

Návrh a realizace zabezpečení lesa proti neoprávněné těžbě pomocí mikropočítačového systému Arduino

Bc. Radim Koutný

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Radim Koutný
Osobní číslo:	A23346
Studijní program:	N0714A150006 Automatické řízení a informatika v průmyslu 4.0
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Návrh a realizace zabezpečení lesa proti neoprávněné těžbě pomocí mikropočítačového systému Arduino
Téma práce anglicky:	Design and implementation of forest security against illegal logging using the Arduino microcomputer system

Zásady pro vypracování

- Seznamte se a programováním mikropočítačového systému Arduino.
- Navrhněte vhodný způsob akustické detekce těžby dřeva pomocí systému Arduina pro obdélníkovou zabezpečenou oblast.
- Otestujte fungování algoritmu akustické detekce na otevřeném stanovišti.
- V reálných lesních podmínkách otestujte střežení obdélníkového lesního porostu.
- Realizujte přenosy stavových hlášení na mobilní telefon GSM pomocí SMS.
- Provedte technické a ekonomické zhodnocení systému.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. PINKER, Jiří. *Mikroprocesory a mikropočítače*. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-110-1.
2. VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*. Vydání druhé. Bučovice: Martin Stříž, 2017. ISBN 978-80-87106-93-8.
3. HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C*. 1. díl. 6. vyd. České Budějovice: Kopp, 2010. ISBN 978-80-7232-383-8.
4. JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02460-1.
5. FLAJZAR, Tomáš. *GSM alarm: přenos poplachu na mobilní telefon : kompletní stavební návod GSM pageru včetně zdrojového programu*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-183-7.
6. KREJČÍŘÍK, Alexandr. *SMS: střežení a ovládání objektů pomocí mobilu a SMS : GSM pagery a alarmy : princip použití, návody, příklady*. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-082-2.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Stanislav Goňa, Ph.D.**
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce: **13. prosince 2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2025**

doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 13. prosince 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací systému pro monitorování a zabezpečení lesních porostů proti neoprávněné těžbě dřeva. Cílem je vytvořit funkční prototyp zařízení založeného na mikropočítačové platformě Arduino, které dokáže detekovat charakteristické zvuky motorové pily spojené s těžbou a v reálném čase na tuto aktivitu reagovat. Systém využívá mikrofonní senzor ke snímání akustických signálů, které jsou následně analyzovány pomocí algoritmů zpracování signálu (např. FFT). V případě zjištění podezřelého zvuku systém vyšle upozornění prostřednictvím GSM modulu. Práce zahrnuje výběr vhodných hardwarových komponent, návrh algoritmů pro analýzu dat, realizaci obvodového zapojení a testování funkčnosti celého systému v podmínkách blízkých reálnému provozu.

Klíčová slova: Zpracování signálu, frekvenční analýza, ochrana lesa, nelegální těžba dřeva, analýza zvukových signálů

ABSTRACT

This thesis deals with the design and implementation of a system for monitoring and securing forest stands against unauthorized logging. The aim is to create a working prototype of a device based on the Arduino microcomputer platform, which can detect characteristic sounds chainsaws associated with logging and react to this activity in real time. The system uses a microphone sensor to pick up acoustic signals, which are then analysed using signal processing algorithms (e.g. FFT). If a suspicious sound is detected, the system sends an alert via a GSM module. The work includes selection of suitable hardware components, design of algorithms for data analysis, implementation of circuitry and testing of the functionality of the whole system in conditions close to real operation.

Keywords: Signal processing, frequency analysis, forest protection, illegal logging, sound signal analysis

Rád bych touto cestou srdečně poděkoval panu Ing. Stanislavu Goňovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a maximální ochotu po celou dobu psaní této diplomové práce. Jeho podněty a zkušenosti významně přispěly k odborné úrovni výsledného řešení a byly pro mě velkou inspirací po celou dobu práce na projektu.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST.....	12
1 TEORIE AKUSTIKY.....	13
1.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA ZVUKU.....	13
1.1.1 Rychlost šíření zvuku.....	13
1.1.2 Frekvence a vlnová délka.....	14
1.1.3 Akustický tlak.....	15
1.1.4 Akustický výkon.....	15
1.1.5 Akustická intenzita.....	17
1.2 DECIBELOVÉ VELIČINY V AKUSTICE.....	17
1.2.1 Hladina akustického tlaku.....	18
1.2.2 Hladina akustického výkonu.....	19
1.2.3 Hladina akustické intenzity.....	20
1.3 MIKROFONY.....	21
1.3.1 Kondenzátorové mikrofony.....	21
1.3.2 Elektretové mikrofony.....	21
1.3.3 Elektrodynamické mikrofony.....	22
1.3.4 MEMS mikrofony.....	22
1.4 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ – FREKVENČNÍ ANALÝZA.....	23
1.4.1 Fourierovy řady – FŘ.....	25
1.4.2 Obecná Fourierova transformace – FT.....	26
1.4.3 Diskrétní časová Fourierova transformace – DTFT.....	26
1.4.4 Diskrétní Fourierova transformace – DFT.....	27
1.4.5 Rychlá Fourierova transformace – FFT.....	28
1.5 KORELACE DVOU SIGNÁLŮ.....	29
2 POČÍTAČOVÝ SYSTÉM ARDUINO.....	31
2.1 ARDUINO MINI.....	32
2.2 ARDUINO NANO.....	32
2.3 ARDUINO MICRO.....	33
2.4 ARDUINO UNO R3.....	33
2.5 ARDUINO UNO R4.....	34
2.6 ARDUINO MEGA2560.....	34
2.7 POROVNÁNÍ VÝVOJOVÝCH DESEK ARDUINO.....	36
3 SOFTWARE.....	37
3.1 ARDUINO IDE.....	37
3.2 PROGRAMOVACÍ JAZYK WIRING.....	39
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	40

4	HARDWAROVÝ NÁVRH	41
4.1	INSTALAČNÍ KRABICE S ELEKTRONIKOU	41
4.2	BLOKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ	42
4.3	POUŽITÉ KOMPONENTY	44
4.3.1	Arduino UNO R4 Minima	45
4.3.2	Arduino UNO R3	46
4.3.3	GPRS GSM Shield SIM900	47
4.3.4	A/D převodník ADS1256	48
4.3.5	Mikrofonní modul MAX4466	48
4.3.6	LCD I2C 16x2 displej	51
4.3.7	4x4 Maticová tlačítková klávesnice	52
4.3.8	Napájecí deska	52
5	PROGRAMOVÁ ČÁST	54
5.1	TESTOVÁNÍ V SOFTWARE MATLAB	55
5.1.1	Rozbor audio signálu motorové pily	55
5.1.2	Výběr vhodného způsobu korelace	57
5.2	PROGRAM PRO ARDUINO UNO R4	65
5.2.1	Použité knihovny	65
5.2.2	Algoritmus programu	66
6	TESTOVÁNÍ	70
6.1	TESTOVÁNÍ NA OTEVŘENÉM STANOVÍŠTI A V LESE	73
7	EKONOMICKÉ A TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ	76
	ZÁVĚR	77
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	79
	SEZNAM OBRÁZKŮ	82
	SEZNAM TABULEK	84
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	85
	SEZNAM PŘÍLOH	88

ÚVOD

Lesní ekosystémy hrají zásadní roli v ochraně klimatu, udržení biodiverzity, zadržování vody v krajině a v neposlední řadě slouží jako obnovitelný zdroj dřeva. Nelegální těžba dřeva, která probíhá bez souhlasu vlastníka či mimo zákonné rámce, představuje v řadě oblastí významný problém. Dochází k ekologickým i ekonomickým škodám, často nevratným, přičemž samotné odhalení a prokázání neoprávněné činnosti bývá velmi obtížné. S ohledem na rozlohu a členitost lesních oblastí bývá lidský dohled nedostatečný, a proto se stále častěji uvažuje o využití moderních technologií pro automatizovaný monitoring a zabezpečení.

Cílem této diplomové práce je navrhnout a realizovat systém včasného varování proti nelegální těžbě dřeva, který bude využívat mikropočítačovou platformu Arduino. Systém bude navržen tak, aby detekoval akustické projevy těžební činnosti, zvuky motorové pily, a v reálném čase upozornil odpovědnou osobu prostřednictvím SMS zprávy přes GSM modul.

Součástí této práce je rovněž teoretická část, jejímž cílem je vytvořit potřebné odborné zázemí pro návrh funkčního zabezpečovacího systému. V teoretické části práce je nejprve obsažena teorie akustiky, kde jsou vysvětleny základní fyzikální veličiny, jako je rychlost šíření zvuku, akustický tlak nebo intenzita zvuku. Následuje přehled decibelových veličin a jejich využití pro hodnocení akustických jevů. Dále je pozornost věnována mikrofonom, které tvoří klíčový snímací prvek navrhovaného systému. Další kapitoly se zabývají zpracováním akustického signálu, zejména pomocí frekvenční analýzy. Podrobně je popsána Fourierova transformace, včetně její diskrétní i rychlé varianty (FFT), která je klíčová pro rozpoznání specifických frekvenčních složek motorové pily. Nakonec je v teoretické části představena platforma Arduino jako jádro celého zabezpečovacího systému. Jsou popsány různé typy vývojových desek a jejich vlastnosti s důrazem na volbu vhodného modelu pro nasazení v terénu.

Praktická část se následně věnuje volbě vhodného hardwaru pro naše potřeby, analýze zvukových signálů pily a jejich vyhodnocení. Nedílnou součástí je testování v reálném prostředí, a to nejprve na otevřeném stanovišti a následně v lese. Celá kapitola je zakončena ekonomickým a technologickým zhodnocením celého zařízení.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 TEORIE AKUSTIKY

Akustika je vědní obor, který se zabývá vznikem, šířením a působením zvuku. O zvuku obecně se dá říct, že je to jakékoliv mechanické vlnění, které se šíří prostředím (nejčastěji vzduchem) a vnímáme ho sluchem. Pro laika, i ze starších definic se o zvuku dá říct, že je to vše co, lze slyšet. Z odborné definice je zvuk definován jako vibrace částic plynného, kapalného nebo pevného média ve frekvenčním pásmu, které odpovídá schopnostem lidského ucha, to je asi 16 Hz až 20 kHz. Zvuk obecně může být jednoduchý (např. čistý tón laděný ladičkou) nebo složený, kdy se skládá z více frekvencí současně – v takovém případě mluvíme o harmonickém spektru nebo šumu. Analýza těchto složených zvuků je důležitá např. v hudbě, lékařství nebo technické diagnostice. [1, 2, 6]

1.1 Základní charakteristika zvuku

Zvuk je mechanické vlnění, které se šíří prostředím. Toto vlnění vzniká kmitáním tělesa, které způsobuje změny tlaku v okolním prostředí. Tyto změny tlaku se šíří ve formě podélných vln a dosahují našich uší, kde jsou zpracovány jako zvukový vjem. Z fyzikálního hlediska je zvuk vnímán jako mechanická podélná vlna, která potřebuje ke svému šíření médium – například vzduch, vodu nebo pevnou látku. Ve vakuu se zvuk nešíří, protože zde chybí částice, které by mohly přenášet mechanické kmitání. Zvuk lze popsat fyzikálními veličinami, kterou jsou dále v práci podrobněji popsány. [1, 2, 6]

1.1.1 Rychlost šíření zvuku

Jak již bylo zmíněno zvuk se šíří jako mechanické vlnění. Rychlost pohybu vlny ovšem závisí na vlastnostech daného prostředí, ve kterém se šíří, a to přesněji na jeho hustotě a pružnosti. Obecně platí, že zvuk se šíří nejpomaleji v plynech, rychleji v kapalinách a nejrychleji v pevných látkách. Je to proto, že částice v pevných látkách jsou blíže u sebe a dokážou lépe přenášet mechanické kmity. Pro šíření zvuku ve vzduchu uvádí rychlost přibližně 344 m/s. Rychlost šíření zvuku ve vzduchu je ovšem, také závislá na jeho teplotě, hodnota 344 m/s je uváděna pro 20 °C. Pro vyšší teploty je i rychlost šíření větší a pro menší je i rychlost šíření menší. Rychlost šíření ve vodě se uvádí okolo 1300 m/s. nejrychleji se pak zvuk šíří v pevných látkách, kdy v oceli se šíří rychlostí okolo 5000 m/s. Pak je zde ještě vakuum, kde k šíření zvuku nedochází vůbec. [1, 2, 3, 4]

1.1.2 Frekvence a vlnová délka

Jak již bylo zmíněno v úvodu, zvuk obecně může být jednoduchý nebo složený z více frekvencí současně – v takovém případě mluvíme o harmonickém spektru nebo šumu. Lidské ucho zvuk právě vnímá jako spektrum, které nabývá různých tónů, výšek či barev zvuku. Frekvence udává, kolikrát za sekundu se opakuje jeden celý kmit (perioda) zvukové vlny. Značí se písmenem f a měří se v hertzech (Hz). Převrácená hodnota frekvence udává její periodu. Lidské ucho je schopné zaznamenat zvuk v rozmezí od 20 Hz až do 20 kHz. Toto rozmezí se stárnutím zmenšuje. Kromě slyšitelného spektra rozlišujeme frekvence pod 20 Hz a frekvence nad 20 kHz. Infrazvuk označuje zvukové vlnění s frekvencí nižší než 20 Hz, což je pod prahem slyšitelnosti lidského ucha. Vzhledem ke své nízké frekvenci a dlouhé vlnové délce se infrazvuk dokáže šířit na velmi dlouhé vzdálenosti. Vyskytuje se přirozeně například při zemětřeseních, sopečné činnosti, bouřkách nebo při pohybu mořských vln. Využívá se také v seismologii pro sledování zemských otřesů nebo při monitorování přírodních jevů. Některá zvířata, například sloni, využívají infrazvuk ke komunikaci na velké vzdálenosti. Naopak ultrazvuk je zvukové vlnění s frekvencí vyšší než 20 kHz, což je nad hranicí slyšitelnosti pro člověka. Ultrazvuk má velmi krátkou vlnovou délku a je široce využíván v technice a medicíně. Nejčastěji se s ním setkáváme v oblasti lékařské diagnostiky při ultrazvukovém vyšetření (sonografii), v průmyslu při nedestruktivním testování materiálů, v ultrazvukových čističkách nebo v senzorech pro měření vzdálenosti. Některá zvířata, například netopýři nebo delfini, ultrazvuk využívají k echolokaci – orientaci v prostoru pomocí odražených zvukových vln. Ačkoliv jsou infrazvuk i ultrazvuk pro člověka neslyšitelné, jejich význam a využití v různých oblastech vědy a techniky je velmi důležitý. [1, 2, 4]

Další veličinou vhodnou k popisu zvuku je vlnová délka. Vlnová délka je fyzikální veličina, která vyjadřuje vzdálenost mezi dvěma po sobě jdoucími stejnými body na zvukové vlně, například dvěma vrcholy nebo dvěma tlakovými maximy. Značí se řeckým písmenkem λ a její základní jednotkou jsou metry [m]. U podélného vlnění, jakým je zvuk ve vzduchu, to odpovídá vzdálenosti mezi dvěma oblastmi s nejvyšším tlakem. Laicky by se dalo říct, že vlnová délka popisuje, jak daleko se vlna dostane během jednoho kmitu (jedné periody). Pro výpočet slouží jednoduchý vzorec níže, ze vzorce vyplývá, že čím nižší bude frekvence tím kratší bude vlnová délka. [1, 2]

