experimentálně na vzorku daného materiálu o známé tloušťce. Ze vztahu lze vyjádřit hloubku vady:

$$T = \frac{c_p}{2f}$$

[1]



Obrázek 6, Postup vyhodnocení Impact-echo metody ve frekvenční oblasti. Zdroj: [1]

3.3 Vozmistr

pracovní pozice u Českých Drah, provádí kontrolu funkčnosti vagónů. Při kontrole brzd poklepává na kola vagónů kladívkem s dlouhou násadou. Podle zvuku, který kolo vydá, rozhoduje o funkčnosti brzd, na základě této zkoušky vyplní dokument („bržděnku“), kterým ztvrzuje, že jsou brzdy v pořádku.

3.4 Stromová tomografie

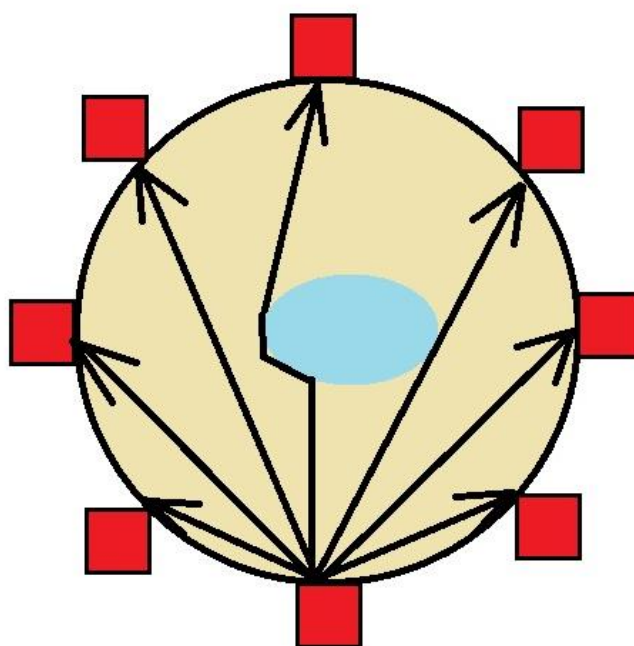
Již od šedesátých let minulého století se využívalo zvuku ke klasifikaci dřevěných sloupů vedení elektrické energie. Poklep na jedné straně vyvolal zvukovou vlnu, která se na druhé straně zachytávala senzorem. Vzdálenost mezi místem úderu a senzorem byla podělena časovým zpožděním signálu, tedy byla vypočítána rychlost šíření zvuku daným sloupem a na základě výše uvedených vztahů byl určen modul pružnosti materiálu. V devadesátých letech minulého století byl tento princip využíván pro určování vnitřních vad živých stromů, nicméně bylo zjištěno, že tato metoda má omezenou přesnost a spolehlivost. Fyzikální princip lze aplikovat v případě, že se měří rychlost šíření zvuku po směru vláken, ale nedá se aplikovat stejným způsobem pro určování vnitřních vad v řezu při měření kolmo na vlákna [4].

3.4.1 Interpretace dat naměřených kolmo na vlákna

V případě testování modulu pružnosti sloupů se dalo předpokládat, že se zvuková vlna šíří po dráze, která je rovna vzdálenosti místa úderu a senzoru. V případě že měříme kolmo na

vlákna, musíme počítat s tím, že vyslaná zvuková vlna má tendenci „obejít“ porušené místo (hnilobu, dutinu, prasklinu, odpojení letokruhů). Čím objemnější porucha materiálu, tím delší dráhu vyslaná vlna urazí. Z toho plyne, že coby pozorovatel, který nemá ponětí o vnitřní struktuře dřeva, měříme dobu průchodu signálu z místa A do místa B, známe přímou dráhu mezi body A a B. Podělením vzdálenosti a doby letu tedy dostáváme virtuální rychlost, která ovšem nekoresponduje s mechanickými vlastnostmi dřeva [4, 5].

$$C_p \text{ virtuální} = \frac{|AB|}{\Delta t_{|AB|}} \neq \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

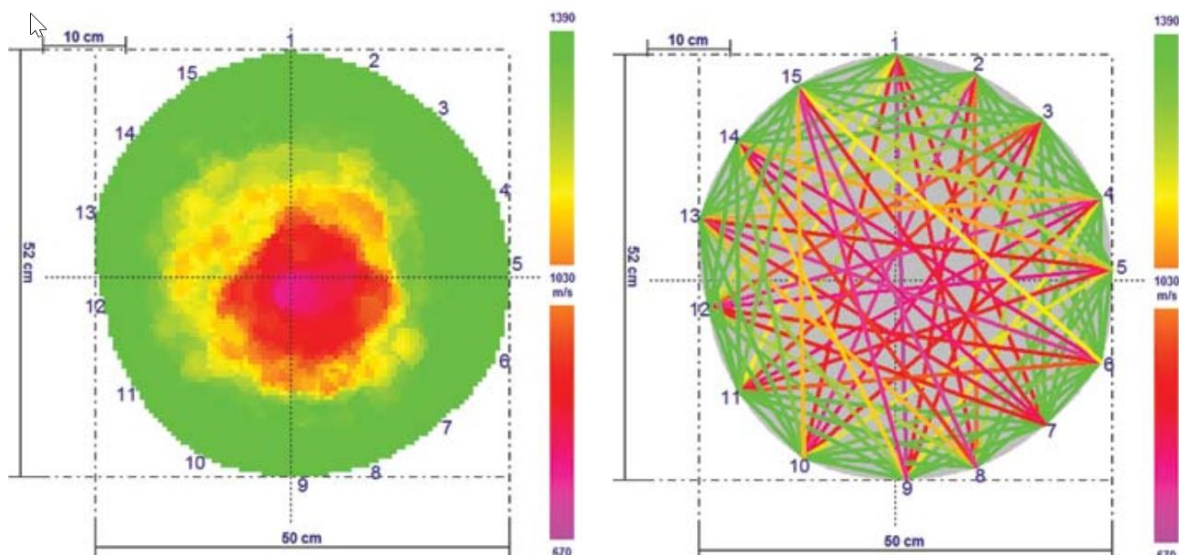


Obrázek 7, Reálná dráha zvukového signálu

Základem dobrého měření je volba správného počtu sond. Čím více senzorů, tím větší šance zachytit vadu materiálu. Je potřeba zajistit dostatečně mohutnou síť měření pro dobré rozlišení výsledku [4].

Počet senzorů	výsledek
2	Nevhodné, malá šance detekce vady
4	Lze detekovat velkou vadu ve středu kmene
8	Dobrá představa o průřezu stromu
10-16	Velmi dobrá představa o průřezu stromu. Více sond už ubírá poměru cena/výkon

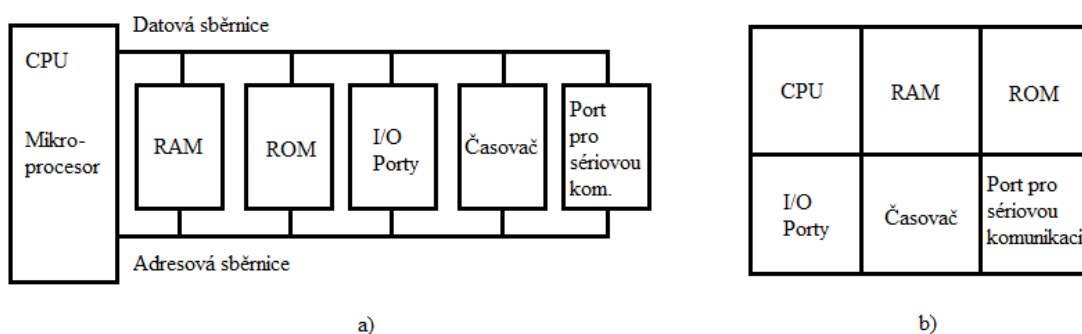
Tabulka 1, Volba počtu sond. Zdroj: [4]



Obrázek 8, Výstup z reálného přístroje. Zdroj: [5]

4 Jednočipové mikropočítače (mikrokontrolery)

Na rozdíl od mikroprocesoru se jedná o celý počítač integrovaný do jednoho čipu. Typicky obsahuje samotný mikroprocesor, paměť RAM, ROM, I/O porty, časovače, AD převodníky a porty pro sériovou komunikaci. Jejich výhodami oproti systémům s mikroprocesory jsou hlavně nižší cena a menší prostorová náročnost. Na druhou stranu počet I/O portů a paměť RAM a ROM jsou u mikrokontroleru určeny výrobcem, tedy musíme předem vědět co od takového mikrokontroleru požadujeme, abychom si mohli vybrat ten správný mikrokontroler pro danou aplikaci [2].



Obrázek 9, a) Počítač včetně externích periférií b) Mikrokontroler. Zdroj: [2]

- a) Systém s mikroprocesorem
- b) Mikrokontroler

Mikrokontroler je nejlepší volit podle tří kritérií:

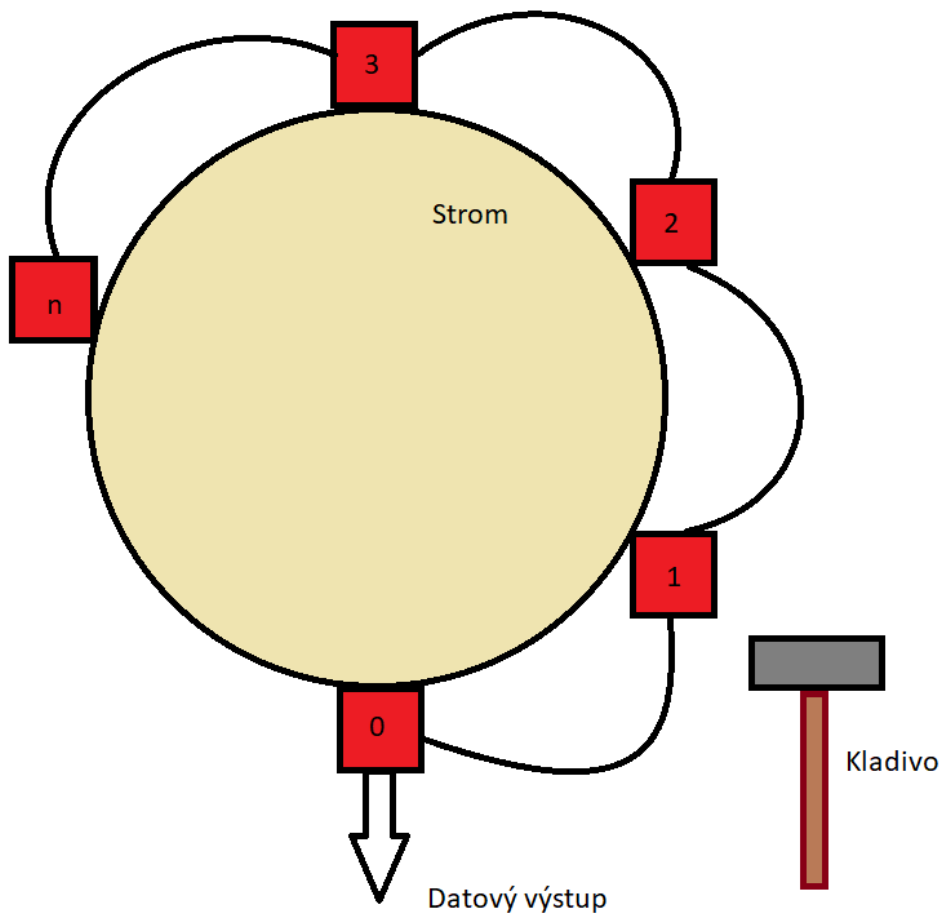
- 1) Mikrokontroler by měl splňovat HW a výpočetní požadavky pro danou aplikaci
- 2) Dostupnost dokumentace, softwarových a hardwarových vývojových nástrojů
- 3) Dostupnost a spolehlivost dodavatelů

5 Koncept přístroje

5.1 Popis funkce měřicího přístroje

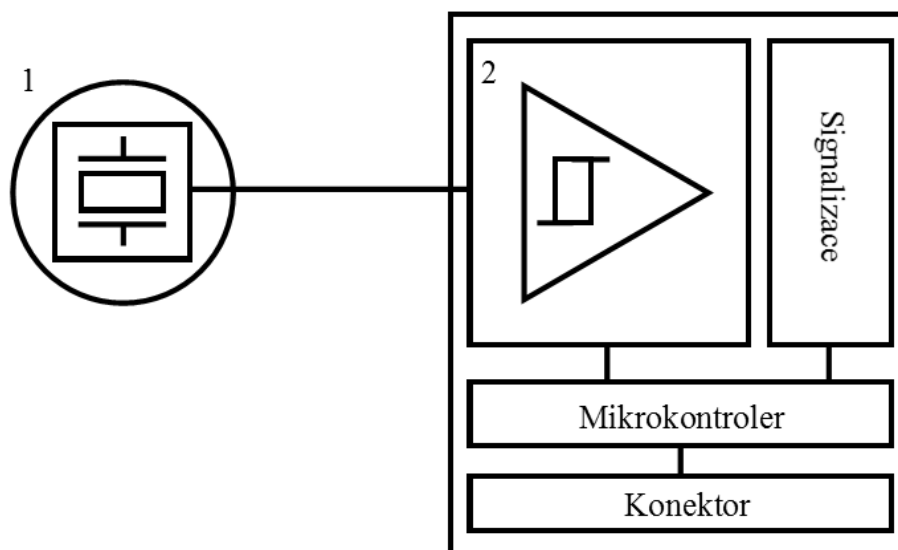
Přístroj by měl být modulární, tedy mělo by být možné složit jej ze dvou a více sond.

Obsluha zatluče sondy do kmene a poznamená si jejich pozici. Dále obsluha bude vybavena kladivem, kterým bude na vyzvání přístroje udeřovat sondy v sekvenci dané přístrojem. Po dobu měření bude nultá (řídící sonda) uchovávat naměřená data. Měřicí sekvence bude ukončena tím, že řídící sonda exportuje naměřená data do počítače, kde budou následně zpracována (viz Obrázek 10).



Obrázek 10, Koncept přístroje

5.2 Popis složení sondy



Obrázek 11, Blokové schéma složení sondy

Sonda se bude sestávat z hrotu (viz Obrázek 11(1)), který bude obsahovat piezoelektrický senzor, který bude připojen vodičem k tvarovacímu obvodu (viz Obrázek 11(2)), který příchozí akustickou vlnu transformuje na obdélníkový signál, který bude vypínat čítač synchronizovaný řídicím pulzem. Naměřený čas se poté odešle řídicí sondě.

5.3 Struktura naměřených dat

Obsluha udeří každou sondu pětkrát, tím bude zajištěno 10 měření pro každou dráhu mezi každou dvojicí sond. Naměřená data budou mít strukturu matice o $n(n-1)$ řádcích a pěti sloupcích nesoucí informaci o času letu signálu mezi příslušným párem sond.

Dráha letu	Čas letu 1	Čas letu 2	Čas letu 3	Čas letu 4	Čas letu 5
1→2	$t_{1,1}$	...	...	...	$t_{1,5}$
1→3	...				...
...1→n	...				...
2→1	...				...
2→3	...				...
...2→n	...				...
n→1	...				...
n→2	...				...
...n→(n-1)	$t_{n(n-1),1}$	...	...	...	$t_{n(n-1),5}$

Tabulka 2, Přehled struktury naměřených dat

6 Zpracování naměřených dat

Pro zpracování naměřených dat byl vybrán program Matlab, který nabízí snadný import dat z csv souboru, má již předdefinované funkce na výpočet vzdálenosti mezi jednotlivými sondami a snadný přístup k tvorbě grafického výstupu.

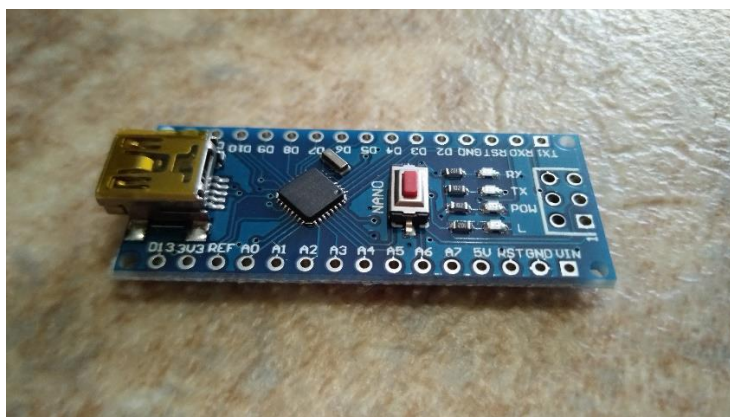
6.1 Popis funkce skriptu

Uživatel si definuje matici o velikosti 2 x (počet sond), do které uloží souřadnice jednotlivých sond. Poté spustí skript. Automaticky se vygeneruje graf, který v souřadnicovém systému vykreslí jednotlivé sondy a pro všechny dráhy letů signálu nakreslí čáru obarvenou příslušnou barvou z barevného spektra: maximální rychlost (zelená) - průměrná rychlost (žlutá) - minimální rychlost (červená). Skript je součástí přílohy.

7 Programování

7.1 Použitý mikrokontroler

Pro danou aplikaci byl vybrán mikrokontroler řady ATmega, konkrétně ATmega328p na platformě Arduino Nano. Hlavním důvodem výběru byla nízká cena, dostačující parametry, úplná dokumentace a převodník UART/USB implementovaný na desce. Jedná se o osmibitový mikrokontroler vyráběný firmou Atmel. Procesor může být buzen až 16 MHz hodinami, disponuje dvěma externími přerušováními, TWI (I2C), SPI, třemi časovači (dva jsou osmibitové a jeden šestnáctibitový), jedním USART portem, dvaceti programovatelnými I/O porty, jedním analogově-digitálním převodníkem s šesti multiplexovanými vstupy, 2 kB RAM, 1 kB EEPROM a 32 kB flash paměti pro program. Tento mikrokontroler je hodně rozšířený, neboť je využíván v platformě Arduino, konkrétně Arduino UNO, Arduino Nano (viz Obrázek 12) a Arduino Mini Pro.



Obrázek 12, Arduino Nano

7.2 Atmel studio (AVR C)

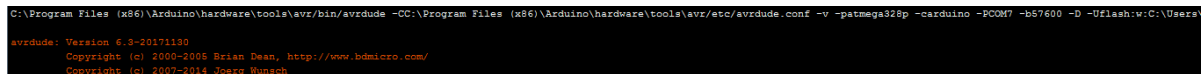
Jedná se o integrovanou vývojovou platformu (IDP) pro všechny AVR a SAM mikrokontrolery. Platforma umožňuje vyvíjet programy v C/C++ a assembleru. Programování v AVR C má oproti programování v jazyku Wiring (defaultně používaný jazyk v Arduino IDE, nastavba na AVR C) dvě zásadní výhody:

- Přímý kontakt s HW mikrokontroleru
- Následně zkompileovaný program zabírá daleko méně paměti (efektivita)

7.3 Nastavení Atmel studia pro nahrávání programu do Arduina

Programování AVR mikrokontrolerů standartně probíhá přes SPI sběrnici komunikačním protokolem STK-500, k tomu je potřeba speciální zařízení například Atmel-ICE. Pořizovací cena takového zařízení je poměrně vysoká. Arduino obsahuje vlastní bootloader, což je program zaveden na konci paměti programu. V případě Arduina tento program po zapnutí čeká několik milisekund na příchozí data z UART portu, v případě že neobdrží očekávaná data pro přepsání programu, po uplynutí tohoto času skočí do hlavního programu.

Atmel studio nepodporuje platformu Arduino, je tedy potřeba obejít nahrávání programu pomocí standardizovaných nástrojů. Při nahrávání programu v Arduino IDE si můžeme všimnout, že pro stisknutí šipky pro nahrání programu je volán program Avrdude. (viz Obrázek 13).



```
C:\Program Files (x86)\Arduino\hardware\tools\avr\bin\avrdude -CC:\Program Files (x86)\Arduino\hardware\tools\avr\etc\avrdude.conf -v -patmega328p -carduino -PCOM7 -b57600 -D -Uflash:w:C:\Users\
```

Obrázek 13, Volání Avrdude z Arduino IDE

Volání programu (standartní umístění ve Windows v případě, že máte nainstalované Arduino IDE):

```
C:\Program Files (x86)\Arduino\hardware\tools\avr\bin\avrdude
```

S parametry:

```
-CC:\Program Files
```

```
(x86)\Arduino\hardware\tools\avr\etc\avrdude.conf
```

Umístění programu s konfiguračními daty

```
-v
```

Více údajů o průběhu nahrávání programu (lze napsat vícekrát pro více údajů)

```
-patmega328p
```