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

1.1.3 Akustický tlak

Akustický tlak je fyzikální veličina, která vyjadřuje změnu tlaku v prostředí způsobenou šířením zvukové vlny. Přesněji, když se v důsledku šíření zvukové vlny rozkmitají molekuly prostředí, ve kterém dochází k šíření, v místě jejich polohy dojde k tlakovým změnám, tyto změny nazýváme akustickým tlakem. Akustický tlak je jedním ze základních parametrů zvuku a je přímo zodpovědný za to, jak silně zvuk vnímáme. Značí se obvykle p a jeho jednotkou je pascal [Pa]. Lidské ucho je velmi citlivé – slyšitelný rozsah akustického tlaku sahá přibližně od 20 μPa , ve srovnání třeba s barometrickým tlakem ($p_b \cong 10^5 \text{ Pa}$) je tato hodnota v podstatě zanedbatelná, ale pro lidské ucho 20 μPa představuje již práh slyšitelnosti, až po hodnoty řádově několika desítek pascalů, kdy už dochází k pocitu bolesti. Proto se v praxi často místo samotného akustického tlaku používá hladina akustického tlaku, která se vyjadřuje v decibelech [dB] a udává se vzhledem k referenční hodnotě 20 μPa . Akustický tlak je důležitým parametrem v oblasti akustiky, zvukové techniky i ochrany proti hluku. Celkový tlak je pak v daném místě počítán jako součet klidového a akustického tlaku. Průběh akustického tlaku je shodný s průběhem akustické výchylky a akustické rychlosti. Pro harmonické signály můžeme akustický tlak spočítat dle následujícího vzorce. [1, 2, 4]

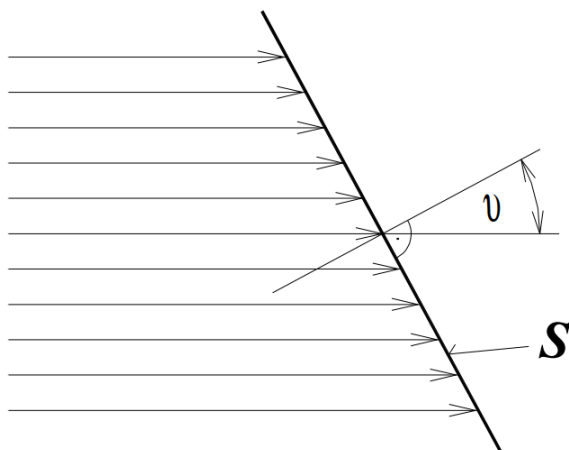
$$p = p_0 \cdot \cos \omega \left(\tau - \frac{x}{c} \right) \quad (2)$$

Kde p_0 je amplituda akustického tlaku, ω kruhová frekvence, τ čas, x vzdálenost od zdroje vlny, c je rychlost šíření zvuku. Je tedy zřejmé, že tento vzorec popisuje, nejen změnu tlaku v čase, ale i prostoru. [5]

1.1.4 Akustický výkon

Akustický výkon je fyzikální veličina, která vyjadřuje celkové množství zvukové energie, které daný zvukový zdroj vyzařuje za jednotku času do okolního prostředí. Značí se obvykle písmenem P a jeho jednotkou je watt [W]. Když akustický výkon vztáhneme na jednotku plochy získáme tak měrný akustický výkon N , jehož jednotkou je watt na metr čtvereční [W/m^2]. A vypočítáme ho pomocí následujícího vzorce. [5]

$$N = \frac{dP}{dS \cdot \cos \nu} \quad (3)$$

Obrázek 1 Šíření rovinné vlny na měřicí plochu S [5]

Na obrázku 1 můžeme vidět šipky, které představují akustické vlnění, jak dopadají na plochu S pod určitým úhlem v . Pokud ve všech bodech dané rovinné vlny homogenní akustický stav, lze předchozí vzorec zjednodušit na: [5]

$$N = \frac{P}{S \cdot \cos v} \quad (4)$$

Výkon všeobecně můžeme definovat jako součin akustické rychlosti v a působící síly F . Působící sílu F můžeme pak dále definovat jako součin akustického tlaku p a plochy S . Vztah pak tedy bude v následujícím tvaru. [4]

$$P = F \cdot v = p \cdot S \cdot v \quad (5)$$

Pokud nastane situace, kdy plocha S je kolmá vzhledem k dopadajícím akustickým vlnám, $\cos v$ se bude rovnat jedné, lze na základě předchozích vztahů vyjádřit měrný akustický výkon jako součin okamžité hodnoty akustického tlaku a okamžité hodnoty akustické rychlosti. [5]

$$N = p \cdot v \quad (6)$$

Je důležité si uvědomit, že při šíření stálého harmonického vlnění se akustický tlak p v daném místě a rychlost pohybu částic prostředí v v čase mění rovněž harmonicky. Z toho vyplývá, že také měrný akustický výkon se mění harmonicky a je tedy funkcí času. [5]

1.1.5 Akustická intenzita

Akustická intenzita neboli intenzita zvuku je fyzikální veličina, která vyjadřuje množství akustické energie, jež projde za jednotku času jednotkovou plochou kolmou ke směru šíření zvukové vlny. Jinými slovy, jde o tok zvukové energie v určitém místě prostoru. Intenzita zvuku se značí písmenem I a její jednotkou je watt na metr čtvereční [W/m^2]. Intenzita zvuku můžeme vyjádřit jako průměrnou hodnotu měrného akustického výkonu N během jednoho periodického cyklu T . [1, 2, 4]

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T N d\tau \quad (7)$$

Kde T je perioda zvukového vlnění a N je měrný akustický výkon. Pro rovinou vlnu, řešením předchozí rovnice dostaneme následující vztah. [5]

$$I = p_{ef} \cdot v_{ef} \quad (8)$$

Kde p_{ef} a v_{ef} jsou efektivní hodnoty akustického tlaku a akustické rychlosti. Pomocí měřidel lze spolehlivě změřit pouze akustický tlak, proto u rovinné vlny využíváme skutečnosti, že poměr mezi akustickým tlakem a rychlostí je konstantní a výsledný vzorec pro intenzitou rovinné vlny, pak je následující. [5]

$$I = \frac{p_{ef}}{p \cdot c} \quad (9)$$

U šíření kulové vlny není akustický tlak ve fázi s akustickou rychlostí a vzorec pro výpočet intenzity, pak obsahuje ještě člen $\cos \varphi$, kde φ je úhel mezi akustickým tlakem a rychlostí. [5]

$$I = p_{ef} \cdot v_{ef} \cdot \cos \varphi \quad (10)$$

1.2 Decibelové veličiny v akustice

V předchozí kapitole byly definovány základní akustické veličiny, jež jsou akustický tlak, akustický výkon a akustická intenzita. Hodnota těchto veličin se ovšem liší o několik řádů, pro představu, při šeptání hodnota akustického výkonu může dosahovat velmi malých hodnot a to třeba 10^{-9} W, zatímco například raketový motor může nabývat hodnot 10^6 W, je tedy patrné že rozsah je velmi velký. To stejné platí i zbylé dvě akustické veličiny. Proto, pro lepší pochopení jsou zde zavedeny decibelové veličiny, které slouží k přepočtu základní

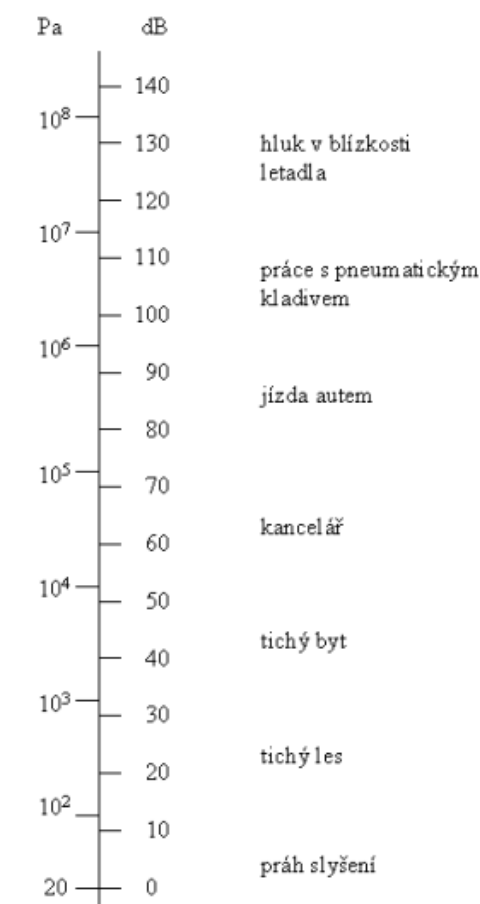
akustické veličiny na její decibelovou hladinu, a to na základě její referenční hodnoty. Rozsah hodnot na decibelové stupnici je pak znatelně menší a lepší pro pochopení. Decibelové veličiny, se kromě akustiky používají také například v elektrotechnice či mechanice. [1, 2]

1.2.1 Hladina akustického tlaku

Hladina akustického tlaku se značí L_p a její jednotkou jsou decibely [dB]. Je definována následujícím vzorcem.

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \quad (11)$$

Kde p_0 je referenční hodnota tlaku ($p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$), p je efektivní hodnota sledovaného akustického tlaku. Referenční hodnota akustického tlaku je minimální hodnota, kterou je zdravé lidské ucho schopné zaznamenat. Z rovnice vyplývá, že zvýšení akustického tlaku o jeden řád odpovídá zvýšení hladiny o 20 dB. [1, 2]



Obrázek 2 Akustický tlak a přepočítání na jeho hladinu [5]

Na obrázku 2 je stupnice převodu akustického tlaku v Pascalech a jeho odpovídající hodnota v decibelech pro vybrané typy zvuků. Z obrázku je krásně patrné, jak se po přepočtu na hladinu akustického tlaku, zmenší rozsah stupnice a tím se stává přehlednější a srozumitelnější. Například když se podíváme na kancelář tak, tam se pohybujeme okolo 60 dB, zatímco v blízkosti letadla hladina může dosahovat až 130 dB, rozdíl mezi nimi tedy je 70 dB, zatímco v hodnotách akustického tlaku by rozdíl byl milion násobný. Dále z obrázku můžeme jasně vidět, že změna akustického tlaku o jeden řád, odpovídá změně hladiny akustického tlaku přesně o 20 dB.

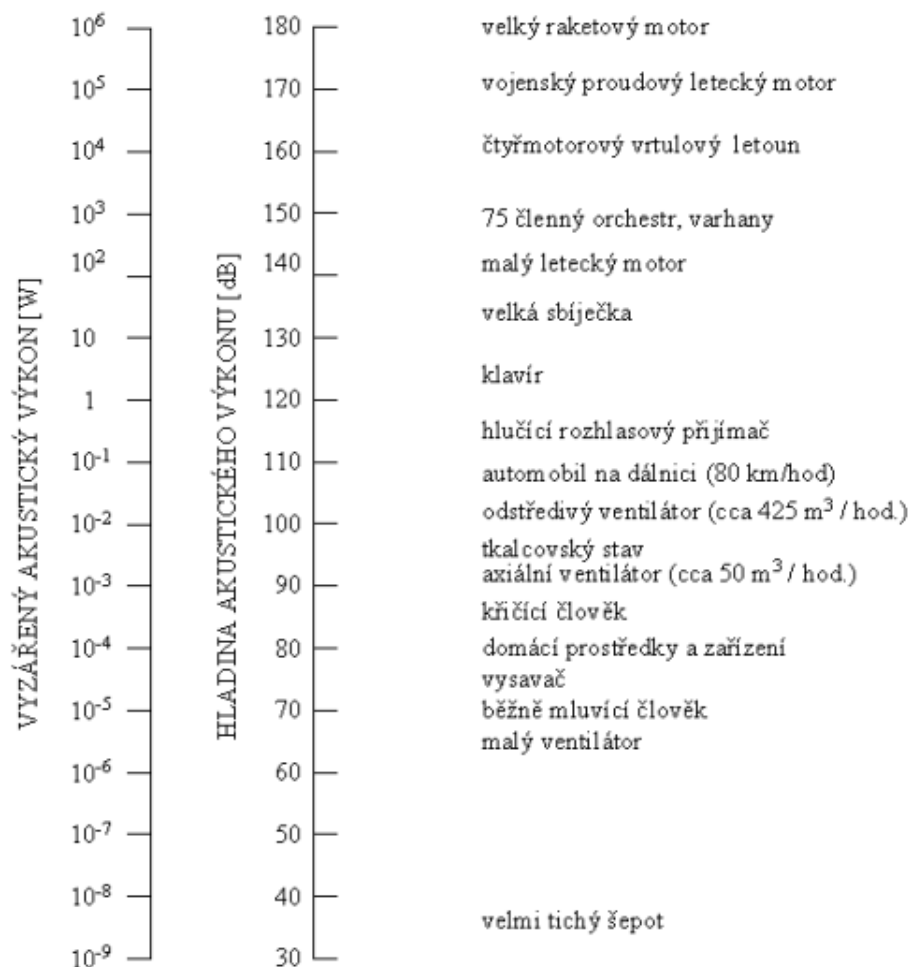
1.2.2 Hladina akustického výkonu

Hladina akustického výkonu se značí L_w a její jednotkou jsou také decibely [dB]. Je definována následujícím vzorcem.

$$L_w = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0} \quad (12)$$

Kde W je sledovaný akustický výkon a W_0 je referenční hodnota akustického výkonu. Referenční hodnota se udává $W_0 = 10^{-12} W$. Z uvedeného vztahu je zřejmé, že každému zvýšení akustického výkonu o jeden řád, odpovídá zvýšení akustické hladiny výkonu o 10 dB. [1, 2]

Na obrázku 3, níže je stejná situace jako u obrázku 2, akorát se jedná o akustický výkon a hladinu akustického výkonu. I zde je krásně patrné, jak se rozsah hodnot po převodu z akustického výkonu na hladinu akustického tlaku zmenší a tím se stane přehlednější a jednodušší na orientaci. Také zde vidět v praxi vzorec pro výpočet hladiny akustického výkonu, kdy změna akustického výkonu o jeden řád odpovídá změně hladiny akustického výkonu o 10 dB.



Obrázek 3 Přepočet akustického výkonu a jeho hladiny [6]

1.2.3 Hladina akustické intenzity

Hladina akustického výkonu se značí L_I a její jednotkou jsou taktéž decibely [dB]. Je definována následujícím vzorcem.

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad (13)$$

Kde I je intenzita vyšetřovaného signálu a I_0 je referenční hodnota intenzity zvuku. Referenční hodnota intenzity zvuku je dána $L_I = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Stejně jako u hladiny akustického výkonu, i zde ze vzorce vyplývá, že zvýšení intenzity o jeden řád, zvýší akustickou hladinu intenzity přesně o 10 dB. [1, 2]

1.3 Mikrofony

Důležitou součástí práce je záznam zvuku, který následně bude dále zpracován. K tomu nám slouží mikrofony. Mikrofon je zařízení, které slouží k převodu akustických signálů (zvukových vln) na elektrické signály. Funguje jako senzor, který zaznamenává změny tlaku vzduchu způsobené zvukem a převádí je do podoby napětí, jež může být dále zpracováno elektronickým obvodem nebo mikropočítačem. Existuje hned několik typů mikrofonů, avšak všechny obsahují membránu, což je tenká vrstva, která se pod dopadající zvukovou vlnou deformuje. Mikrofony se pak dělí na různé typy právě podle toho, jakým způsobem mění dopadající akustické vlnění na elektrickou energii. Níže si popíšeme základní typy mikrofonů. [2, 10]

1.3.1 Kondenzátorové mikrofony

Kondenzátorové mikrofony někdy označované také jako kapacitní patří mezi nejcitlivější a nejpřesnější typy mikrofonů. Jsou široce využívány v profesionálním zvukovém záznamu, studiové technice, vědeckých aplikacích, ale také v mikropočítačových projektech, kde je třeba zachytit jemné změny akustického signálu. Princip funkce mikrofonů je založen na změně kapacity kondenzátoru vlivem vibrace membrány. Mikrofon má dvě hlavní části, a to pohyblivou elektrodu (membránu) a pevnou elektrodu. Pohybem membrány se mění vzdálenost mezi elektrodami a tím pádem dochází i ke změně kapacity kondenzátoru, což vede ke změně napětí na jeho výstupu. Kapacitní změny jsou ovšem malé, a proto kondenzátorové mikrofony vyžadují zesilovač. Z důvodu potřeby zesilovače však tyto mikrofony vyžadují napájení, nejedná se tedy o pasivní součástky. [2, 10]