Typ procesoru

-carduino

HW nástroj používaný pro nahrání programu

-PCOM7

Sériový port ke kterému je Arduino připojeno

-b57600

Rychlost přenosu

-D

Vypíná automatické smazání flash paměti

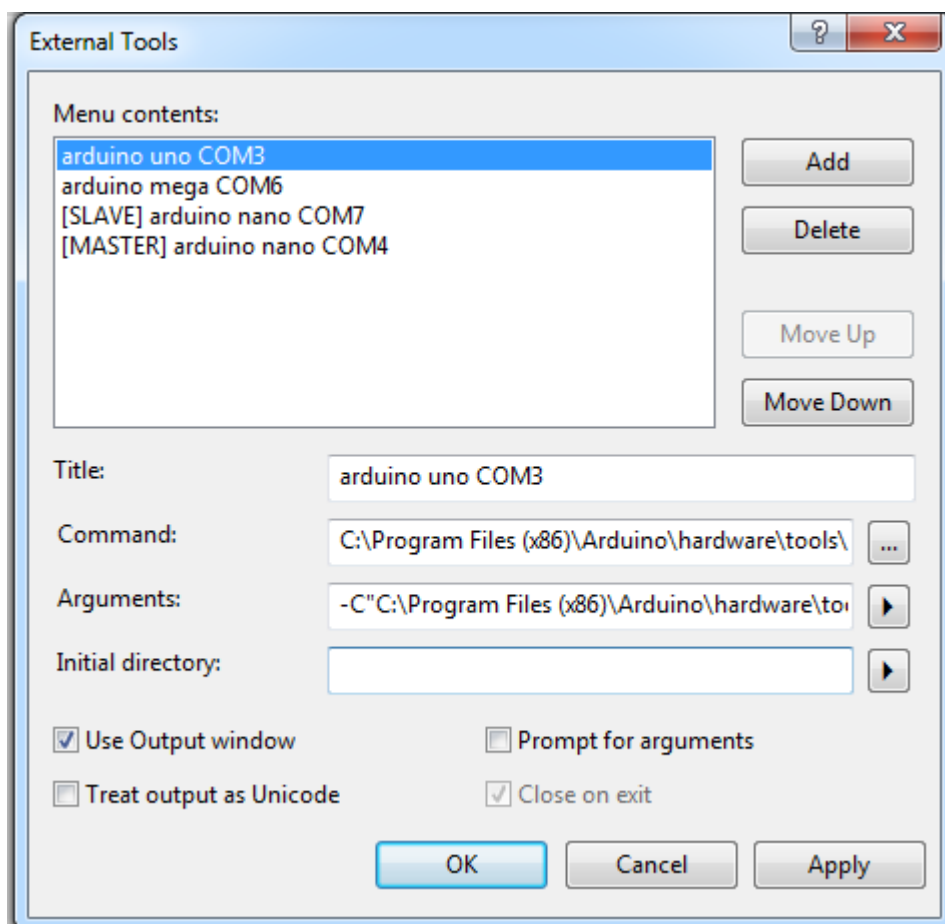
-Uflash:w:C:\Users\ASHTAR~1\AppData\Local\Temp\arduino_build_4
5235/Blink.ino.hex:i

Zapisování souboru Blink.ino.hex (zkompilovaný program) do flash paměti

V Atmel studiu si tedy nakonfigurujeme „externí nástroj“ v záložce Tools→External Tools vyskočí na nás okno (viz Obrázek 14). Stiskneme Add. V kolonce Title si vyplníme, jak si přejeme, aby se náš nástroj jmenoval. Do kolonky Command vložíme cestu k Avrdude. Do kolonky Arguments vložíme celý řetězec parametrů, který jsme si zkopírovali z Arduino IDE, ale upravíme parametr -U, tak aby ukazoval na zkompilovaný program v aktuálně otevřeném projektu:

-Uflash:w:"\$(ProjectDir)Debug\\$(TargetName).hex":i

A konečně ještě zaškrtneme možnost Use Output window abychom podobně jako v Arduino IDE viděli výpis Avrdude pod námi napsaným programem.



Obrázek 14, Atmel studio, Tools → External Tools

7.4 Přerušení

Mikrokontroler může obsluhovat více zařízení. Existují dva způsoby, jakými může mikrokontroler obsluhovat připojená zařízení. Buď mikrokontroler hlídá jejich stav a v případě, že stav připojeného zařízení splní nějakou podmínku, je obslouženo. Tato metoda není optimální, neboť mikrokontroler nemůže vykonávat jinou činnost než čekat, že se splní podmínka. Nebo na sebe zařízení upozorní vysláním přerušovacího signálu, mikrokontroler pozastaví právě prováděnou činnost a začne obsluhovat dané zařízení. [2]

7.4.1 Rutina přerušení

V případě že je vyvoláno přerušení, mikrokontroler provede rutinu přerušení. Obecně v mnoha mikroprocesorech má každé přerušení přidělené pevné místo v paměti programu, které obsahuje adresu rutiny přerušení. Skupina těchto vyhrazených míst se nazývá tabulka vektorů přerušení (viz Tabulka 3) [2].

Můžeme si všimnout, že v mikrokontroleru ATmega328P má každé přerušení přidělené 2 slova paměti programu (4 byty), to je poměrně málo pro vykonání podprogramu, proto se

toto místo využívá pro uložení instrukce JMP (přímý skok – tedy vložení konstanty do čítače instrukcí). Tato instrukce v paměti zabírá přesně 2 slova.

Přerušení	Adresa v paměti programu
RESET	0x0000
INT0	0x0002
INT1	0x0004
...	...
SPM READY	0x0032

Tabulka 3, Shrnutí tabulky vektorů přerušení ATmega328p. Zdroj: [3]

7.4.2 Výkon přerušení

V případě vyvolání přerušení mikrokontroler provede následující:

- 1) Dokončí stávající instrukci a uloží adresu následující instrukce (čítač instrukcí) do zásobníku
- 2) Provede skok na příslušné místo v tabulce vektorů přerušení, kde je odkázán na příslušnou rutinu přerušení
- 3) Provádí rutinu přerušení. Poslední instrukce rutiny přerušení je v assembleru instrukce RETI (return from interrupt)
- 4) Po provedení instrukce RETI se mikrokontroler nachází ve stavu, v jakém byl před příchodem přerušení. Ze zásobníku si přesune poslední bajty do čítače instrukcí a začne operovat od této adresy v programu (při programování v assembleru je potřeba hlídat si operace se zásobníkem, musíme zajistit, že při volání instrukce RETI zásobník opravdu obsahuje to, co obsahovat má, jinak dojde ke skoku na špatnou adresu a program přestane fungovat)

7.5 Časovač/čítač

Řada aplikací potřebuje čítat externí pulzy nebo případně generovat časové zpoždění. Právě pro tyto příležitosti slouží v mikrokontrolerech časovače. Obecně se jedná o programovatelný čítač, který je buzený buď externím signálem skrze I/O porty, nebo oscilátorem. Hodnota čítače poté odpovídá buď počtu přichozích pulzů za dobu od vynulování čítače, nebo času spuštění od vynulování čítače.

7.5.1 Operační módy časovače/čítače 0 v AVR

- Normální operační mód

V tomto módu čítač čítá pouze směrem nahoru a po dosažení maximální hodnoty (0xFF) přeteče, tedy začíná opět od hodnoty 0x00. Při přetečení je možné generovat přerušení.

- CTC (Clear Timer on Compare match) mód

V tomto módu čítač stejně jako v normálním operačním módu čítá pouze směrem nahoru, ale při dosažení hodnoty uložené v registru OCR0A se resetuje na hodnotu 0x00. Při dosažení hodnoty OCR0A lze generovat přerušení například pro změnu hodnoty OCR0A, v případě, že nastavíme tuto hodnotu tak nízkou, že časovač nestihne zareagovat, čítač čítá do hodnoty 0xFF, může vygenerovat přerušení přetečení (čímž můžeme zjistit, že nastala chyba) a až v dalším cyklu resetuje čítač po dosažení hodnoty OCR0A.

- PWM

Čítač čítá od hodnoty 0x00 do hodnoty 0xFF, při průchodu hodnotou uloženou v registru OCR0A a OCR0B přivede na PORTD (bit 5 v případě hodnoty OCR0A a bit 4 v případě hodnoty OCR0B) logickou 1, při průchodu nulou nastaví oba bity v PORTD na logickou 0, případně naopak v závislosti nastavení bitů COM0A0:1 a COM0B0:1 v registru TCCR0A.

7.5.2 Ovládání časovače/čítače 0 v AVR

Tato periférie je ovládána pomocí sedmi registrů (TCCR0A, TCCR0B, TCNT0, OCR0A, OCR0B, TIMSK0, TIFR0)

V registrech TCCR0A a TCCR0B najdeme bity COM0A1,2 a COM0B1,2, jejichž hodnota přiřazuje funkci bitu 5 a 4 v PORTD, dále zde najdeme bity WGM02:0, kterými volíme mód operace periférie, a bity CS02:0, kterými lze nastavit zdroj hodinových pulzů určující rychlost inkrementace čítače.

Registr TCNT0 drží hodnotu čítače. Registry OCR0A a OCR0B jsou registry uchovávající hodnotu se kterou se porovnává hodnota registru TCNT0 v CTC a PWM módech.

Registr TIMSK0 je maska přerušení. TIFR0 je registr příznaků čítače.

7.6 Asynchronní sériová komunikace

Jedná se o druh sériové komunikace, kdy vysílač vždy striktně vysílá jen určitý počet bitů (rámeček). Vyslání daných bitů je vždy předcházeno jedním start bitem a ukončeno jedním nebo dvěma stop bity. Přenosová linka má v klidovém režimu hodnotu logické 1, tedy start bit je vždy logická 0, následuje přenos dat v pořadí LSB first (bit s nejmenší vahou první), následně může, ale nemusí být přenášen paritní bit, přenos datového rámce je dokončen jedním nebo dvěma stop bity.

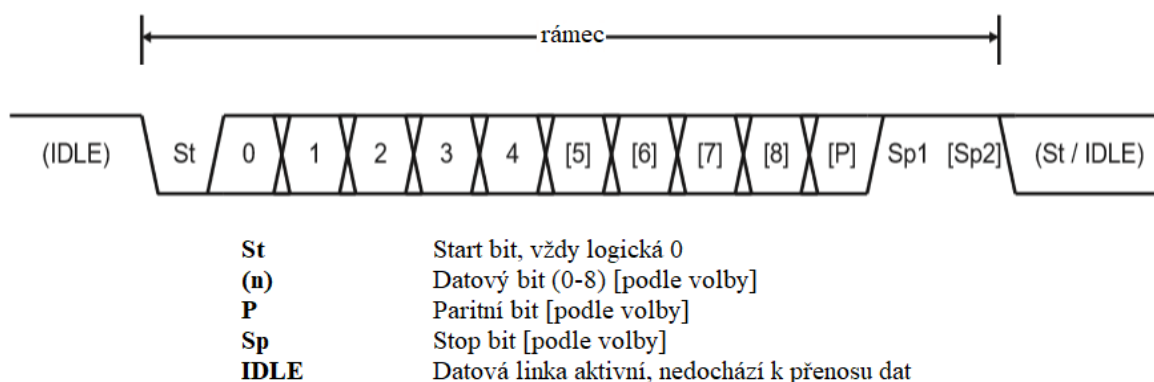
7.6.1 Přenosová rychlost

Přenosová rychlost se udává v bps (bitech za sekundu). Je potřeba, aby jak vysílač, tak i přijímač věděli, jakou rychlostí spolu komunikují, jinak nedojde ke správné interpretaci dat. V případě že komunikujeme s PC je potřeba brát v potaz, že PC podporuje pouze určité

rychlosti přenosů (300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800, 38400, 57600 nebo 115200 bps)

7.6.2 USART v AVR

AVR nabízí periférii s názvem USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter) Jedná se o periférii s možností plně duplexního přenosu dat v synchronním nebo asynchronním režimu. Podporuje rámce s 5, 6, 7, 8 nebo 9 datovými bity a jedním nebo dvěma stop bity (viz Obrázek 15). V případě že chceme obsáhnout i paritní bit, je generován hardwarově. Ovládání této periférie je zajištěno pomocí pěti registrů (UDR0, UCSR0A, UCSR0B, UCSR0C a UBRR0).



Obrázek 15, Datový rámec USART v AVR. Zdroj: [3]

Registr UDR0 (USART Data Register) slouží jako vstupně-výstupní registr (zabírá pouze jednu adresu v datové paměti, ale uchovává 2x8 bitů, architektura podle toho, jestli do registru zapisujeme nebo z něj čteme, rozpozná, do jaké části přistupujeme).

Registry UCSR0A, UCSR0B a UCSR0C (USART Control and Status Register) slouží k ovládání periférie, zároveň slouží jako registry příznaků. Z řídicí části zde můžeme najít například bity U2X0 (slouží k zdvojnásobení rychlosti přenosu), RXEN0, TXEN0 (slouží k aktivaci periférie), UCZ02:0 (volíme počet přenášených datových bitů), RXB80, TXB80 (místo, kde se nachází datový bit 8 v případě, že chceme používat rámec s devíti datovými bity), UPM01:0 (volba paritního bitu, sudá/lichá parita), USBS0 (počet stop bitů) a UMSEL01:0 (volba operace periférie synchronní/asynchronní). Z příznaků zde lze najít například RXC0 nebo TXC0 (USART Receive/Transmit Complete).

V případě, že se bavíme o registru UBRR0, myslíme tím dva registry UBRR0L a UBRR0H, které obsahují 12 bitů sloužících k nastavení rychlosti přenosu z tabulky:

U2X0 = 0	$Rychlost\ přenosu\ [bps] = \frac{f_{CPU}}{16(UBRR0+1)}$
U2X0 = 1	$Rychlost\ přenosu\ [bps] = \frac{f_{CPU}}{8(UBRR0+1)}$

Tabulka 4, určení rychlosti přenosu UART v AVR. Zdroj: [3]

7.6.3 Popis aplikace

Arduino je osazeno převodníkem USB na UART (CH340G v případě Arduino nano, ATmega16u4 v případě Arduino Uno). Tento převodník slouží pro nahrání programu pomocí bootloaderu, po dokončení bootovací sekvence lze tento převodník používat pro komunikaci s počítačem přes USB. Jedná se o jedinou možnost, jak z platformy Arduino přenést data do počítače bez použití jakéhokoliv přídavného hardware.

7.7 TWI (I²C)

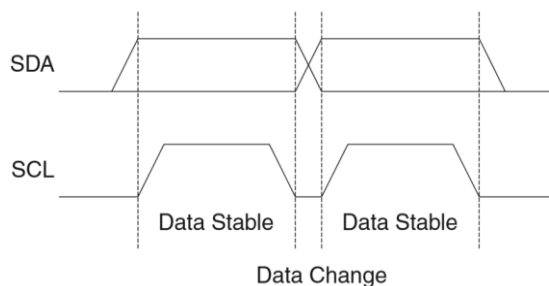
I²C je sběrnice rozhraní používané mnoha zařízeními jako jsou senzory, generátory reálného času a paměti EEPROM. I²C sběrnice byla původně vyvinuta firmou Phillips, ale postupem času ji začali do svých výrobků implementovat i jiní výrobci integrovaných obvodů. I²C je ideální pro připojení pomalých periférií k základním deskám počítačů, embedded systémů, nebo kdekoliv jinde, kde je zapotřebí zajistit spolehlivou komunikaci na krátkou vzdálenost. I²C zařízení používají pouze 2 signály pro přenos dat. Nazývají se SCL (Serial Clock), což je synchronizační signál a SDA (Serial Data). V datasheetech AVR mikrokontrolerů se pro toto rozhraní používá název TWI (Two Wire Interface) [2].

7.7.1 I²C Uzly

Každé zařízení připojené ke sběrnici I²C se nazývá uzel. AVR podporuje připojení až 120 uzlů. Každý z těchto uzlů může pracovat buď jako master (pán), nebo jako slave (sluha). Master je zařízení, které generuje SCL signál a určuje tak rychlost přenosu dat, zároveň začíná a ukončuje komunikaci, slave pouze čeká na to, než je vyvolán masterem. Master i slave mohou ještě navíc pracovat v módu přijímače a vysílače [2].

7.7.2 Přenos dat

I²C je synchronní sériový protokol, každý bit dat přenášený po lince SDA je synchronizován sestupnou hranou SCL signálu. SDA signál se nesmí změnit v případě, že je SCL signál ve stavu logické 1 (viz Obrázek 16) [2].



Obrázek 16, Časování na sběrnici I²C. Zdroj: [3]

Jedinou výjimkou je vyslání START a STOP signálu, který vysílá pouze master. Před zasláním prvního paketu dat změní při SCL v logické 1 SDA z logické 1 do logické 0, tím

TWSR1	TWSR0	Prescaler
0	0	1
0	1	4
1	0	16
1	1	64

Tabulka 5, Vliv TWSR1 a TWSR0 na frekvenci přenosu dat. Zdroj: [3]

Po přemaskování hodnoty registru TWSR hodnotou 0b11111000 dostaneme stav periferie, v datasheetu je detailní obsáhlá tabulka všech možných stavů a všech možností, jak s těmito stavy nakládat pomocí registru TWCR. Registr TWCR určuje, co bude celá TWI periferie dělat v následujícím kroku, každý jeho bit má svou funkci, nalezneme zde bit TWEA (Enable Acknowledgement), TWSTA (START), TWSTO (STOP) a další.

7.7.4 Uvážení vhodnosti aplikace

Tato sběrnice byla vyvinuta pro komunikaci na krátkou vzdálenost (zhruba do 1 m), pro naši aplikaci musíme tedy uvážit vhodnost aplikace v závislosti na její charakteristice uvedené v datasheetu výrobce (viz Tabulka 6, Shrnutí vlastností TWI AVR pro určení vhodnosti aplikace).

Řekněme tedy, že náš systém z důvodu omezení datové paměti bude podporovat maximálně 10 sond, tyto sondy budou propojeny UTP CAT5 kabelem, řekněme o celkové délce 2m (takový kabel má nominální kapacitu 50 nF/km, tedy na 2 m délky 100 pF), rychlost přenosu bude nastavena na 100kHz.

Celková kapacita sběrnice bude tedy v ideálním případě ≤ 200 pF, tím splňujeme podmínku pro dodržení deklarované doby sestupné hrany signálu. Hodnota pull-up rezistoru by se měla pohybovat v rozmezí 1534-5000 Ω . Vzhledem k tomu, že se vzrůstající hodnotou kapacity sběrnice se maximální hodnota pull-up rezistoru snižuje, zvolíme jeho hodnotu blíže k minimální hranici (řekněme 2,2k Ω abychom mohli osadit desku i rezistorem z řady E6).

Symbol	Název	Podmínka	Min	Max	Jednotka
t_{of}	doba sestupné hrany signálu	$10 \text{ pF} < \text{kapacita sběrnice}(C_b) < 400 \text{ pF}$	$20+0,1C_b$	250	ns
C_i	kapacita I/O pinu	-	-	10	pF
R_p	hodnota pull-up rezistoru	$f_{SCL} \leq 100 \text{ kHz}$	$\frac{V_{CC}-0,4V}{3mA}$	$\frac{1000ns}{C_b}$	Ω
		$f_{SCL} > 100 \text{ kHz}$	$\frac{V_{CC}-0,4V}{3mA}$	$\frac{1000ns}{C_b}$	Ω

Tabulka 6, Shrnutí vlastností TWI AVR pro určení vhodnosti aplikace. Zdroj: [3]

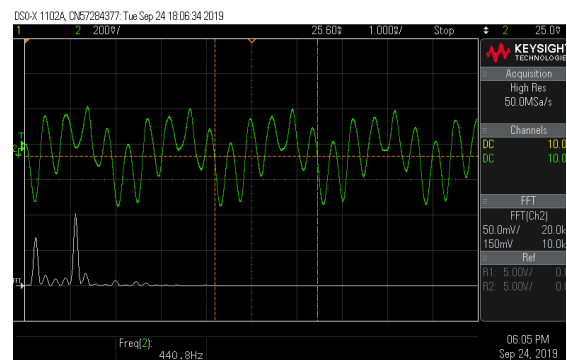
8 Konstrukce sondy

8.1 Možnosti využití piezoelektrického snímače

Pro detekci zvukových vln byl vybrán piezoelektrický měnič, který se dá využít například jako kontaktní mikrofon pro hudební nástroje (viz Obrázek 19 a Obrázek 20), nebo s ním lze změřit pletysmografickou křivku (viz Obrázek 21 a Obrázek 22).



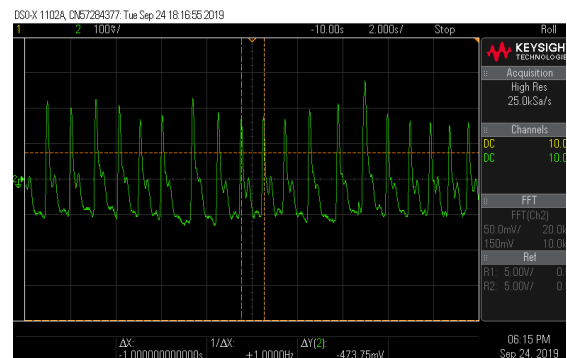
Obrázek 19, Piezosnímač jako kontaktní mikrofon



Obrázek 20, Výstup kontaktního mikrofonu



Obrázek 21, Piezoelektrická pletysmografie



Obrázek 22, Pletysmografická křivka

8.2 Prvotní pokus o detekci zpoždění zvukové vlny

8.2.1 Popis experimentu

Experiment bude proveden na dřevěném trámu, sondy budou umístěny po délce trámu.

Cílem experimentu je ověření schopnosti detekovat akustickou vlnu generovanou úderem kladiva a její zpoždění mezi jednotlivými body.