1.3.2 Elektretové mikrofony

Elektretové mikrofony jsou zvláštním typem kondenzátorových mikrofonů. Využívají stejný princip, převod změn akustického tlaku na změny kapacity mezi dvěma elektrodami, ale díky použití trvale polarizovaného materiálu (tzv. elektretu) nepotřebují externí polarizační napětí. To je jejich hlavní výhoda oproti klasickým kondenzátorovým mikrofonům. Elektret je nevodivá hmota, která je však trvale elektricky nabitá a dříve z ní vyrobena přímo membrána. Toto zapojení však mělo velkou nevýhodu, a to že membrána byla příliš těžká a špatně reagovala na vysoké frekvence. Proto se dnes elektretové mikrofony vyrábí tak, že na pevnou elektrodu je nanesen elektretový film, tím se dosáhne kvalit srovnatelných z kondenzátorovými mikrofony, avšak s tou výhodou, že nepotřebují vlastní napájení. [10]

1.3.3 Elektrodynamické mikrofony

Elektrodynamické mikrofony patří mezi nejstarší a zároveň nejrobustnější typy mikrofonů. Jsou hojně využívány v ozvučovací technice, při živých vystoupeních, ale také v různých průmyslových aplikacích, kde je potřeba spolehlivost a odolnost. Princip těchto mikrofonů je založen na elektromagnetické indukci. V magnetickém poli permanentního magnetu se pohybuje cívka, která je spojena s membránou, při dopadu akustické vlny se membrána rozkmitá a snímá se do pohybu i cívka. Pohyb cívky v magnetickém poli vyvolá indukované napětí, to následně můžeme zpracovávat nebo dle potřeby třeba zesilovat. Tyto mikrofony nepotřebují žádné napájení, jsou tedy pasivní. Jsou vhodné hlavně pro hlasité zvuky (vysoké akustické tlaky), ale kvůli spojení cívky a membrány jsou těžší a hůře reagují na rychlé změny zvuku. [10]

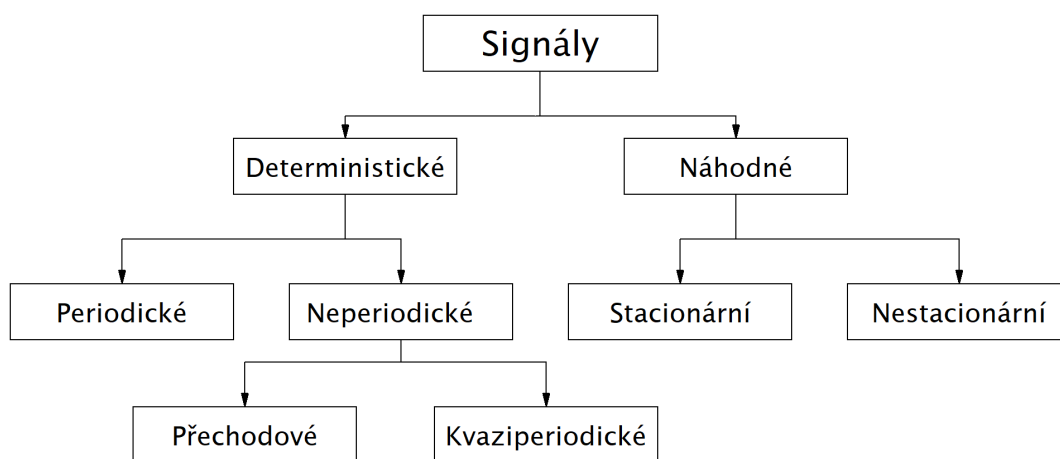
1.3.4 MEMS mikrofony

MEMS mikrofony (z anglického Micro-Electro-Mechanical Systems) představují miniaturní křemíkové mikrofony, které se vyrábí jako integrované součástky, které obsahují jak snímáči na tlak citlivou membránu, tak i předzesilovač. Mohou také obsahovat další přídavné obvody jako jsou různé filtry. Často také již dnes obsahují integrovaný A/D převodník. Výstup mikrofonu jsou tedy digitální informace. MEMS mikrofony obsahují dvě hlavní části, první z nich je mikro mechanický snímač, který je obvykle jako u kondenzátorových mikrofonů tvořen tenkou membránou a pevnou elektrodou, dohromady tvoří kondenzátor. Při dopadu akustické vlny na membránu se změní jeho kapacita. Druhou částí je integrovaný obvod, který může provádět, zesílení signálu, či filtrování nebo digitalizaci. MEMS mikrofony se vyrábí ve dvou variantách, analogové a digitální. Digitální, jak bylo již zmíněno, obsahují A/D převodník a signál z nich je tak v digitální formě, což zjednodušuje integraci. Analogové MEMS mikrofony na výstupu mají klasický analogový signál. [28]

1.4 Zpracování signálů – frekvenční analýza

Jednou z hlavní části práce je zpracování akustických signálů zaznamenaných v reálném čase. Zvuky vznikající při používání motorových pil mají charakteristické frekvenční a amplitudové vlastnosti, které je možné detekovat a analyzovat pomocí vhodných metod digitálního zpracování signálu (DSP). Obecně můžeme zpracování signálů popsat třemi základními kroky.

Prvním krokem je akvizice signálu a jeho převod na elektrické veličiny, čehož dosáhneme pomocí snímacího prvku, v mém případě mikrofону. Tento krok je nezbytný, protože nástroje pro zpracování signálu dokážou zpracovávat pouze elektrické veličiny. V našem případě zvuk motorové pily je akustický signál, který například můžeme vyjádřit jako závislost akustického tlaku v čase, a ta je zachycena pomocí mikrofónu jako analogový signál a ten je následně převeden na elektrické napětí. Signály obecně můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin podle závislosti na čase. První skupinu tvoří signál, u nichž jsme schopni předpovědět jejich budoucí vývoj, a které se často pravidelně (periodicky) opakují. Do druhé skupiny patří signály náhodné, u nichž není jejich predikce vývoje možná. Deterministické signály můžeme ještě rozdělit na periodické a neperiodické, to většinou však nestačí, a tak se dělí ještě dále jak je zobrazeno na obrázku č.4. Náhodné signály můžeme dělit na stacionární a nestacionární. Běžné akustické signály, včetně zvuku vydávaného motorovou pilou, obsahují kombinaci jak deterministických, tak i náhodných singlů. [1, 6]



Obrázek 4 Dělení signálů [vlastní]

Druhý krok je digitalizace signálu, neboť analogový signál, který mikrofón zachytí může nabývat nekonečného množství různých stavů a hodnot. Takový signál je zcela nevhodný pro další zpracování například mikropočítačem, neboť jsem omezení na výkonu a kapacitě jeho paměti. Proto se zde využívá analogově/digitální převodník, který nám vytvoří posloupnost čísel odpovídajících úrovním původního signálu. Tato číselná reprezentace je pro výpočetní systémy mnohem lépe zpracovatelná. Je však třeba počítat s určitými omezeními, protože během digitalizace dochází ke ztrátě části informací a ke zkreslení, které je důsledkem převodu z plynulé na diskrétní formu. [1, 6]

Finálním, třetím, krokem je samotné zpracování signálu. Digitalizovaná data, představující posloupnost číselných hodnot, lze dále zpracovávat pomocí různých aritmetických a logických operací. Jedním ze základních přístupů při analýze signálu je jeho rozklad na jednotlivé frekvenční složky. Tento postup umožňuje například identifikovat specifické frekvence, které jsou pro daný jev typické, jako je tomu v případě rezonancí nebo provozu strojů, v našem případě provoz motorové pily. Tomuto zpracování signálů se říká frekvenční analýza a jejím základním nástrojem je Fourierova transformace. Ta slouží k převodu signálu z časové oblasti, kde se sleduje vývoj amplitudy v čase, do oblasti frekvenční, kde se zkoumá rozložení energie mezi jednotlivé frekvence. Existuje několik variant Fourierovy transformace, které se liší podle charakteru zpracovávaného signálu i výpočetních požadavků. [1, 6]

Mezi základní varianty Fourierovy transformace patří:

1. Fourierovy řady (FR)
2. Obecná Fourierova transformace (FR)
3. Diskrétní časová Fourierova transformace (DTFT)
4. Diskrétní Fourierova transformace (DFT)
5. Rychlá Fourierova transformace (FFT)

Výše uvedené možnosti typů transformace se liší na základě zkoumaného signálu. Signál může být spojitý, diskrétní, periodický nebo neperiodický. Jednotlivé transformace jsou popsány níže. [25]

1.4.1 Fourierovy řady – FR

Fourierovy řady jsou základní nástroj pro rozklad spojitých periodických signálů na součet harmonických funkcí (sinusovek a kosinusovek). Základní myšlenkou je že každý spojitý periodický signál lze rozložit do řady harmonických funkcí. [6]

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (14)$$

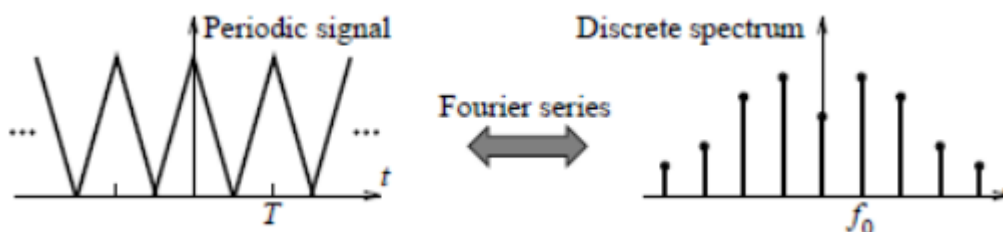
Ze vztahu tedy vylívá, že je potřeba určit koeficienty a_0 , a_n , b_n . Člen a_0 představuje DC složku a zbylé dva členy vypočítáme pomocí vzorců, které se obecně nazývají Eulerovy-Fourierovy vzorce. [6]

Pro praktické využití se však Fourierův rozvoj převádí do ekvivalentního komplexního tvaru za pomoci známých Eulerových vzorců. Získáme tak finální tvar pro výpočet komplexních koeficientů c_n Fourierovy řady. [6]

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (15)$$

Frekvenční spektrum signálu je pak vyjádřeno diskrétními harmonickými složkami, a udává nám jaké frekvence jsou obsaženy v signálu a jejich amplitudu. Pro sestrojení grafu frekvenčního spektra je potřeba nejprve vyjádřit absolutní hodnotu čísla, také nazývanou jako magnitudu. [6]

Fourierovy řady nachází uplatnění při analýze a zpracování zvukových signálů, díky rozložení zvuku na jednotlivé frekvence je možné analyzovat různé složky zvuku, jako jsou tóny, harmonie a šum. Také se využívají při kompresi zvukových souborů. Dále se využívají také při analýze signálu ve střídavých obvodech. Popřípadě v generátorech periodických signálu typu obdélník, pila nebo trojúhelník. [6, 11]



Obrázek 5 Převod signálu do frekvenčního spektra pomocí FR [11]

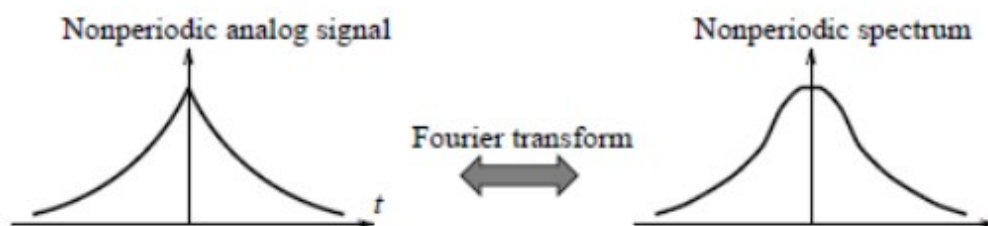
1.4.2 Obecná Fourierova transformace – FT

Jedná se o základná popis Fourierových řad. Obecná Fourierova transformace nám umožňuje převod spojitého, neperiodického signálu na spojitě, neperiodické spektrum. Transformace je popsána Fourierovým integrálem. [6]

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (16)$$

Fourierova transformace převádí signál $f(t)$ z časové oblasti do oblasti frekvenční, což nám umožňuje zkoumat frekvence v obsažené v signále. Výsledkem tohoto procesu je signál $F(\omega)$, kdy reálná část představuje amplitudu kosinové složky na frekvenci f a imaginární část amplitudu sinusové složky na frekvenci f . [6]

Výsledkem Fourierovy transformace je tedy frekvenční spektrum signálu, které nám udává, jaké frekvence jsou obsaženy v signálu a s jakou amplitudou a fází. Amplitudové spektrum se udává jako absolutní hodnota hodnota $|F(f)|$. Fázové spektrum je obsaženo v argumentu ($X(f)$). [25]



Obrázek 6 Převod signálu do frekvenčního spektra pomocí FT [11]

1.4.3 Diskrétní časová Fourierova transformace – DTFT

Diskrétní časová Fourierova transformace se používá pro diskrétní neperiodické signály, tedy pro signály definované jen v určitých časových okamžicích, ale nekonečně dlouhé v čase. Výsledkem je frekvenční spektrum, které je však v časové oblasti spojitě. [6]

$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot e^{-j\omega n} \quad (17)$$

Jedná se o sumu posloupnosti vzorků násobenou komplexní exponenciálou. Kde $x[n]$ je diskrétní časový signál, n nám udává pořadí vzorku diskrétního signálu, ω je úhlová frekvence, většinou se udává $[-\pi, \pi]$, protože DTFT je periodická s periodou 2π . [6, 11]

Za ω můžeme dále dosadit

$$\omega = 2\pi \frac{f}{f_s} \quad (18)$$

Kde f_s je vzorkovací frekvence signálu, díky tomuto poměru frekvencí frekvenční spektrum je periodické kolem f_s a zrcadlí se kolem $f_s / 2$.



Obrázek 7 Převod signálu do frekvenčního spektra pomocí DTFT [11]

1.4.4 Diskrétní Fourierova transformace – DFT

Diskrétní Fourierova transformace je nejvhodnější pro analýzu a zpracování akustických signálů. Vstupem je signál o pevně daném počtu vzorků, získaných v přesně stanovených intervalech za pomoci vzorkovací frekvence f_s . Díky tomu že signál má přesně definovaný začátek a konec, se pro výpočet tváří jako periodický. Výstupem DFT je tedy potom periodické disktrétní frekvenční spektrum. [25]

Disktrétní Fourierova transformace se dá vypočítat pomocí následujícího vzorce:

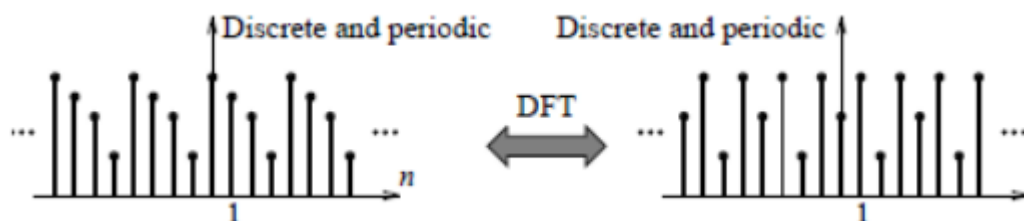
$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (19)$$

Kde $X[k]$ je výstupní komplexní frekvenční složka, k udává jeho pozici ve spektru, $x[n]$ je signál, který chceme zpracovávat, $e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$ je komplexní exponenciála, která reprezentuje sinusoidní složky signálu. Ze vztahu tedy vyplývá že pro výpočet funkčních hodnot $X[k]$, potřebujeme krom vstupního signálu akorát znát počet vzorků N . Dále se ve vzorci akorát mění hodnota k podle toho kolikátá složka v signálu se určuje. Počet zobrazených frekvenčních složek ve frekvenčním spektru se rovná počtu vzorků N . V praxi se však frekvenční spektrum zobrazuje jenom po $(N/2) - 1$ a to z důvodu symetrie kolem $N/2$. Tyto vlastnosti však nejsou patrné z předchozího vztahu, abychom si je vyjasnili je potřeba vyjádřit komplexní exponenciálu dle Eulerova vzorce ve tvaru [25]

$$e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} = \cos\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) - j \sin\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) \quad (20)$$

$$k > 0, n \in \langle 0, N - 1 \rangle \quad (21)$$

Díky Eulerovu vzorci můžeme komplexní exponenciál rozdělit na reálnou a imaginární část. Převodem komplexní exponenciály na goniometrický tvar můžeme vizualizovat, jak jednotlivé složky Fourierovy transformace představují vektory na jednotkové kružnici. Tento způsob zobrazení nám také pomáhá pochopit periodicitu spektra a symetrii v DFT. Počet těchto vektorů je omezen velikostí N_0 , což odpovídá počtu vzorků signálu a periodicitě frekvenčního spektra. [25]