8.2.2 Konstrukce hrotu

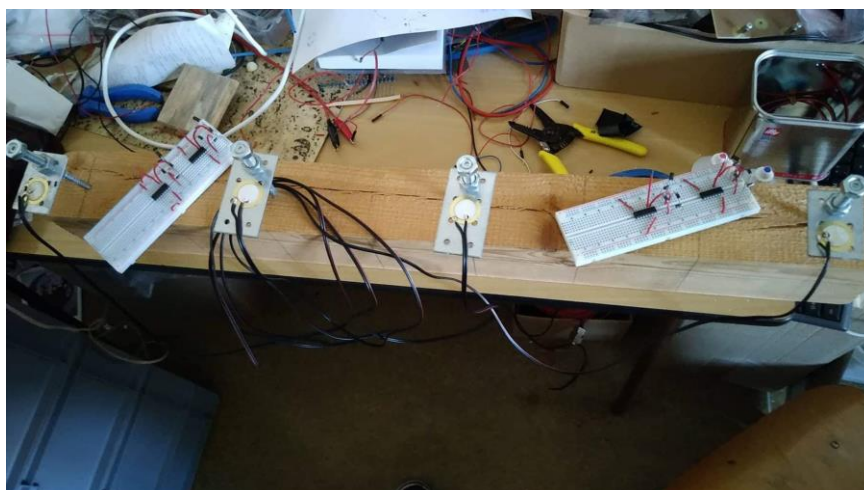
Hroty byly zhotoveny z kombinovaných šroubů/vrutů, jejichž vrutová část byla zbroušena do tvaru hrotu, na metrický závit byla našroubovaná matka, navlečený plech s dírou držící piezoelektrický senzor přitažený opět matkou. (viz Obrázek 23)



Obrázek 23, Hrot pro experiment 8.2

8.2.3 Vzorek

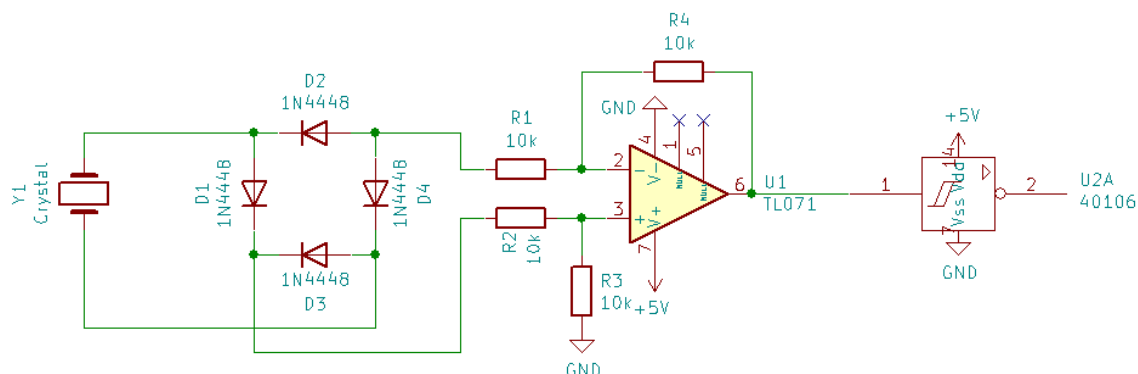
Jako vzorek byl vybrán smrkový trám o délce 0,8 m s rozměry podstavy 8x9 cm



Obrázek 24, Vzorek 8.2

8.2.4 zapojení

- 1) Piezoelektrický disk, osciloskop
- 2) Piezoelektrický disk, usměrňovač, diferenciální zesilovač, tvarovač a osciloskop



Obrázek 25, zapojení pro pokus 8.2 2)

8.2.5 Postup měření

Do vzorku byly zaraženy hroty s rozstupem 20 cm, 40 cm a 70 cm. Vzorek byl položen na měkkých podpěrách. Krátkým ostrým úderem kladívka byl generován signál. Zpoždění signálu bylo odečítáno na osciloskopu a zaznamenáno do tabulky, která je součástí přílohy.



Obrázek 26, Kladívko pro experiment 8.2

8.2.6 Shrnutí experimentu

Tento design nepřináší opakovatelné výsledky, signál je zkreslen vyššími harmonickými složkami, které vznikají konstrukcí hrotu. náběžná hrana signálu je někdy málo strmá, což vede ke špatnému tvarování signálu a špatné opakovatelnosti měření.

Bylo navrženo navázat experimentem s rigidnějším hrotem pro utlumení vyšších harmonických složek signálu, dále bylo navrženo zaměnit kovové kladívko za gumové a celý experiment provést na vzorku, který bude simulovat nasazení v reálném provozu.

8.3 Experiment simulující reálné nasazení

8.3.1 Popis experimentu

Experiment bude simulovat nasazení na reálném objektu, tj. špalek ze stromu. Měření bude probíhat na zdravém kusu dřeva, následně bude ten samý vzorek modifikován vyhloubením otvoru uprostřed. Cílem experimentu je vyzkoušení funkčnosti nového designu hrotu a dalších zapojení.

8.3.2 Konstrukce hrotu

Byl zhotoven jednoduchý hrot pevně spojený s držákem piezoelektrického disku (viz Obrázek 27)



Obrázek 27, Hrot pro experiment 8.3

8.3.3 Vzorek

- Špalek borovice \varnothing ~500 mm ,výška ~350 mm
- Vzorek a) s vyvrtaným otvorem uprostřed \varnothing ~200 mm



Obrázek 28, Vzorek 8.3 a)

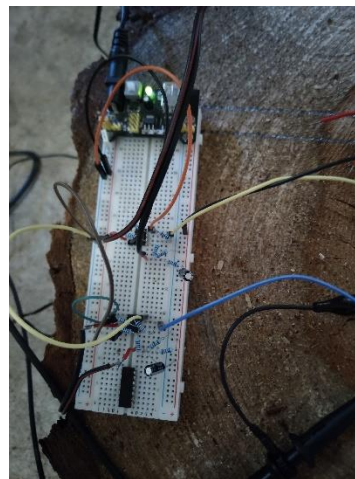


Obrázek 29, Vzorek 8.3 b)

8.3.4 Výbava



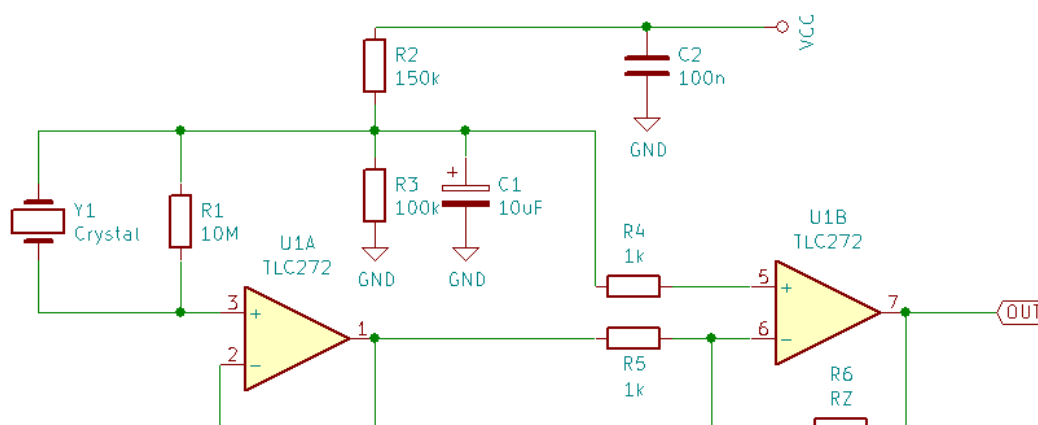
Obrázek 30, Kladívko pro experiment 8.3



Obrázek 31, Zesilovač

8.3.5 Zapojení

- 1) Piezoelektrický disk bez zesilovače, osciloskop
- 2) Zesilovač dle schématu ($R_z = 100 \text{ k}\Omega$), osciloskop
- 3) Zesilovač dle schématu ($R_z = 1 \text{ M}\Omega$), osciloskop



Obrázek 32, Zapojení 2) a 3). Zdroj: [6]



Obrázek 33, Celkové zapojení se vzorkem a)



Obrázek 34, Celkové zapojení se vzorkem b)

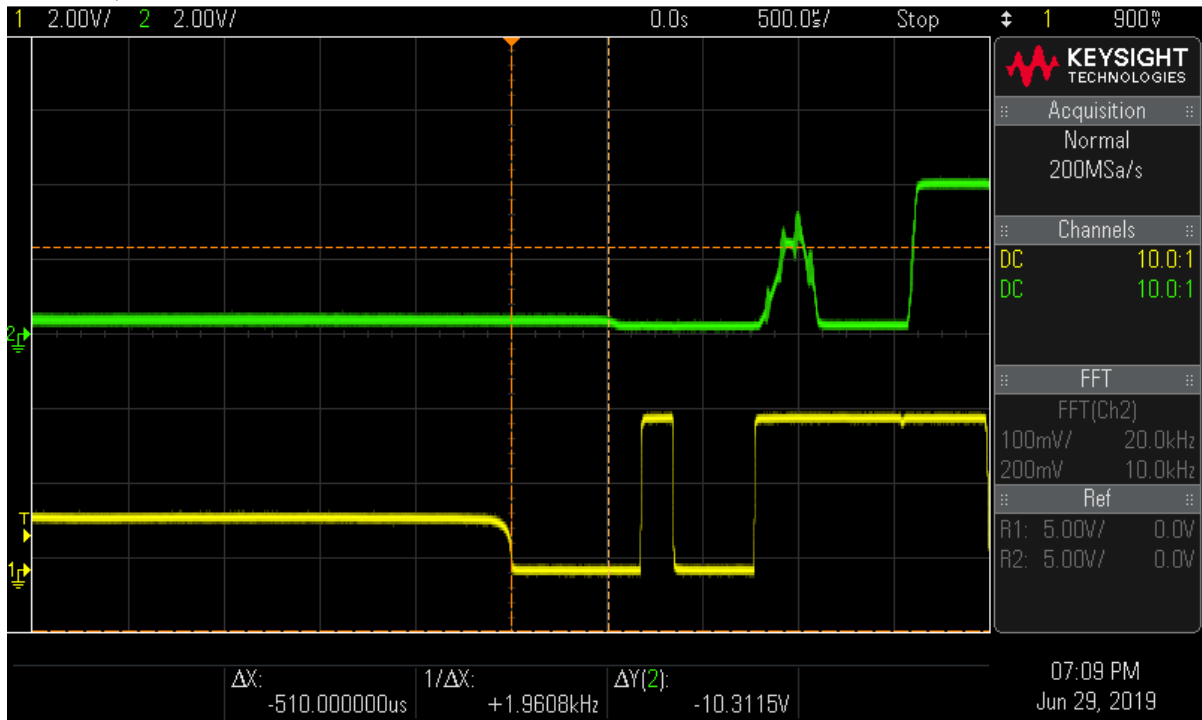
8.3.6 Postup měření

Do vzorku byly zaraženy hroty s piezoelektrickým senzorem, jejich pozice byla zaznamenána do tabulky:

	1	2	3	4
x [mm]	0	-273	-89	185
y [mm]	0	173	496	352

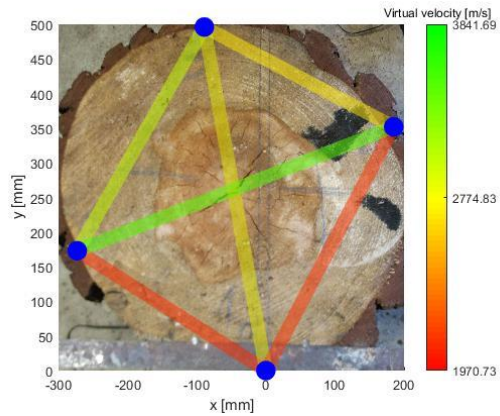
Tabulka 7, Pozice sond v experimentu 8.3

Krátkým ostrým úderem kladívka na hrot se vygeneroval signál. Na osciloskopu bylo odečítáno zpoždění signálu vůči sobě (viz Obrázek 35) a zaneseno do tabulky v μs . Tento postup byl opakován 5x pro každou kombinaci dvou hrotů. Data byla vizualizována skriptem v Matlabu (popsaném v kapitole 6.1).

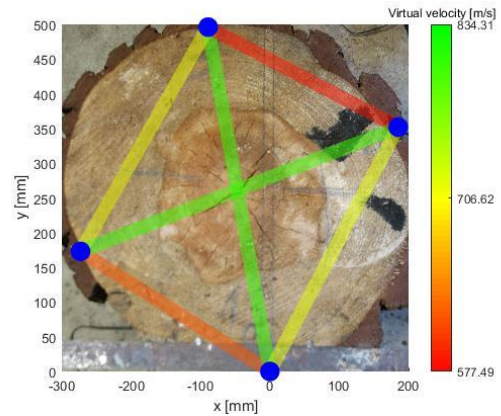


Obrázek 35, Odečet zpoždění signálu pro experiment 9.2

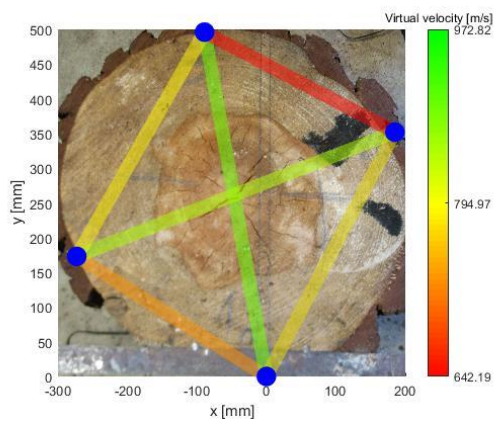
8.3.7 Výsledky



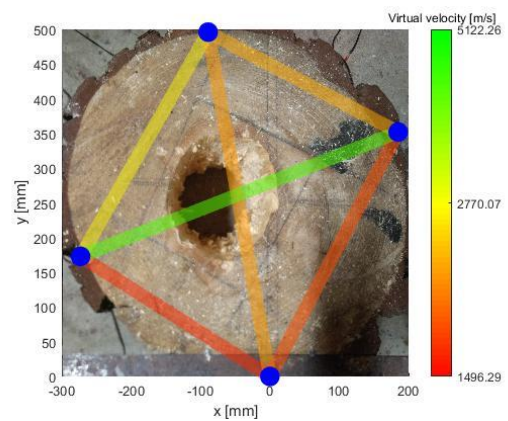
Obrázek 36, Výsledek měření a) 1)



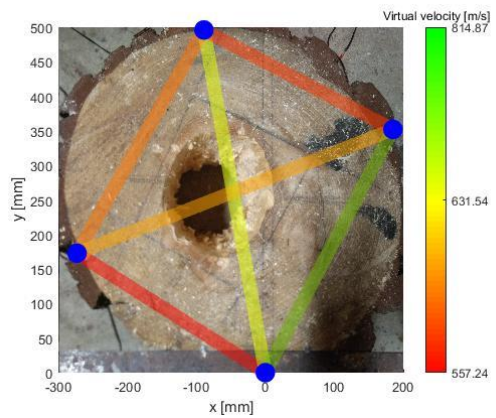
Obrázek 37, Výsledek měření a) 2)



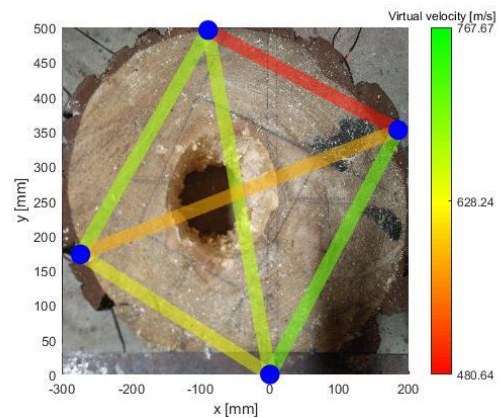
Obrázek 38, Výsledek měření a) 3)



Obrázek 39, Výsledek měření b) 1)



Obrázek 40, Výsledek měření b) 2)



Obrázek 41, Výsledek měření b) 3)

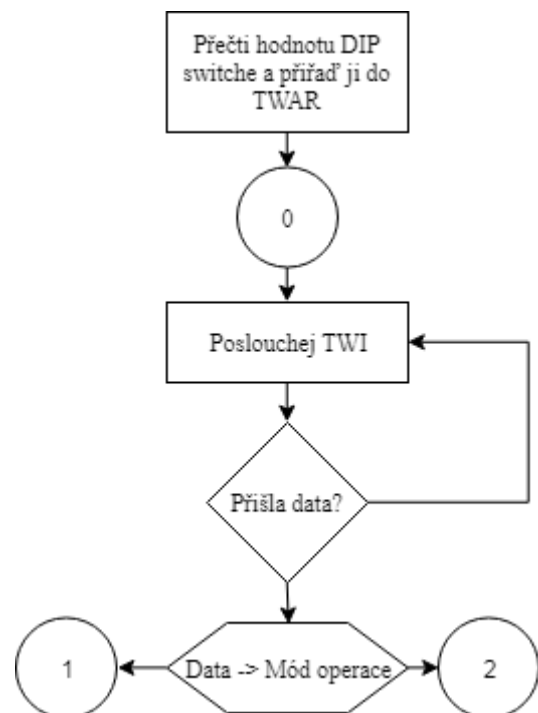
9 Realizace

9.1 Vývojové diagramy

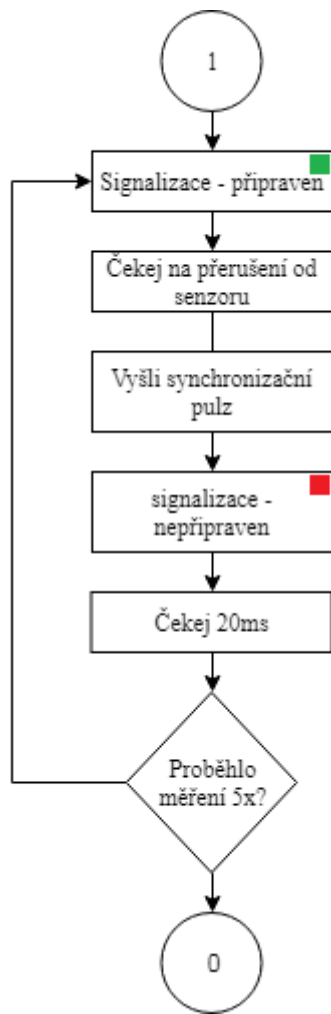
Pro jednotlivé sondy byl napsán program na základě informací v kapitole 7 a podle následujících vývojových diagramů (viz Obrázek 42 - Obrázek 45). Program je součástí přílohy.