Obrázek 8 Signál a jeho frekvenční spektrum získané pomocí DFT [11]

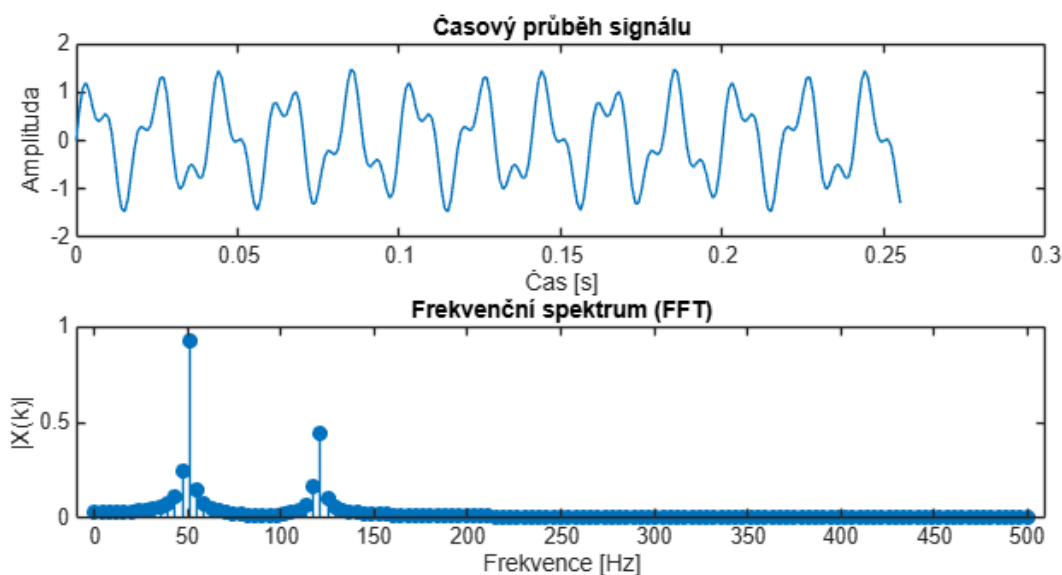
1.4.5 Rychlá Fourierova transformace – FFT

Jedná se o modifikace klasické disktrétní Fourierovy transformace DFT, kdy DFT je výpočetně i časově náročná, proto vznikla její modifikace FFT (Fast Fourier Transform), algoritmus FFT výrazně zvyšuje rychlost výpočtu DFT, tím že využívá symetrii a periodičnost komplexních exponentů, díky čemuž časová náročnost při práci s většími množstvími dat nebo při real-time zpracování výrazně klesá. Existuje hned několik algoritmů, které zrychlují DFT. Mezi hlavní patří Cooley–Tukey algoritmus, který využívá toho, že DFT lze rozdělit na dvě menší DFT – jednu pro sudé indexy a druhou pro liché indexy. [25]

$$X[k] = E[k] + e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \cdot O[k] \quad (22)$$

Kde $E[k]$ je DFT sudých členů (indexy 0, 2, 4,...) a $O[k]$ je DFT lichých členů (indexy 1, 3, 5,...). Tento princip se rekurzivně opakuje, a tím klesne výpočetní složitost z $O(N^2)$ na $O(N \log N)$.

Dalším algoritmem pro zrychlení DFT je takzvaná Motýlková operace, která který se opakuje v každé fázi algoritmu FFT. Slouží ke kombinaci dvou komplexních hodnot a jejich úpravě pomocí twiddle faktoru, který „otáčí“ jednotlivé vzorky signálu ve frekvenční rovině, právě díky němu FFT rozpozná různé frekvence ve vstupním signálu. [25]



Obrázek 9 Příklad FFT analýzy signálu [vlastní]

Na obrázku č.9 je příklad využití FFT analýzy vygenerovaného signálu. Signál se skládá ze dvou sinusovek o rozdílných frekvencích a amplitudách. První sinusovka má frekvenci 50 Hz a amplitudu 1, druhá má frekvenci 120 Hz a amplitudu 0.5. Tyto hodnoty jsou patrné i na frekvenčním spektru získaném pomocí FF. Jedná se tedy o dominantní frekvence signálu. [25]

1.5 Korelace dvou signálů

Dalším významnou částí je korelace signálu. Kdy korelace dvou signálů nám udává jejich podobnost při různých časových posuvech. Výpočet se provádí skalárním součinem čili násobí se příslušné vzorky signálu a násobky se sečtou. Zjednodušené řečeno se dá říct, že větší skalární součin, znamená větší korelaci a z toho vyplývá že signály jsou říct, že zkoumané signály jsou si tvarově podobné. [26]

$$r_{xy}[n] = \sum_n x[n] \cdot y[n + m] \quad (23)$$

Kde n je časový posun, $x[n]$ je první signál a $y[n+m]$ je druhá signál posunutý o n . Tato operace se provádí pro více hodnot n a výsledek je maximální právě v moment kdy porovnáváné signály si jsou nejvíce podobné. [26]

Existují dva druhy korelace, prvním je autokorelace, kdy signál je porovnávám sám sebou pro různé posuny a výsledek udává měru shody pro různá posunutí. Druhým pro nás zajímavějším typem je křížová korelace (cross-correlation), kdy mezi sebou porovnáváme dva různé signály a hledáme v nich podobnost. V našem případě jedním ze signálů může být

známý zvuk motorové pily a druhý signál bude signál aktuálně zaznamenaný mikrofonom.

[26]

2 POČÍTAČOVÝ SYSTÉM ARDUINO

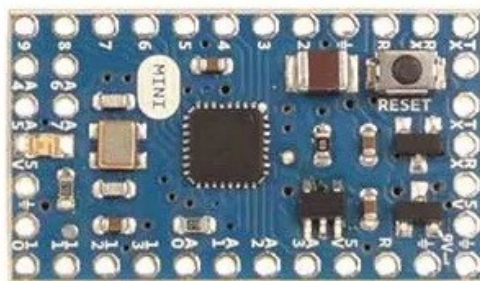
Počítačové systémy Arduino slouží k programování jednoduchých i složitějších aplikací. Vývoj Arduina započal v roce 2005 ve městě Ivrea, v Itálii. Vývoj započal za účelem vytvoření jednoduchého a levného vývojové setu pro studenty. Systém Arduino se mezi studenty uchytil, a tak se vývojáři rozhodli poskytnout ho celému světu. Počítačový systém Arduino se tak stal poměrně rychle populární, a to jak díky nízké pořizovací ceně, tak také hlavně díky sdílení schémat a návodu. Jedná se tedy o open-source projekt. [12, 13]

Jednou z hlavních výhod vývojových desek Arduino je volně dostupné vývojové prostředí Arduino IDE, které slouží k jednoduchému programování. Mezi další výhody patří to, že se jedná o open-source, což znamená, že její hardware i software jsou veřejně dostupné a mohou být volně upravovány a používány. Open-source má ovšem i své nevýhody, a to že vznikají často méně kvalitní a méně spolehlivé klony desek Arduino, které se často dají sice pořídit z Číny za méně peněz než originál, ale není zde zaručena kvalita použitých komponent. Velkou výhodou je také rozsáhlá komunita, díky které vznikají zajímavé projekty nebo různé knihovny, které jsou následně volně dostupné a usnadňují tak vytváření vlastních projektů. [12, 13]

Většina desek Arduino využívá procesory od firmy Atmel. Kromě samotného procesoru každá deska obsahuje další elektronické komponenty. Během vývoje bylo vyvinuto spoustu typů desek s odlišnými parametry. Mezi nejznámější se řadí UNO, MEGA, Mini, Nano. Všechny desky nesou stejnou modrou barvu, liší se však v jejich hardwarové vybavenosti a s tím je spjatý rozdíl v rozměrech desek. Všechny desky tak krom mikropočítače od firmy Atmel mají společné analogové a digitální vstupy, napájecí konektor, což bývá některý z USB portů, USB port krom napájení slouží i k programování a dále mají desky společné také tlačítko pro reset. [12, 13]

2.1 Arduino Mini

Jedná se o nejmenší oficiální verzi Arduina. Deska byla navržena tak, aby byla co nejmenší, ale stále obsahovala vše potřebné, kvůli úspoře místa však postrádá USB konektor. K programování je tedy potřeba externí USB-serial převodník. Deska využívá stejně jako UNO procesor ATmega328 s frekvencí 16 MHz (na starších verzích se používal procesor ATmega168). Díky svým malým rozměrům deska našla své uplatnění především ve vestavených (embedded) systémech nebo také v chytrých vypínačích či dálkových ovladačích. [12, 13]



Obrázek 10 Arduino Mini [14]

2.2 Arduino Nano

Deska Arduino Nano se od menší desky Mini v moc ohledech neliší, využívá stejný procesor ATmega328, má i stejný počet analogových a digitálních pinů, největším rozdílem tedy je přítomnost USB konektoru (Mini USB nebo Micro USB), díky kterému odpadá potřeba externího USB-serial převodníku pro programování, zároveň ale tak deska je o něco větší. USB port slouží zároveň i pro napájení 5 V, ovšem je zde i možnost napájení přes definovaný pin (pin VIN), ten umožňuje napájení v rozsahu 7–12 V. [12, 13]



Obrázek 11 Arduino Nano [14]

2.3 Arduino Micro

Arduino Micro na rozdíl od předešlých desek obsahuje procesor ATmega328u4, tento mikropočítač obsahuje převodník, díky němuž se deska může pro počítač tvářit jako myš či klávesnice a posílat do počítače příkazy jako jsou stisk klávesy či posunutí myši. To z této desky tvoří ideální volbu pro vytvoření vlastní klávesnice nebo například herního ovladače. Deska obsahuje 20 vstupně-výstupních digitálních pinů, 12 analogových pinů a micro USB konektor pro programování/napájení. Deska je vhodná pro zabudování do menších zařízení. [12, 13]

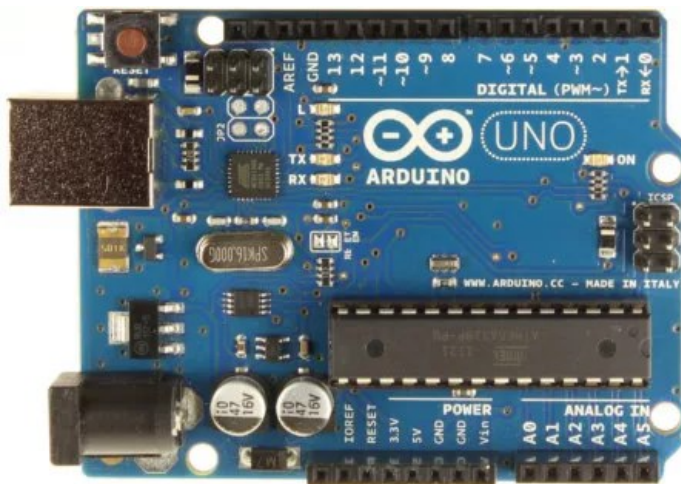


Obrázek 12 Arduino Micro [14]

2.4 Arduino UNO R3

Arduino UNO je nejpoužívanější a zároveň nejznámější vývojová deska celé platformy Arduino. Je ideální volbou pro začátečníky díky své jednoduchosti, dostupnosti a rozsáhlé dokumentaci. Zároveň je však dostatečně univerzální i pro pokročilejší projekty. Název "UNO" (italsky "jedna") označuje první model nové řady Arduina, která byla představena v rámci Arduino verze 1.0. Srdcem desky je procesor ATmega328 s frekvencí 16 MHz. Dále deska obsahuje USB port, který slouží jako napájecí, ale také k programování, 14 vstupně-výstupních digitálních pinů, 6 analogových pinů a tlačítko pro reset. Tato deska také posloužila k vývoji dalších dvou desek, které se od klasické UNO desky, liší však jen v konektoru. Verze Ethernet obsahuje místo USB portu, Ethernet port. Druhou verzí je Bluetooth, kdy deska místo USB portu obsahuje Bluetooth modul pro bezdrátovou

komunikaci. Odlehčenou verzí UNO je deska Arduino PRO, která je v podstatě stejná jako UNO, avšak postrádá USB port a je tak vhodná spíše pro pevné zabudování do nějakého projektu. [12, 13]



Obrázek 13 Arduino UNO R3 [14]

2.5 Arduino UNO R4

Arduino UNO R4 je nejnovější generací populární vývojové desky řady UNO, která přináší významná vylepšení oproti desce UNO R3. Tento model byl představen v roce 2023. Hlavním rozdílem, je že deska UNO R4, již nevyužívá procesor od firmy Atmel, ale používá výkonnější 32bitový mikrokontrolér Renesas RA4M1 založený na architektuře ARM Cortex-M4. Deska UNO R4 je dostupná ve dvou verzích: UNO R4 Minima a UNO R4 WiFi. Deska UNO R4 Minima je zaměřena na jednoduchost, rozvržení je stejné jako u desky UNO R3. Deska UNO R4 Wifi, jak již z názvu vyplívá, umožňuje navíc konektivitu přes Wifi a také přes Bluetooth, což z ní dělá ideální desku pro využití v IoT (internet of things) nebo pro projekty, kde se uplatňuje bezdrátové připojení. Deska UNO R4 je vhodná díky výkonnějšímu čipu pro výpočetně náročnější operace. [17]

2.6 Arduino Mega2560

Arduino Mega2560 je již větší, výkonnější deska. Deska vznikla prodloužením desky UNO a tím tak vznikl prostor navíc pro více pinů a výkonnější čipy. Jejím předchůdcem byla deska Mega1280. Deska je založena na mikropočítači ATmega2560, dále obsahuje 54 vstupně-

výstupních digitálních pinů a 16 analogových. Stejně jako u desky UNO obsahuje USB port typu B pro napájení a programování. Díky svému výkonu je vhodná pro složitější projekty například řízení robotů, CNC strojů. [12, 13]



Obrázek 14 Arduino Mega2560 [14]

2.7 Porovnání vývojových desek Arduino

V níže uvedené tabulce je přehledné srovnání dříve popsanych vývojových desek Arduino. Kromě zmíněných desek existuje řada dalších, avšak většina z nich je pro specifické projekty například deska Arduino Robot je slouží k vytvoření vlastního chytrého robota nebo mezi nimi jsou desky které vznikali ve spolupráci s jinými společnostmi sem patří například Arduino Intel Galileo, což je deska, která vznikla ve spolupráci se společností Intel a je to deska která využívá čip Intel Quark SoC X1000. Mezi další zajímavé desky patří Arudiono Esplora, což je deska, která obsahuje joystick, tlačítka a posuvný potenciometr, to zní dělá ideálního kandidáta pro tvorbu vlastního herního ovladače. Pro naše účely jsou tyto desky nevhodné, a tak jim nebylo věnováno více času. [12, 13, 14]

Tabulka 1 Srovnání vybraných desek Arduino [vlastní]

	Mini	Micro	Nano	Uno R3	Uno R4	Mega2560
Mikrokontroler	ATmega328P	ATmega32U4	ATmega328P	ATmega328P	Renesas RA4M1	ATmega2560
Taktovací frekvence	16 MHz	16 MHz	16 Mhz	16 Mhz	48 Mhz	16 MHz
USB konektor	Ne	Micro USB	Mini USB/Micro USB	USB typu B	USB typu C	USB typu B
Napájení USB 5 V	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Napájení JACK [DC]	7–9 V	7–12 V	7–12 V	7–12 V	7–12 V	7–12 V
Digitální vstupy/výstupy (I/O)	14 (z toho 6 s PWM)	20 (z toho 7 s PWM)	14 (z toho 6 s PWM)	14 (z toho 6 s PWM)	14 (z toho 6 s PWM)	54 (z toho 15 s PWM)
Analogové vstupy	8	12	8	6	6	16
Flash paměť	32 kB	32 kB	32 kB	32 kB	256 kB	256 kB
SRAM	2 kB	2,5 kB	2 kB	2 kB	32 kB	8 kB
EEPROM	1 kB	1 kB	1 kB	1 kB	8 kB	4 kB
Rozhraní	UART, I2C, SPI	UART, I2C, SPI	UART, I2C, SPI	UART, I2C, SPI	UART, I2C, SPI	UART, I2C, SPI

3 SOFTWARE

V této kapitole jsem se věnoval popisu softwaru použitého pro programování samotného Arduina a popisu jazyka, který se pro jeho programování používá.

3.1 Arduino IDE

Arduino IDE (Integrated Development Environment) je oficiální vývojové prostředí používané pro programování vývojových desek Arduino. Je napsáno v jazyce Java a vyvinule se z výukového prostředí Procccesing, které bylo upraveno pro potřeby Arduina, byly přidány některé funkce, ale hlavně byla zajištěna podpora jazyka Wiring. [15, 16]

Jedná se o jednoduchý a uživatelsky přívětivý nástroj, který umožňuje vývoj elektronických projektů i začátečníkům bez hlubších znalostí programování nebo elektroniky. Dostupný je zdarma ke stažení na oficiálních stránkách Arduina, kde je na výběr z několika verzí, původní verze Arduino IDE 1.x a nová verze Arduino IDE 2.x. Obě verze jsou stále podporovány a dostávají nové aktualizace. Novější verze IDE 2.x by ovšem měla být však lépe optimalizovaná a obsahuje několik nových funkcí. Uživatelské rozhraní se moc neliší, a tak orientace v něm zůstává v obou verzích stejná. Samotná instalace zabere řádově jednotky minut. [15, 16]

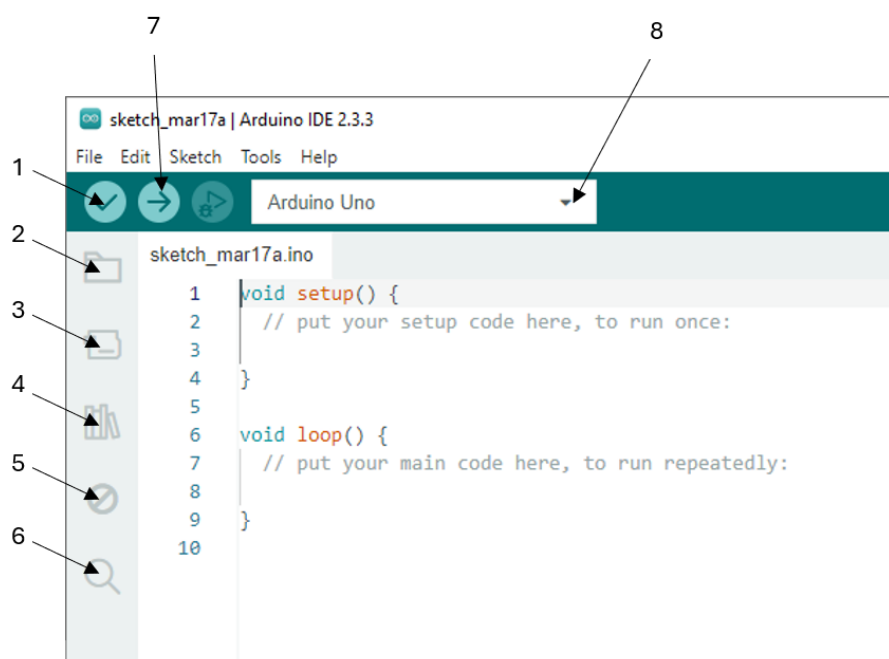
Při instalaci na operačním systému Windows je třeba potvrdit instalaci USB driveru, které umožňují komunikace mezi Arduinem a PC. Dále při prvním spuštění je potřeba povolit komunikace přes Windows firewall. [15, 16]

Po spuštění programu se otevře tzv. sketch, s předdefinovanou základní strukturou, do které následně píšeme vlastní program.



Obrázek 15 Vývojové prostředí Arduino IDE [vlastní]

Na horní liště se nachází klasické menu (*File, Edit, Sketch, Tools, Help*). Nebudu zde popisovat všechny funkce, pouze ty nejdůležitější. V nabídce *File* můžeme vytvářet, otvírat, ukládat naše programy. Nabídka *Edit* slouží k editaci kódu. Z nabídky *Sketch* pro nás je nejdůležitější funkce *Include Libraries*, která nám umožňuje přidání různých knihoven, které nám mohou usnadnit programování. V nabídce *Tools* si volíme PORT, ke kterému máme připojené Arduino a typ desky. V nabídce *Help* najdeme informace o naší verzi IDE a odkazy na oficiální webové stránky Arduina s různými návody.



Obrázek 16 Popis prostředí Arduino IDE [vlastní]

Kromě klasického menu v prostředí IDE najdeme i další funkce, tyto funkce jsou na obrázku 7, popis jednotlivých tlačítek je níže dle patřičných čísel.

1. Verify – slouží k ověření, kontrola syntaxe
2. Sketchbook – zde najdeme projekty uložené ve výchozí složce
3. Boards manager – slouží pro instalaci různých vývojových desek
4. Library manager – slouží ke zprávě přídavných knihoven
5. Debug – slouží k debuggování kódu, podporován jen u některých typů desek
6. Search – slouží pro vyhledávání znaků v programu
7. Upload – nahraje program do mikropočítače
8. Slouží pro výběr typu používané desky

Velkou výhodou tohoto prostředí je jednoduché přidávání knihoven, kdy není potřeba knihovny hledat pomocí webového prohlížeče, ale stačí kliknout na Library manager (viz obrázek 7), zde vyhledat knihovnu, kterou potřebujeme, kliknout na tlačítko instalovat a knihovnu máme připravenou k použití, dále je už jen potřeba zavolat ji v programu. Další výhodou je velké množství příkladů programů, které se nainstalovali společně s prostředím IDE a mohou tak skvěle posloužit jako výukové materiály v začátcích. [15, 16]

3.2 Programovací jazyk Wiring

Wiring je programovací jazyk a zároveň vývojové prostředí, které bylo navrženo s cílem zjednodušit programování mikrokontrolérů pro lidi, kteří s programováním neměli žádné předchozí zkušenosti. Jazyk vznikl již v roce 2003 jako diplomová práce. Cílem bylo vytvořit jednoduchý a přístupný způsob, jak umožnit interakci mezi hardwarem a softwarem pomocí mikrokontrolérů. Inspirací byl projekt Processing, který sloužil podobnému účelu v oblasti grafického designu a vizualizace. Struktura a syntaxe jazyka vychází z jazyka C/C++. [15, 18]

Wiring měl zásadní vliv na vznik Arduino. Vývojáři Arduina převzali nejen koncept jednoduchého vývojového prostředí, ale také základní strukturu programovacího jazyka. Jazyk používaný v Arduino IDE je ve skutečnosti přímým pokračovatelem Wiringu. Původní projekt Wiring je stále dostupný a vyvíjen jako samostatná platforma, i když jeho popularita je menší ve srovnání s Arduinem. Mnoho jeho principů však přetrvalo a žije dál právě v Arduino prostředí. [18, 19]

II PRAKTICKÁ ČÁST

4 HARDWAROVÝ NÁVRH

Tato kapitola je zaměřena na konkrétní návrh hardwaru a celkové zpracování jednotky sloužící k detekci neoprávněné těžby dřeva motorovou pilou v lese. V první části je popsána výsledná krabice je zaměřena na popis jednotlivých modulů, jejich propojení a funkčnosti. Dále zde je popsána výsledná krabice, ve které je uložena všechna elektronika, tak aby vše bylo schované a nemohlo dojít k nahodilému styku s elektronikou a zároveň, aby odolala vnějším vlivům počasí. V další části jsou popsány jednotlivé komponenty.

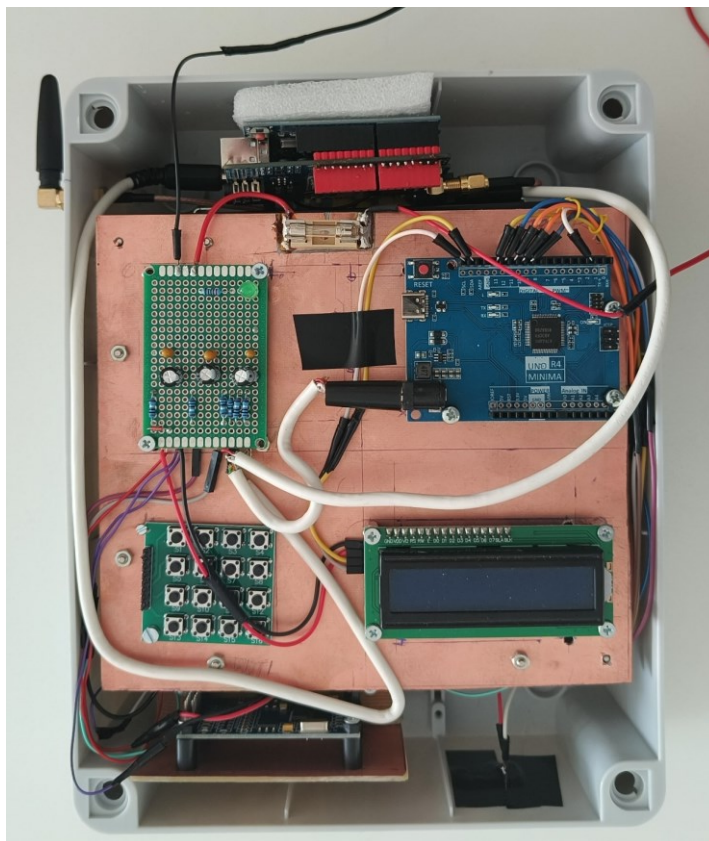
4.1 Instalační krabice s elektronikou

Všechn hardware je nainstalován průmyslové instalační krabici. Vnitřek krabice se skládá ze tří cuprexitových desek. Na spodní desce je přidělena 6 V baterie, kterou je napájena všechna elektronika za pomoci napájecí desky. Další dvě desky jsou spojeny mezi sebou, tak aby mezi nimi šli vést vodiče a na horní desce se nachází část elektroniky, vývojová deska Arduino UNO R4 a napájecí deska, maticový modul s tlačítky a LCD I2C displej. Všechny moduly jsou přišroubovány k desce pomocí distančních sloupků a šroubů. Mezi moduly a šroubkem je vždy plastová matice, tak aby nemohlo v žádném případě dojít ke styku živých částí. Tyhle dvě desky jsou pak nasezeny na distanční sloupky, tak aby mezi deskou s baterií a deskami s elektronikou bylo dostatečné místo.

Dále se v krabici nachází vývojová deska Arduino UNO R3, na kterou je nasazen GSM Shield modul SIM900, vývojová deska UNO R3 je připevněna na horní stěně boxu a anténa z modulu SIM900 je vyvedena na levé straně boxu ven, tak aby nebyl problém se signálem.

Na dolní straně boxu je připevněn A/D převodník a k němu připojený mikrofonní modul MAX4466. Mikrofon je z krabice na dolní straně vyveden ven, tak aby mohl zaznamenat příchozí akustické vlny. Mikrofonní modul je schválně dole, z důvodu vnějších vlivů počasí, tak aby byl kryt například před deštěm.

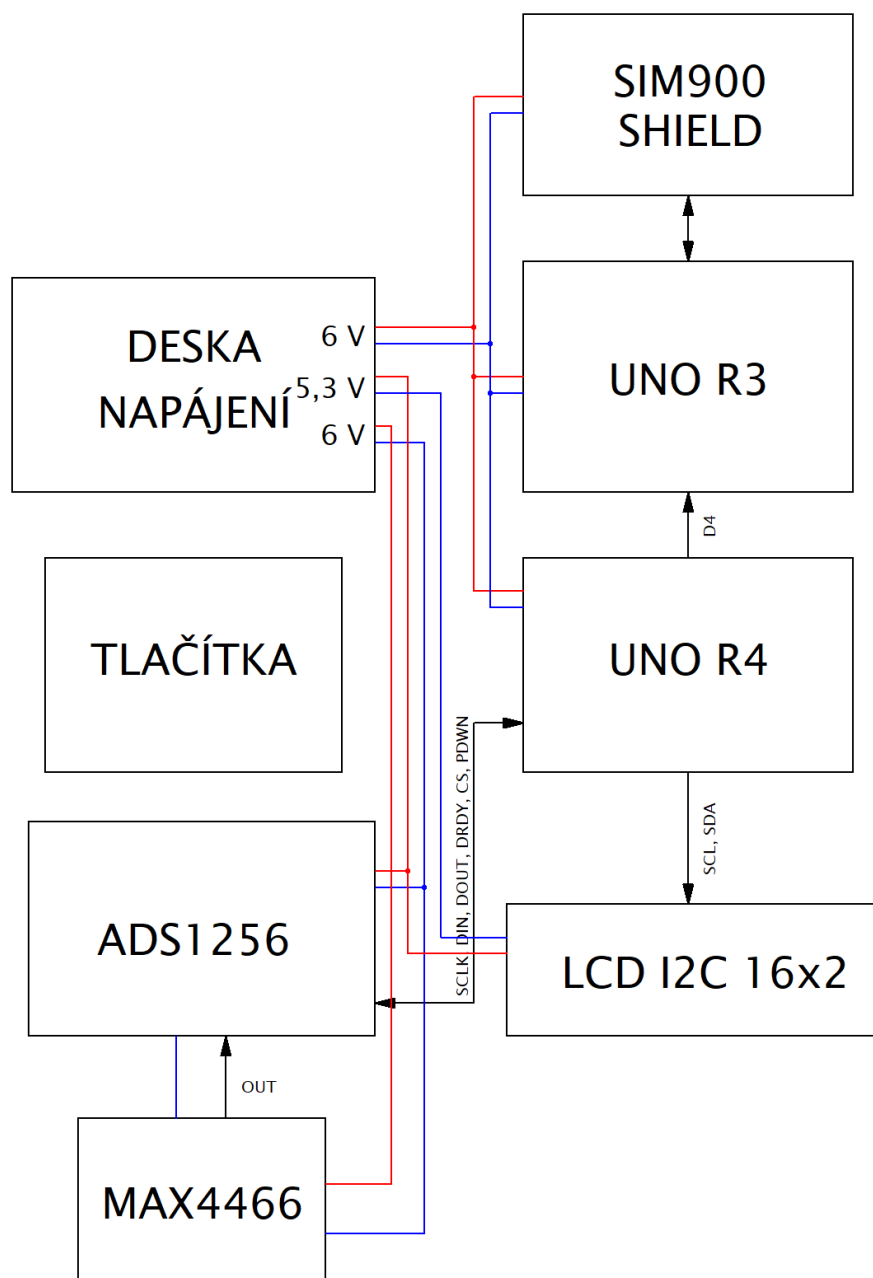
Rozložení v krabici je navrženo tak, aby byla rozdělena analogová a digitální část a docházelo tak k co nejmenšímu přenosu šumových signálů. A to z důvodu, že mikrofonní modul MAX4466 je poměrně citlivé zařízení a pro jeho správnou a přesnou funkci je třeba co nejvíce omezit možné rušení. Propojení z napájecí desky k modulům je zhotoveno z kabelu, který obsahuje stínění, aby se omezili co nejvíce vnější vlivy rušení.