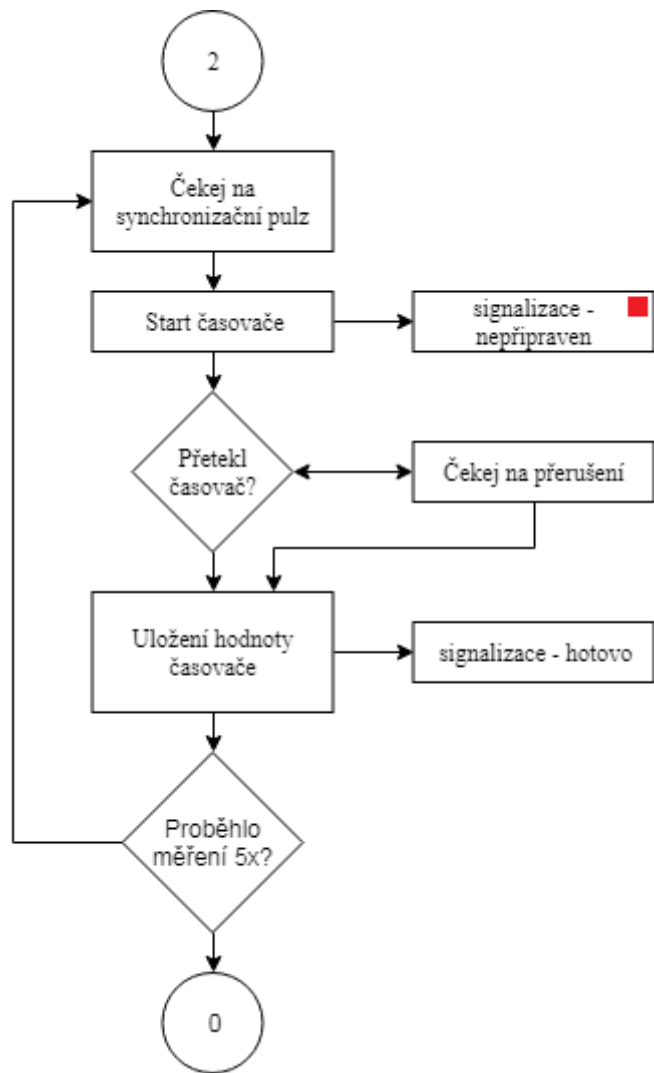
Obrázek 42, Program řídicí sondy



Obrázek 43, Program ostatních sond



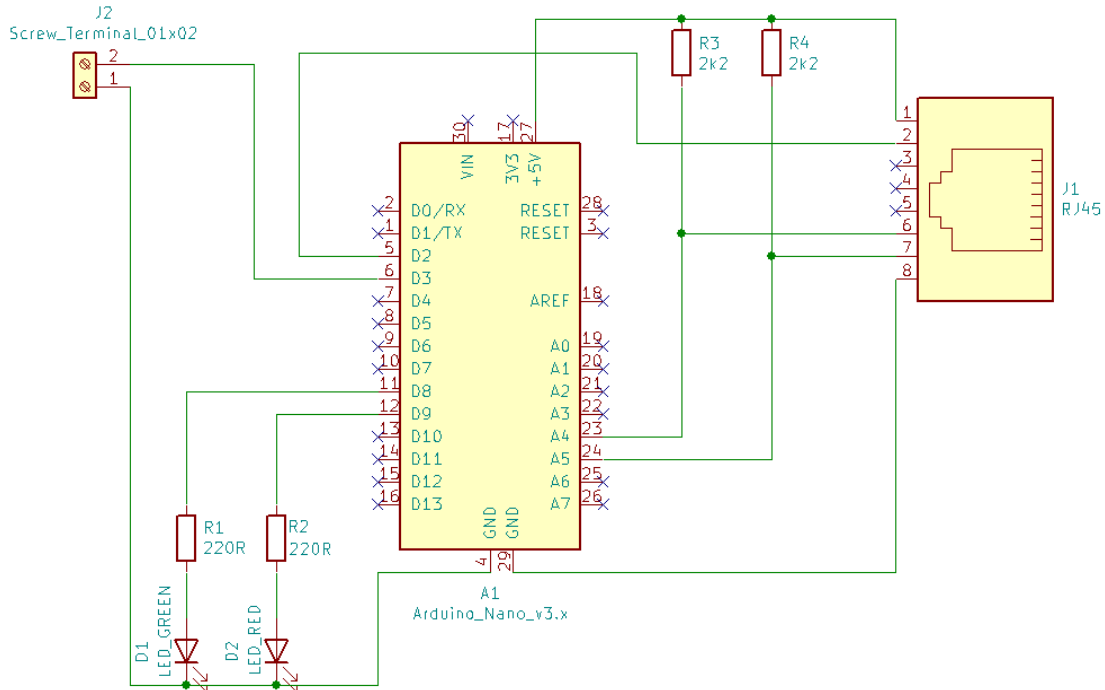
Obrázek 44, Mód 1 – senzor je udeřován kladivem



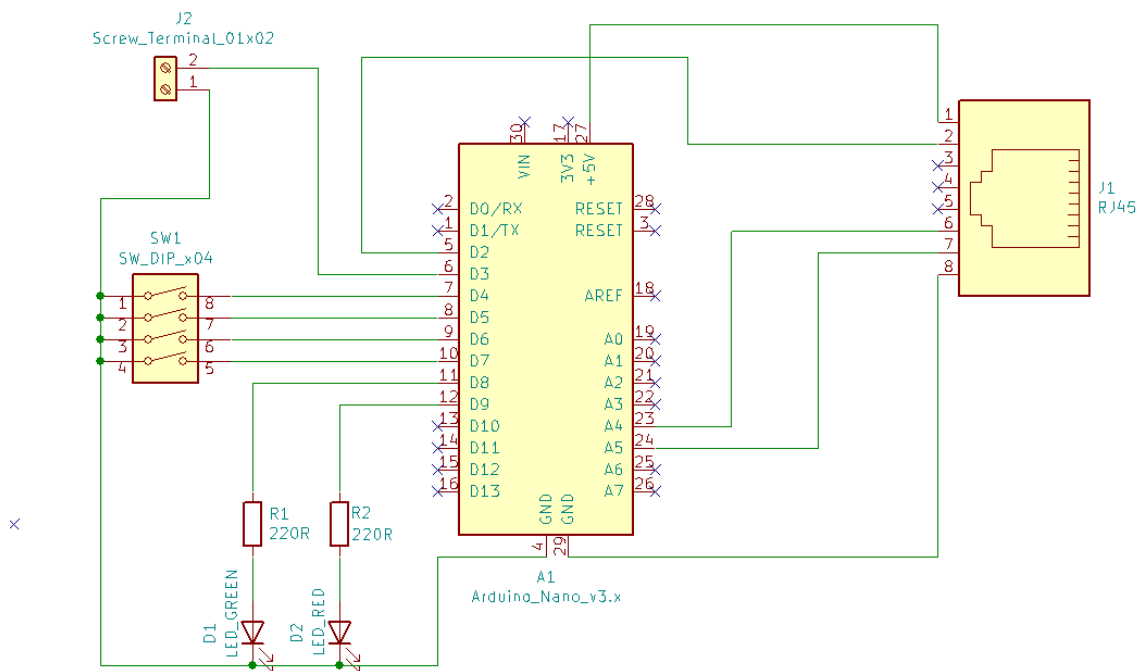
Obrázek 45, Mód 2 – senzor měří zpoždění signálu

9.2 Schéma zapojení

Každá sonda obsahuje signalizační LED diody, RJ45 konektor a šroubovací terminál pro senzorový vstup. Hlavní sonda je osazena dvěma pull-up rezistory pro TWI (viz Obrázek 46) a vedlejší sonda disponuje sadou čtyř přepínačů pro volbu adresy (viz Obrázek 47).



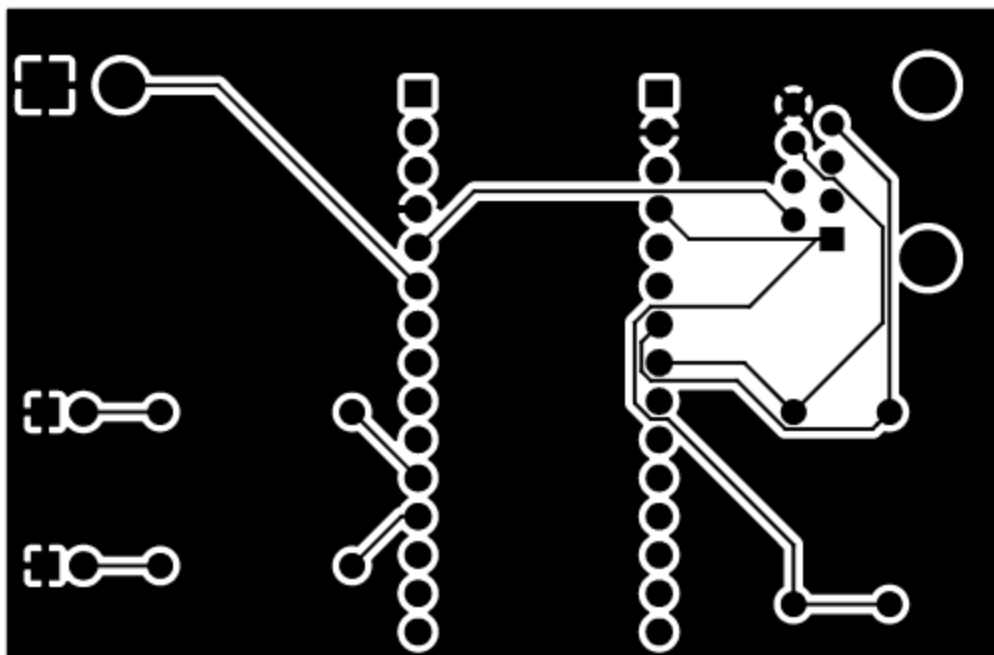
Obrázek 46, Schéma zapojení hlavní sondy



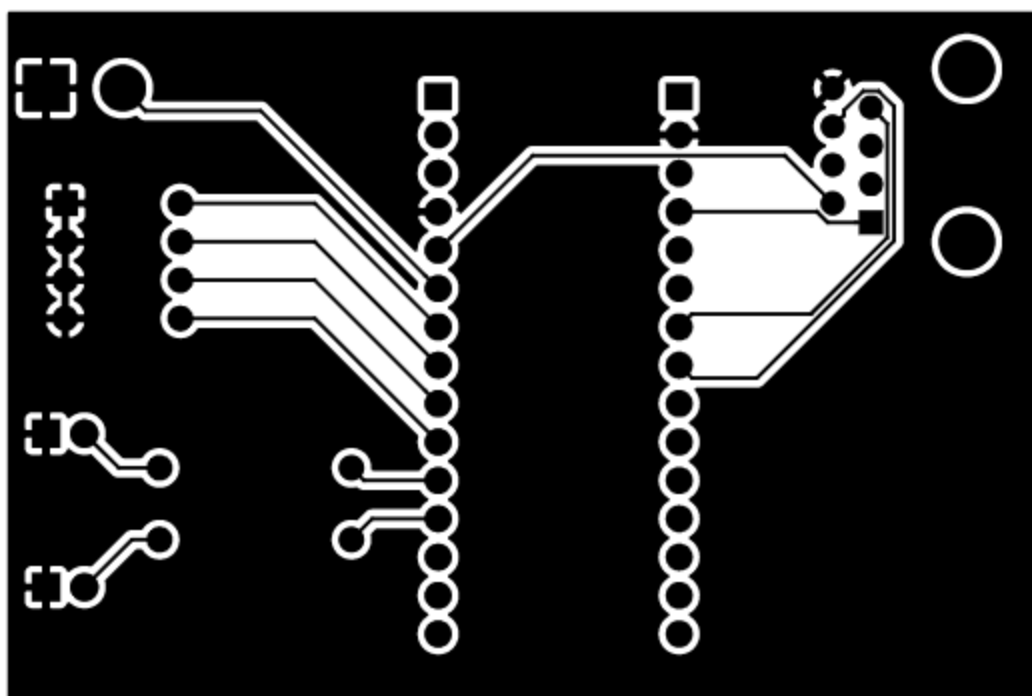
Obrázek 47, Schéma zapojení ostatních sond

9.3 Desky plošných spojů

Pro výše zmíněné zapojení byly vytvořeny návrhy desek plošných spojů v programu KiCad. Gerber data pro výrobu jsou v příloze.



Obrázek 48, Deska plošných spojů pro hlavní sondu



Obrázek 49, Deska plošných spojů pro ostatní sondy

10 Závěr

Bakalářská práce měla tyto cíle:

- 1) Shrnout možnosti využití zvuku pro zjišťování mechanických vlastností materiálů
- 2) Navrhnout možné řešení pro stromovou tomografii
- 3) Provedení testovacích měření
- 4) Vytvoření výrobní dokumentace navrženého řešení

V práci byly shrnuty možnosti využití zvuku pro zjišťování mechanických vlastností materiálů. Tyto informace byly experimentálně využity pro návrh přístroje pro stromovou tomografii.

Byl sestaven prototyp měřicího přístroje na platformě Arduino, pro tento prototyp byl vyvinut a odladěn program. Bylo otestováno několik možností realizace samotného senzoru.