Obrázek 17 Krabice s elektronikou [vlastní]

4.2 Blokové schéma zapojení

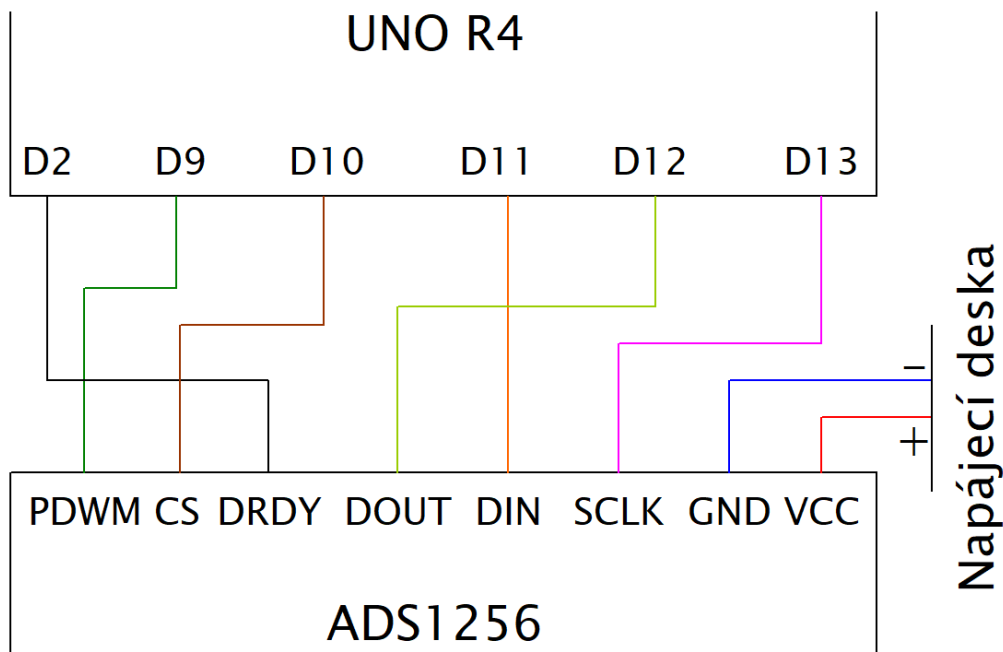
V blokovém schéma zapojení je znázorněno propojení jednotlivých komponent mezi sebou a napájením. Jedná se pouze o zjednodušené schéma, mezi moduly je vždy znázorněno propojení přívodu napájení, země a černě datový vodič, jednotlivé zapojení pinů, je znázorněné až na dalších obrázcích, a to z důvodu přehlednosti.



Obrázek 18 Blokové schéma zapojení

Na blokovém schéma lze vidět, že jeden napájecí uzel je čistě výkonový pro UNO R3, UNO R4 a GSM modul SIM900. Druhý uzel je pro LCD I2C displej a třetí pro A/D převodník ADS1256. Modul s tlačítky není nikam připojen, nachází se zde čistě jako možnost rozšíření v budoucnu. GSM Shield modul SIM900 je nasazen na UNO R3, komunikace probíhá pomocí UART rozhraní. Napájení je třeba přivést jak na GSM modul, tak na UNO R3, na kterém se nachází, a to z důvodu, že GSM modul při připojení k mobilní síti se zde objevují velké proudové špičky, až 2 A, a kdyby byl napájen pouze z UNO R3, mohlo by dojít k jeho zničení. UNO R4 a R3 je spojeno pouze jedním drátem na digitálním vstupně/výstupním

pinu D4. Zde dochází pouze k přenosu „jedničky“, když je potřeba odeslat SMS. Spojení mezi UNO R4 a LCD I2C displejem je provedeno pomocí pinů SCL a SDA. Tyto piny se nachází na pozici D19 a D18, druhou variantou je použití SDA a SCL na pinech A4 (SDA) a A5 (SCL). A/D převodník ADS1256 je připojen k vývojové desce UNO R4 pomocí SPI sběrnice, která se nachází na digitálních pinech D10 až D13. Přesně zapojení je znázorněno níže na obrázku 26.



Obrázek 19 Schéma propojení UNO R4 a ADS1256

Na A/D převodník je následně připojen mikrofonní modul, kdy zem mikrofonu je připojena na zem GND A/D převodníku a výstup mikrofonu je připojen na analogový pin AIN0. Toto zapojení slouží „Single-ended“ měřením, jedná se o zapojení se společnou zemí.

4.3 Použité komponenty

Centrální jednotkou je 32bitový mikropočítač Arm Cortex M4, který se nachází na vývojové desce Arduino UNO R4, tato deska byla vybrána na základě vyšších požadavků na paměť a výpočetní rychlost, kdy jeho předchůdce UNO R3, ani jedno nesplňoval, další možností byla deska MEGA2560, ale i zde byly problémy s malou pamětí a nedostatečným výpočetním výkonem.

Další důležitou částí je 24bitový převodník ADS1256, který umožňuje mnohem větší rozlišení oproti převodníku, který se nachází na samotné desce UNO R4, zde je převodník maximálně 14bitový. K 24bitovému převodníku je následně připojen mikrofonní modul se

předzesilovačem MAX4466, ten slouží ke snímání okolního analogového zvuku, který je následně převeden na digitální právě pomocí ADS1256, díky tomu máme signál vhodný pro další zpracování.

Pro zobrazování některých informací, hlavně při ladění je zde LCD I2C 16x2 displej, displej, jak je z názvu patrné má 2 řádky po 16 znacích a k Arduino UNO R4 je připojen pomocí I2C sběrnice. Krom displeje je zde i matice tlačítek, ta je ovšem nevyužívaná, je zde pouze jako možnost pro případné rozšíření v budoucnu.

Poslední neméně důležitou částí je GSM shield modul SIM900, který v mém případě slouží k odesílání SMS zpráv, ale zvládne zprávy i přijímat. Krom zpráv zvládá i hovory a také datový přenos. Modul SIM900 není připojen přímo na UNO R4, ale je na UNO R3, a to z důvodu kompatibility.

4.3.1 Arduino UNO R4 Minima

Použit byl precizní klon vývojové desky Arduino UNO R4 Minima s mikropočítačem 32bit Arm Cortex M4. Klon byl zvolen z důvodu nižší pořizovací ceny, nicméně parametry a jeho funkčnost je stejná jako u originální Arduino desky. Jedná se poměrně nový model, Arduino UNO R4 bylo uvedeno na trh v roce 2023. Oproti předchůdci UNO R3 má výkonnější mikropočítač a větší paměť, což byl hlavní důvod jeho volby. Obsahuje dostatečný počet vstupně-výstupních digitálních a analogových pinů a možnost externího napájení. Deska obsahuje několik LED, které slouží pro kontrolu jeho funkčnosti a nahrávání programů do paměti. Dále se na desce nachází i tlačítko RESET.

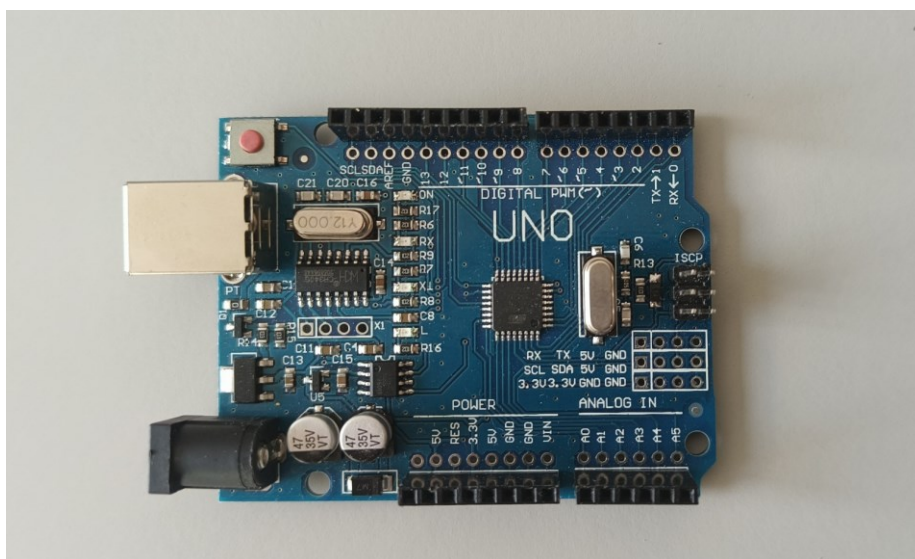
Více informací o desce je k nalezení v kapitole 2.5, kde jsou popsány jeho technické parametry a následně v tabulce 1. je srovnání s dalšími deskami Arduino, jen bych zmínil jeho taktovací rychlost, která 48 MHz, což je trojnásobně větší, než UNO R3 nebo MEGA2560, dále velikost paměti SRAM, která je 32 kB, což je dostačující pro naše účely. Výhodou také pro někoho může být připojení k PC a následné nahrávání programu pomocí USB typu C.



Obrázek 20 Vývojová deska UNO R4 Minima [vlastní]

4.3.2 Arduino UNO R3

Arduino UNO R3 je využito čistě jako základ pro GSM shield modul SIM900, a to z prostého důvodu, že není zaručena kompatibilita mezi Arduino UNO R4 a GSM modulem. Využit i zde byl klon vývojové desky UNO R3. Vývojová deska obsahuje 2 LED, které signalizují připravenost a nahrávání programu a tlačítko RESET. Deska UNO R3 se od UNO R4 vzhledově moc neliší, hlavním rozdílem je USB konektor, kdy zde je USB typu B. Více technických parametrů je zahrnuto v teoretické části v kapitole 2.5.



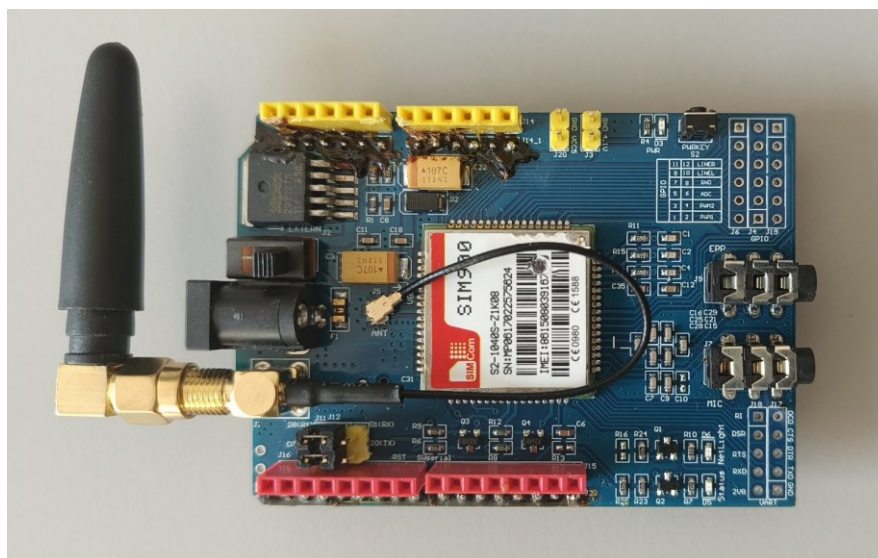
Obrázek 21 Arduino UNO R3 [vlastní]

4.3.3 GPRS GSM Shield SIM900

Jedná se o modul, který umožňuje bezdrátovou komunikaci v mobilních sítích prostřednictvím technologií GSM (Global System for Mobile Communications) a GPRS (General Packet Radio Service). Modul využívá čip SIM900 od společnosti SIMCom. Modul podporuje 4 GSM pásma 850/900/1800/1900 MHz a je tak kompatibilní se sítěmi po celém světě.

V mém případě využíváme modul pouze pro odesílání stavových SMS, ale modul umožňuje SMS i přijímat, také umožňuje realizaci hlasových modulů a datové připojení pomocí GPRS.

Jedná se o shield verzi, takže celý modul je nasazen na UNO R3. Komunikace mezi modulem a Arduino UNO R3 probíhá pomocí UART rozhraní, piny TX a RX. Modul obsahuje slot pro klasickou SIM kartu formátu mini SIM. Modul může být napájen přímo z UNO, ale kvůli vysokým proudovým špičkám, ke kterým dochází během připojení k síti, se doporučuje využívat externí napájení, což je i můj případ. Součástí modulu se konektor pro anténu, která nám zajišťuje lepší signál, tím pádem spolehlivější funkčnost. Na modulu se také nachází tlačítko, které slouží ke zapnutí modulu. Po drobné úpravě, propojení dvou PIN, lze modul zapínat i programově pomocí PINU D9. Na modulu jsou také 3 stavové LED. Jedna udává stav desky, zda je nebo není zapnutá a další dvě udávají dle jejich frekvence blikání stav čipu, zda je nebo není připojen k síti nebo či je SIM aktivní či ne atd. [20, 21]



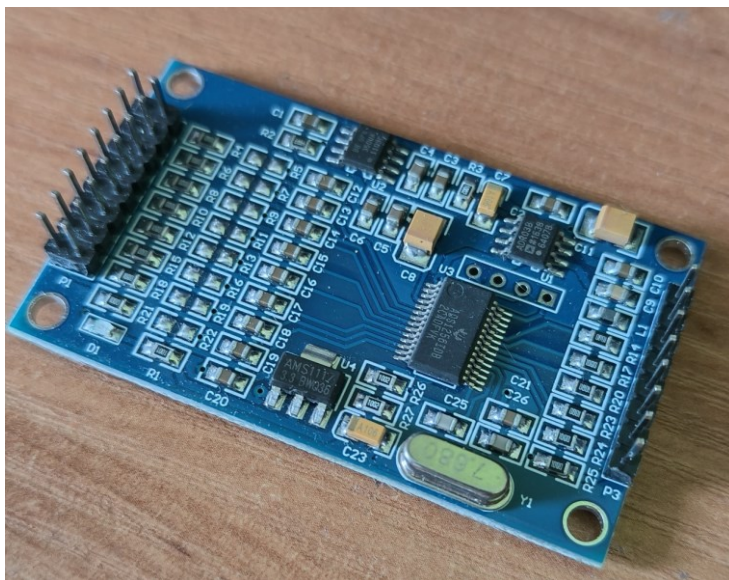
Obrázek 22 GPRS GSM Shield SIM900 [vlastní]

4.3.4 A/D převodník ADS1256

ADS1256 je vysoce přesný 24bitový analogově-digitální převodník od firmy Texas Instruments, navržený pro aplikace, které vyžadují vysoké rozlišení a přesnost měření. Patří mezi tzv. delta-sigma převodníky a nabízí osm kanálů pro diferenciální nebo jednokanálové vstupy (na obrázku 19 vstupy nalevo AIN0 až AIN7, každý analogový vstup má vedle sebe i PIN GND pro jednokanálové měření). Převodník obsahuje integrované programovatelné zesílení PGA s programově nastavitelným ziskem až 64x. Díky tomu lze zpracovávat i velmi slabé signály.

Komunikace s mikropočítačem probíhá pomocí SPI (Seriál Peripheral Interface) rozhraní, díky čemuž je propojené s UNO R4 poměrně jednoduché. Převodník podporuje vzorkovací frekvenci až 30 vzorků za sekundu, což je dostatečné i pro dynamické měření v reálném čase.

Tento převodník byl vybrán právě kvůli velkému rozlišení, velké vzorkovací rychlosti a také kvůli jednoduchému propojení s UNO R4 Minima.



Obrázek 23 ADS1256 [vlastní]

4.3.5 Mikrofonní modul MAX4466

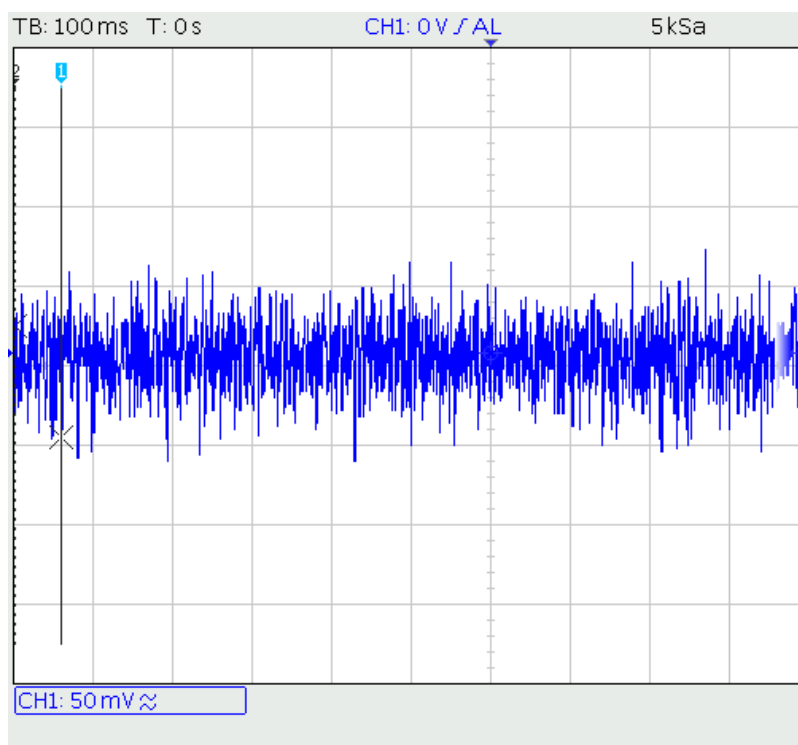
Mikrofonní modul s integrovaným operačním zesilovačem MAX4466 je citlivý analogový mikrofon s možností nastavení zesílení pomocí otočného trimru. Mikrofon, který se na modulu nachází je elektretový. Výstupem modulu je napětí odpovídající amplitudě zvukové vlny, které lze snadno měřit pomocí analogového vstupu mikropočítače, v mém případě je měřeno pomocí A/D převodníku ADS1256, abychom dosáhli lepšího rozlišení, a tím pádem

přesnějším výsledků. Napájecí napětí modulu je 2.4 až 5.5 V, což umožňuje snadné připojení k vývojové desce Arduino UNO R4.