K naprogramování přístroje bylo využito oficiální vývojové prostředí pro AVR mikrokontrolery z důvodu možnosti přímějšího kontaktu s architekturou mikrokontroleru.

Originálně bylo navrženo využití tvarovacího obvodu pro detekci příchozí zvukové vlny. Signál dodávaný senzorem nebyl dostatečně kvalitní pro použití této metody.

Byly vyzkoušeny dvě mechanické realizace senzoru. V prvním případě byly zjištěny vážné nedostatky konstrukce. V dalším sestavení byly nedostatky výrazně omezeny. Použitím gumového kladívka a změnou designu sondy bylo docíleno omezení nežádoucích vibrací a zlepšení doby náběhu signálu.

Pro případné zlepšení výsledků by bylo možné použít průmyslových akcelerometrů. Toto řešení nebylo využito z důvodu časového a finančního omezení.

11 Seznam obrázků

Obrázek 1, Snellův zákon. Zdroj: [1]	3
Obrázek 2, Změna módu šíření vlny. Zdroj: [1].....	3
Obrázek 3, Pulse-echo a Pitch-catch metoda. Zdroj: [1].....	4
Obrázek 4, Impact-echo metoda. Zdroj: [1]	5
Obrázek 5, Frekvenční analýza u Impact-echo metody. Zdroj: [1].....	6
Obrázek 6, Postup vyhodnocení Impact-echo metody ve frekvenční oblasti. Zdroj: [1].....	7
Obrázek 7, Reálná dráha zvukového signálu.....	8
Obrázek 8, Výstup z reálného přístroje. Zdroj: [5].....	9
Obrázek 9, a) Počítač včetně externích periférií b) Mikrokontroler. Zdroj: [2].....	9
Obrázek 10, Koncept přístroje.....	10
Obrázek 11, Blokové schéma složení sondy	11
Obrázek 12, Arduino Nano.....	12
Obrázek 13, Volání Avrdude z Arduino IDE.....	13
Obrázek 14, Atmel studio, Tools → External Tools	15
Obrázek 15, Datový rámec USART v AVR. Zdroj: [3].....	18
Obrázek 16, Časování na sběrnici I ² C. Zdroj: [3]	19
Obrázek 17, START a STOP signál. Zdroj: [3]	20
Obrázek 18, Přenos celé dávky I ² C dat. Zdroj: [3].....	20
Obrázek 19, Piezosnímač jako kontaktní mikrofon.....	22
Obrázek 20, Výstup kontaktního mikrofonu	22
Obrázek 21, Piezoelektrická pletysmografie	22
Obrázek 22, Pletysmografická křivka	22
Obrázek 23, Hrot pro experiment 8.2	23
Obrázek 24, Vzorek 8.2	23
Obrázek 25, zapojení pro pokus 8.2 2).....	24
Obrázek 26, Kladívko pro experiment 8.2	24
Obrázek 27, Hrot pro experiment 8.3	25
Obrázek 28, Vzorek 8.3 a).....	25
Obrázek 29, Vzorek 8.3 b).....	25
Obrázek 30, Kladívko pro experiment 8.3	26
Obrázek 31, Zesilovač	26
Obrázek 32, Zapojení 2) a 3). Zdroj: [6]	26
Obrázek 33, Celkové zapojení se vzorkem a)	27

Obrázek 34, Celkové zapojení se vzorkem b)	27
Obrázek 35, Odečet zpoždění signálu pro experiment 9.2	28
Obrázek 36, Výsledek měření a) 1)	29
Obrázek 37, Výsledek měření a) 2)	29
Obrázek 38, Výsledek měření a) 3)	29
Obrázek 39, Výsledek měření b) 1)	29
Obrázek 40, Výsledek měření b) 2)	29
Obrázek 41, Výsledek měření b) 3)	29
Obrázek 42, Program řídicí sondy	30
Obrázek 43, Program ostatních sond	30
Obrázek 44, Mód 1 – senzor je udeřován kladivem	31
Obrázek 45, Mód 2 – senzor měří zpoždění signálu	31
Obrázek 46, Schéma zapojení hlavní sondy	32
Obrázek 47, Schéma zapojení ostatních sond	32
Obrázek 48, Deska plošných spojů pro hlavní sondu	33
Obrázek 49, Deska plošných spojů pro ostatní sondy	33

Pokud není uvedeno jinak, uvedený materiál je z vlastních zdrojů autora.

12 Seznam tabulek

Tabulka 1, Volba počtu sond. Zdroj: [4]	8
Tabulka 2, Přehled struktury naměřených dat	11
Tabulka 3, Shrnutí tabulky vektorů přerušení ATmega328p. Zdroj: [3]	16
Tabulka 4, určení rychlosti přenosu UART v AVR. Zdroj: [3]	18
Tabulka 5, Vliv TWSR1 a TWSR0 na frekvenci přenosu dat. Zdroj: [3]	21
Tabulka 6, Shrnutí vlastností TWI AVR pro určení vhodnosti aplikace. Zdroj: [3]	22
Tabulka 7, Pozice sond v experimentu 8.3	27

Pokud není uvedeno jinak, uvedený materiál je z vlastních zdrojů autora.

13 Seznam literatury

[1] MALHOTRA, V. M. a Nicholas J. CARINO. *Handbook on nondestructive testing of concrete*. 2nd ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, c2004. ISBN 0803120990.

[2] MAZIDI, Muhammad Ali, Sarmad NAIMI a Sepehr NAIMI. *The AVR microcontroller and embedded systems: using Assembly and C*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, c2011. ISBN 978-0-13-800331-9.

[3] Atmel Corporation. 8-bit AVR Microcontroller with 4/8/16/32K Bytes In-System Programmable Flash [online] 2009 [cit. 2019-01-22]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/ATMega328.pdf>

[4] RINN, Frank. Central Basics of Sonic Tree Tomography. *SCA Today* [online]. [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://www.ias.hk/wp-content/uploads/2016/04/Rinn-Central-Basics-of-Sonic-Tree-Tomography.pdf>

[5] RINN, Frank. Central defects in sonic tree tomography. *Western Arborist* [online]. [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: http://download.rinntech.com/RINN_CentralDefectsInSonicTreeTomography_WesternArborist_Spring_2015.pdf

[6] *Piezo-disk Preamplifier* [online]. [cit. 2019-06-15]. Dostupné z: <http://interface.khm.de/index.php/lab-log/piezo-disk-preamplifier/>

PŘÍLOHY

A Naměřená data pro experiment 8.2.

zapojení 1)	vzdálenost		
	20 cm	40 cm	70 cm
číslo měření	čas [μ s]		
1	250	350	620
2	270	340	610
3	240	340	610
4	270	330	620
5	250	350	600
6	250	310	610
7	250	330	620
8	270	340	600
9	270	330	620
10	220	340	600
průměr	254	336	611
rychlost (z průměru) [m/s]	787,4	1190,5	1145,7

zapojení 2)	vzdálenost		
	20 cm	40 cm	70 cm
číslo měření	čas [μ s]		
1	380	410	650
2	270	370	700
3	230	400	720
4	320	460	690
5	360	420	710
6	290	410	660
7	320	480	720
8	280	400	770
9	340	390	720
10	310	420	700
průměr	310	416	704
rychlost (z průměru) [m/s]	645,2	961,5	994,3

B Naměřená data pro experiment 8.3.

Měření 1) a)					
dráha	číslo měření				
	1	2	3	4	5
1→2	130	150	130	120	160
1→3	180	150	130	150	170
1→4	180	140	220	180	200
2→1	140	160	190	190	140
2→3	120	110	130	150	140
2→4	150	170	150	160	170
3→1	210	160	190	190	180
3→2	100	140	110	100	110
3→4	110	120	110	100	120
4→1	160	220	180	150	210
4→2	100	130	120	140	150
4→3	110	100	100	120	110

Měření 1) b)					
dráha	číslo měření				
	1	2	3	4	5
1→2	500	540	510	540	540
1→3	700	650	640	650	630
1→4	520	550	540	570	540
2→1	540	510	510	510	510
2→3	530	530	530	530	570
2→4	620	650	610	610	650
3→1	630	610	580	610	590
3→2	510	500	510	510	520
3→4	540	540	530	540	530
4→1	560	540	560	560	570
4→2	620	600	610	600	580
4→3	510	520	530	510	540

Měření 1) c)					
dráha	číslo měření				
	1	2	3	4	5
1→2	440	430	430	450	430
1→3	510	520	510	520	530
1→4	460	460	450	490	470
2→1	440	430	450	430	450
2→3	440	470	480	450	460
2→4	560	560	530	560	560
3→1	570	560	630	610	580
3→2	480	470	470	470	450
3→4	480	490	480	470	490
4→1	550	530	520	530	480
4→2	610	550	560	590	610
4→3	460	480	510	490	450

Měření 2) a)					
dráha	číslo měření				
	1	2	3	4	5
1→2	240	200	260	190	190
1→3	200	200	190	160	210
1→4	250	250	260	270	240
2→1	180	160	180	150	140
2→3	90	110	100	110	110
2→4	110	140	130	150	130
3→1	180	180	200	190	230
3→2	130	120	140	110	110
3→4	170	140	170	160	180
4→1	170	150	190	160	180
4→2	120	90	80	80	110
4→3	120	110	90	70	80

Měření 2) b)					
dráha	číslo měření				
	1	2	3	4	5
1→2	580	600	580	560	550
1→3	720	780	740	710	710
1→4	660	680	680	680	680
2→1	530	620	590	580	580
2→3	660	650	660	680	660
2→4	840	820	800	800	800
3→1	720	710	710	700	710
3→2	560	590	570	560	570
3→4	540	520	490	520	510
4→1	490	480	480	470	520
4→2	730	730	760	720	760
4→3	510	560	510	580	540

Měření 2) c)					
dráha	číslo měření				
	1	2	3	4	5
1→2	440	510	490	530	490
1→3	740	730	730	720	760
1→4	500	510	510	510	560
2→1	510	500	520	560	550
2→3	520	550	540	570	540
2→4	830	890	800	740	810
3→1	790	790	740	780	820
3→2	530	550	540	560	580
3→4	680	560	650	590	610
4→1	580	620	630	580	570
4→2	820	920	860	910	840
4→3	680	620	670	640	610

C Ostatní přílohy

Příložené CD obsahuje elektronickou podobu práce ve formátu PDF. Dále obsahuje skript pro vyhodnocování naměřených dat popsány v kapitole 6.1, fotografie a naměřená data použitá pro jeho spuštění v experimentu 8.3 ve formátu CSV, projekty z Atmel Studia obsahující zdrojový kód jednotlivých sond a gerber data pro výrobu desek plošných spojů.