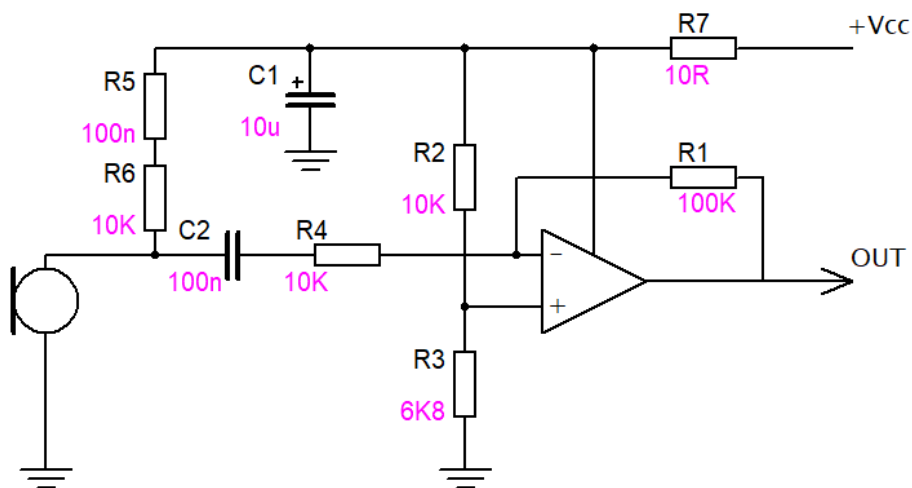
Obrázek 24 MAX4466 [vlastní]

S mikrofonním modulem proběhl několik testovacích měření, aby byly zjištěny jeho šumové hladiny a správná funkce. Během měření bylo zjištěno že šum, který vytváří zesilovač, který se na desce mikrofonního modulu nachází má poměrně velké šumové hladiny (± 50 mV) viz. Obrázek 25, a proto došlo k rozhodnutí, že obvod se zesilovačem bude nahrazen vlastním obvodem se zesilovačem značky Texas Instruments v invertujícím zapojení.

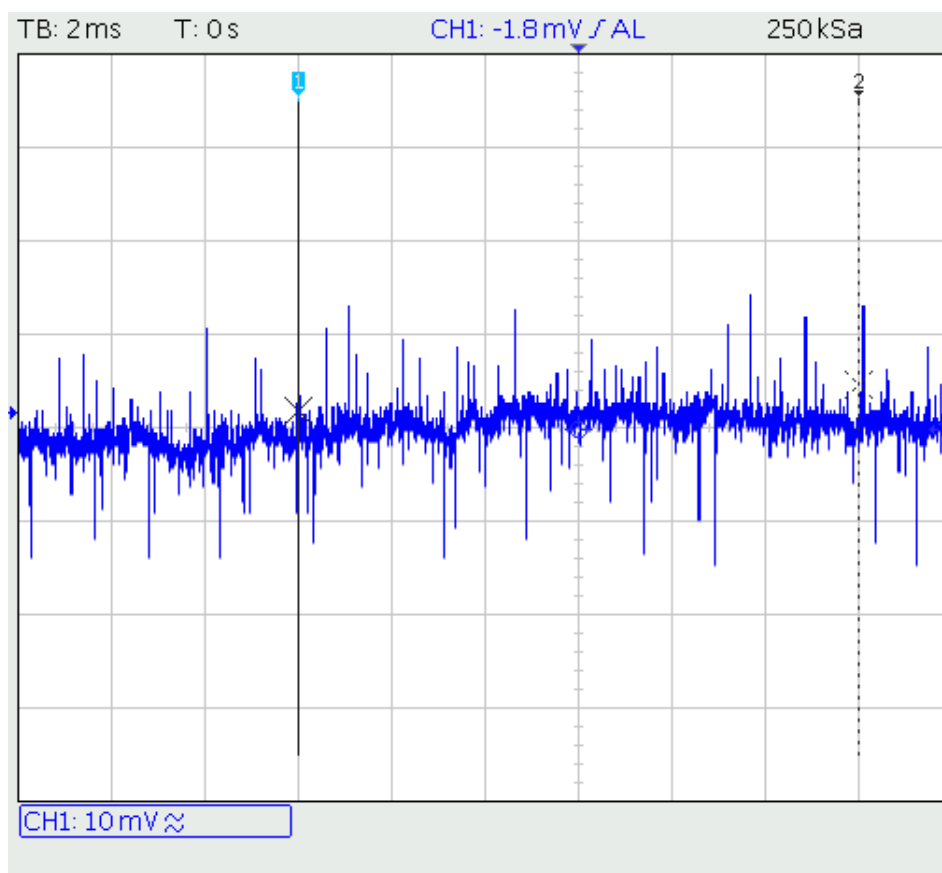


Obrázek 25 Šum na MAX4466 [vlastní]

Zapojení s invertujícím zesilovačem bylo navrženo, tak aby se zachovali veškeré vlastnosti, ale snížila se šumový hladina. Napájení zesilovací desky je řešeno z hlavní napájecí desky. Napájecí napětí je 6 V. Zesílení je 10, o zesílení se stará odporový dělič R1/R2.

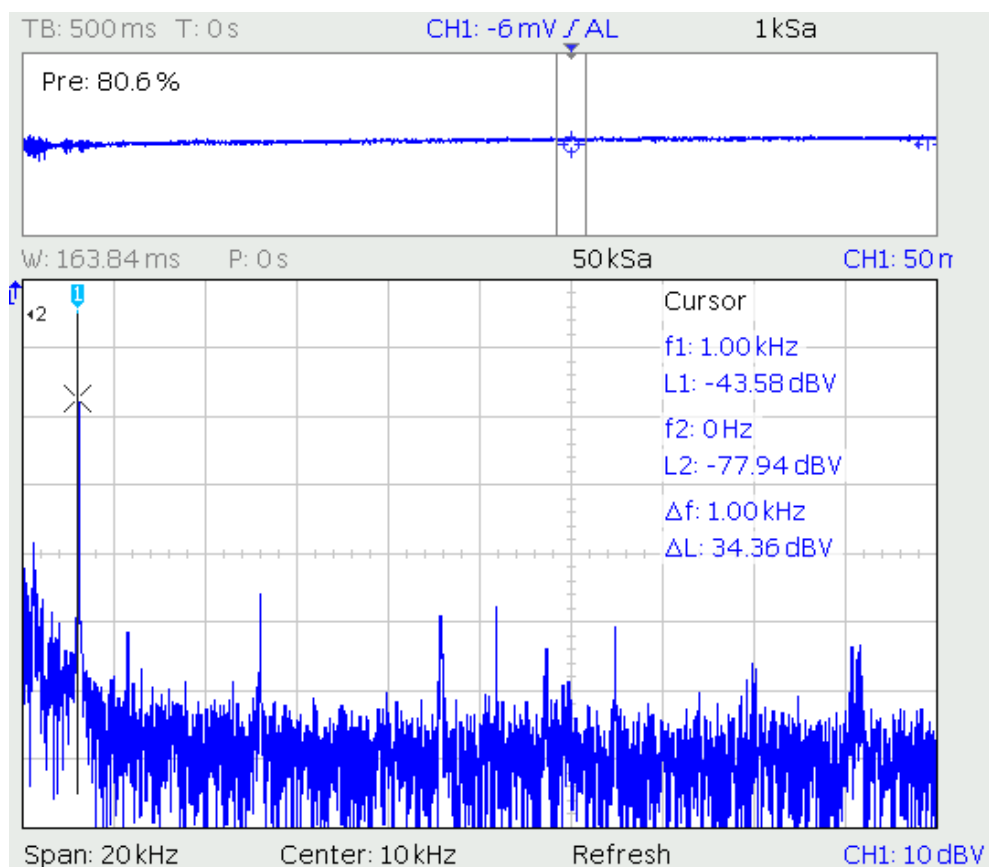


Obrázek 26 Schéma zapojení invertujícího zesilovače [vlastní]



Obrázek 27 Šum na mikrofону s vlastním zesilovačem [vlastní]

Na obrázku 27 je naměřený šum na mikrofonním modulu, po tom, co původní zesilovač byl nahrazen vlastním obvodem. Tím že jsme nahradili zesilovač, jsme dosáhli snížení šumové hladiny z ± 50 mV na ± 10 mV. Obě měření probíhali na stejném osciloskopu, za stejných podmínek.



Obrázek 28 FFT pomocí osciloskopu, referenční zvuk tón o 1 kHz [vlastní]

Na obrázku 28 lze vidět frekvenční spektrum získané pomocí funkce FFT na osciloskopu, kdy jako testovací signál byl použit tón o frekvenci 1 kHz. Sonda osciloskopu byla připojena na výstupu našeho vlastního zesilovacího obvodu, tímto jsme si ověřili že mikrofon v zapojení s našim vlastním zesilovačem funguje správně. Z grafu je vidět, že hladina pro 1 kHz je -43.58 dBV, zbytek spektra je šum a ten se pohybuje v hodnotách okolo -70 až -80 dBV, z čehož dojde k závěru že dynamika je dostatečná.

4.3.6 LCD I2C 16x2 displej

Jedná se o dvouřádkový LCD (Liquid Crystal Display) displej, s 16 pozicemi pro znak na každém řádku. Displej pro propojení s Arduino UNO R4 využívá I2C rozhraní, což zjednodušuje jeho propojení, kdy klasický displej potřebuje minimálně 6 datových typů, zde stačí pouze 2 PINY a to SCL (clock) a SDA (data) a 2 napájecí PINY, respektive jeden pro

napájecí napětí Vcc a druhý je zem GND. Displej je běžně napájen napětím 5 V. Dále umožňuje nastavit kontrast pomocí otočného trimru, který se nachází na zadní straně modulu.

Tento typ byl zvolen právě z důvodu propojen pomocí pouze 2 vodičů. Displej, slouží v tomto projektu hlavně pro zobrazování mezivýsledků a ověření správné funkčnosti programu.



Obrázek 29 LCD I2C 16x2 [vlastní]

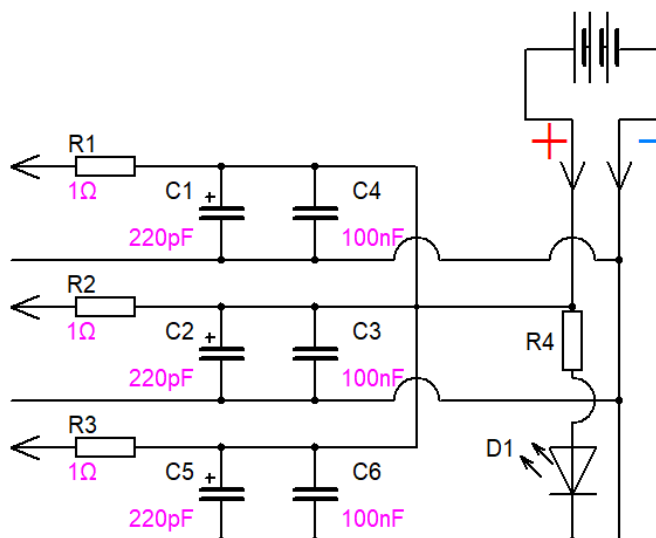
4.3.7 4x4 Maticová tlačítková klávesnice

Jedná se modul s 16 tlačítky, který v našem projektu není využívám, ale je zde pouze jako možnost rozšíření do budoucna. Kdy by na displeji třeba mohlo být nějaké menu, kterým by se dalo procházet, právě pomocí tohoto modulu s tlačítky.

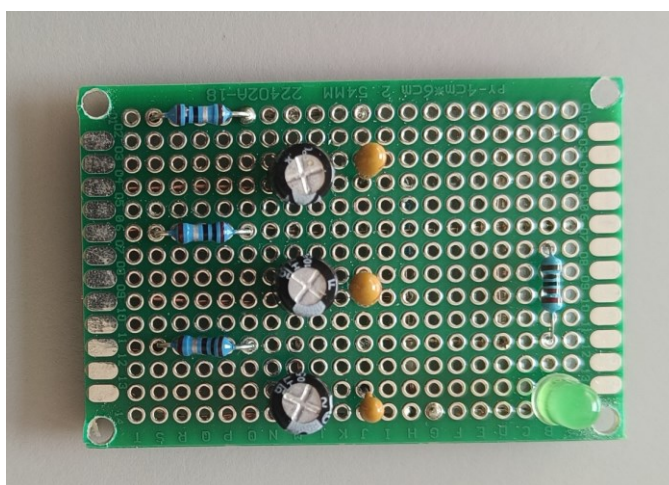
4.3.8 Napájecí deska

Vše výše uvedené je napájené z 6 V baterie, ale aby to bylo možné bylo potřeba nejprve vyrobit desku, který nám to umožní. Napájecí napětí je na desce rozvedeno do tří samostatných větví. První větev slouží jako výkonová, pro napájení vývojových desek UNO R3 a UNO R4 Minima a také pro napájení GSM Shieldu SIM900, ten by mohl být napájen z UNO R3, na kterém je nasazený, ale při odesílání SMS dochází k velkému proudovému odběru, který UNO R3 nemusí zvládnout. Druhou větví je napájen A/D převodník ADS1256 a třetí větví je napájen LCD I2C displej.

Deska obsahuje indikační LED, která indikuje, zda je přítomné napájení, dále na každé větvi dva kondenzátory pro potlačení šumu a odpor.



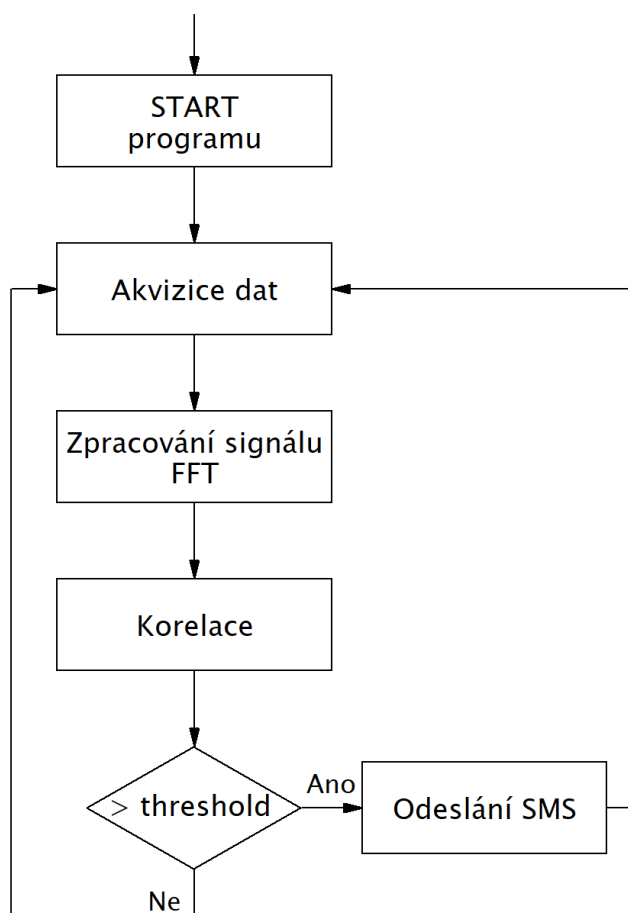
Obrázek 30 Schéma napájecího obvodu [vlastní]



Obrázek 31 Napájecí obvod [vlastní]

5 PROGRAMOVÁ ČÁST

Po výběru vhodných komponent, došlo k návrhu záznamu a zpracování zvuku v programové části. Programová část se dělí na dva hlavní bloky. Ten první se věnuje MATLABU a programování v něm, kdy bylo nejprve simulačně ověřit funkci jednotlivých podprogramů, které následně jsou implementovány do programu UNA R4. Druhá část se zabývá návrhem a programem přímo pro vývojovou desku Arduino UNO R4. Něž dojde k teoretickým či simulačním testům v MATLABU, je vhodné ukázat si na vývojovém diagramu, jak celý běh programu probíhá.



Obrázek 32 Vývojový diagram programu [vlastní]

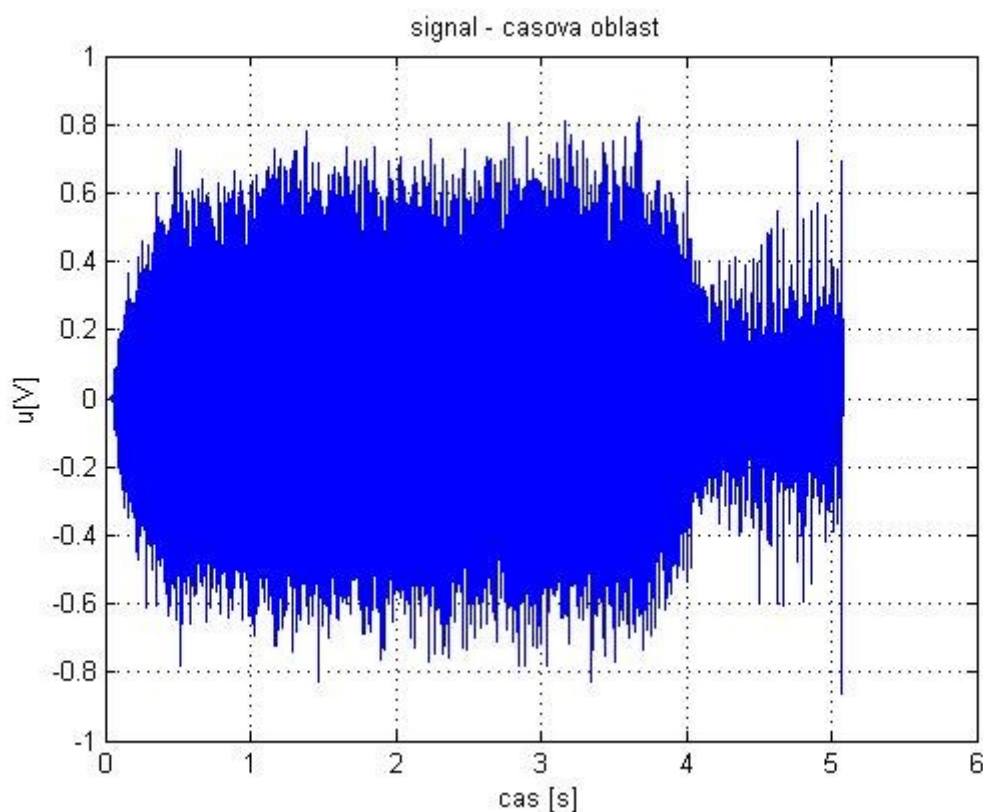
Z vývojového diagramu na obrázku 31 je zřejmé, že program se dělí na tři hlavní části. V akviziční části probíhá akvizice dat, odečítáním hodnot z A/D převodníku a k němu připojenému mikrofону. Další částí je zpracování signálu, převod do použitelných jednotek a následně je na datech provedena FFT analýza. Poslední částí je korelační analýza, kdy při překročení daného thresholdu dojde k odeslání varovné SMS.

5.1 Testování v softwaru MATLAB

Jako první bylo potřeba provést simulační testy a rozbor spektra motorové pily, abychom následně mohli správně zvolit potřebné parametry jako je počet vzorků nebo vzorkovací frekvence a vhodnou metodu korelace.

5.1.1 Rozbor audio signálu motorové pily

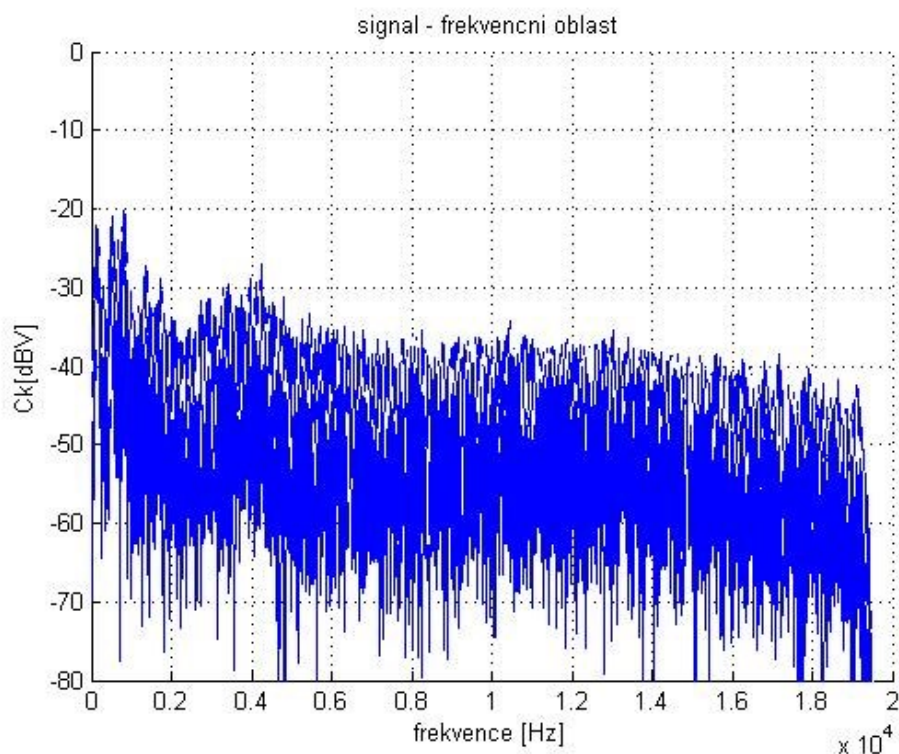
Rozbor audio signálu motorové pily, byl proveden na signálu získaného z webového portálu Pixabay [22]. Jedná se o signál motorové pily, který je poměrně stálý, s poměrně velkou amplitudou, jak je patrné z obrázku 32.



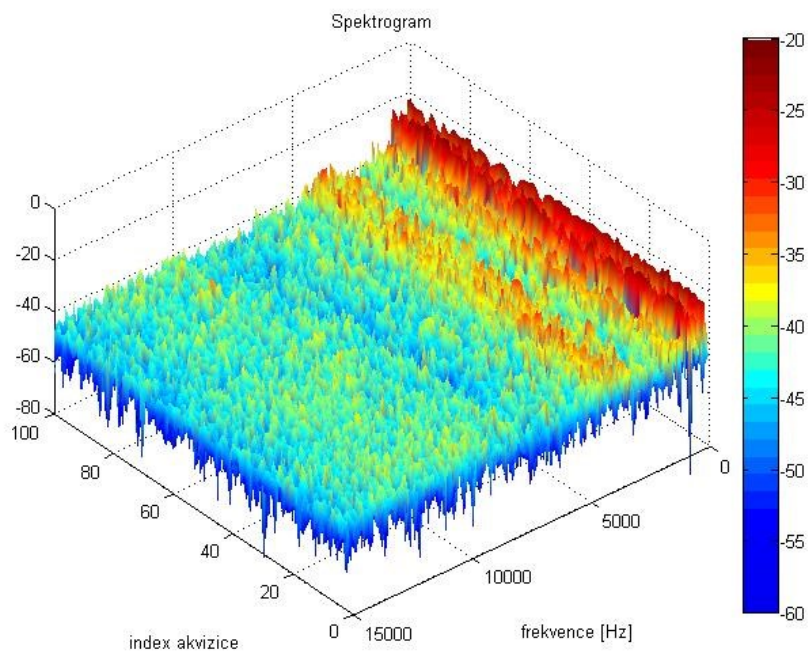
Obrázek 33 Průběh audio signálu motorové pily v čase [vlastní]

Na dalším obrázku číslo 33 je průběh signálu ve frekvenční oblasti, jedná se o 100 akvizic překreslených přes sebe. Počet vzorků na jednu akvizici je 1024. Vzorkovací frekvence signálu je 44100 Hz, takže maximální hodnota na ose x odpovídá Nyquistově frekvenci neboli polovině vzorkovací frekvence, což je v mém případě 22050 Hz. Z obrázku jsou již patrné některé významné frekvence, nejvíce jich je do 1 kHz, dále pak výraznější složky jsou okol 4 kHz. Ještě lépe je to patrné na následujících obrázcích 34 a 35, kde je přímo

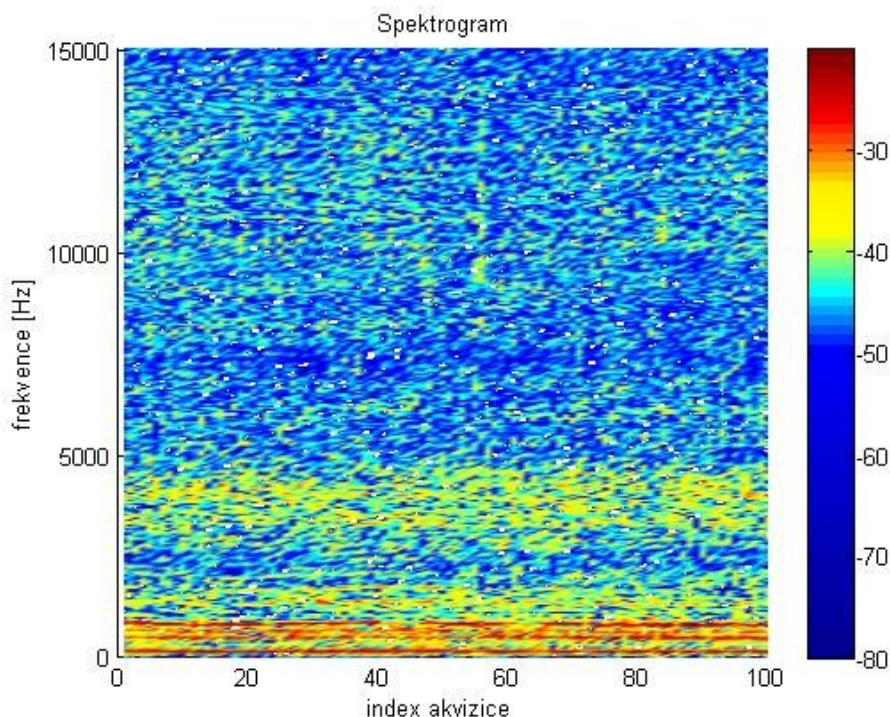
spektrogram signálu. Nejsilnější složky dosahují amplitudy až -20 dBV. Od 5ti kHz je spektrum poměrně nevýrazné a amplitudy dosahují hodnot kolem -45 dBV.



Obrázek 34 Průběh signálu motorové pily ve frekvenčním spektru [vlastní]



Obrázek 35 3D Spektrogram signálu motorové pily [vlastní]



Obrázek 36 2D Spektrogram signálu motorové pily [vlastní]

Tento signál následně posloužil jako referenční při vyhodnocení korelace, také na základě rozboru tohoto signálu byla zvolena vzorkovací frekvence pro výpočet FFT jako 22050 Hz. Volbou této frekvence dosáhneme, že pokryje frekvence až do 11025 Hz neboli do Nyquistovy frekvence, což pro vyhodnocení motorové pily, jak jsem zjistili ze spektrogramů stačí. Důležité frekvence, kde se nachází výrazné složky jsou všechny jsou všechny do 5 kHz čili máme ještě rezervu. Dále na základě rozboru tohoto signálu byl zvolen počet vzorků N pro FFT na 512. Tím dosáhneme rozlišení ve spektru zhruba 43 Hz.

$$d_f = \frac{f_s}{N} = \frac{22050}{512} = 43,066 \text{ Hz}$$

Kde d_f je kmitočtový krok, f_s je vzorkovací frekvence a N je počet vzorků zaznamenaných v jednom bloku akvizice.

5.1.2 Výběr vhodného způsobu korelace

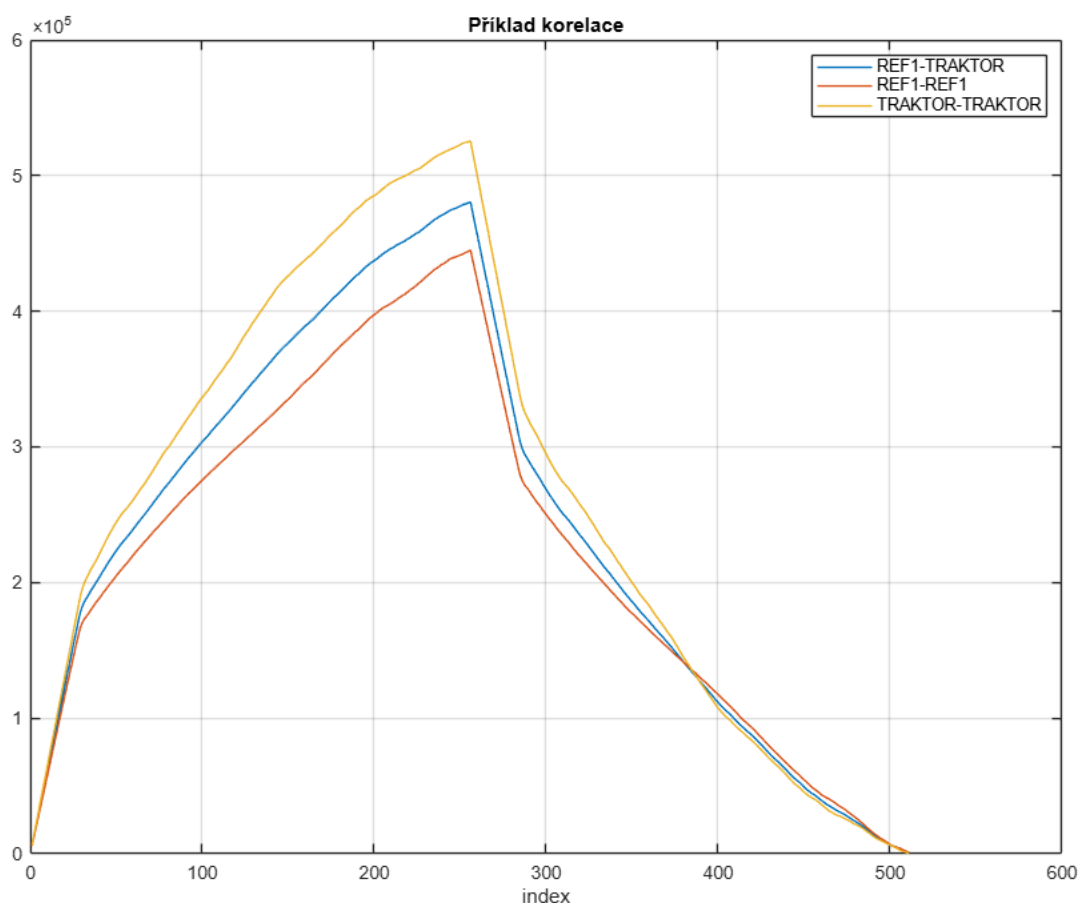
V této kapitole je popsán výběr vhodné korelace pro naše potřeby. Jsou zde tetsovány dvě metody korelace, korelace popsaná v teoretické části v kapitole 1.5 a Pearsonova korelace. Oba korelační způsoby také byly otestovány pro několik typů vstupních dat. První možnost

jsou hodnoty v decibelech na volt dBV. Jako první test tedy proběhla klasická korelace dle následujícího vzorce:

$$r_{xy}[n] = \sum_n x[n] \cdot y[n + m]$$

Kde n je časový posun, $x[n]$ je první signál a $y[n+m]$ je druhá signál posunutý o n . Tato operace se provádí pro více hodnot n a výsledek je maximální právě v moment kdy porovnávané signály si jsou nejvíce podobné

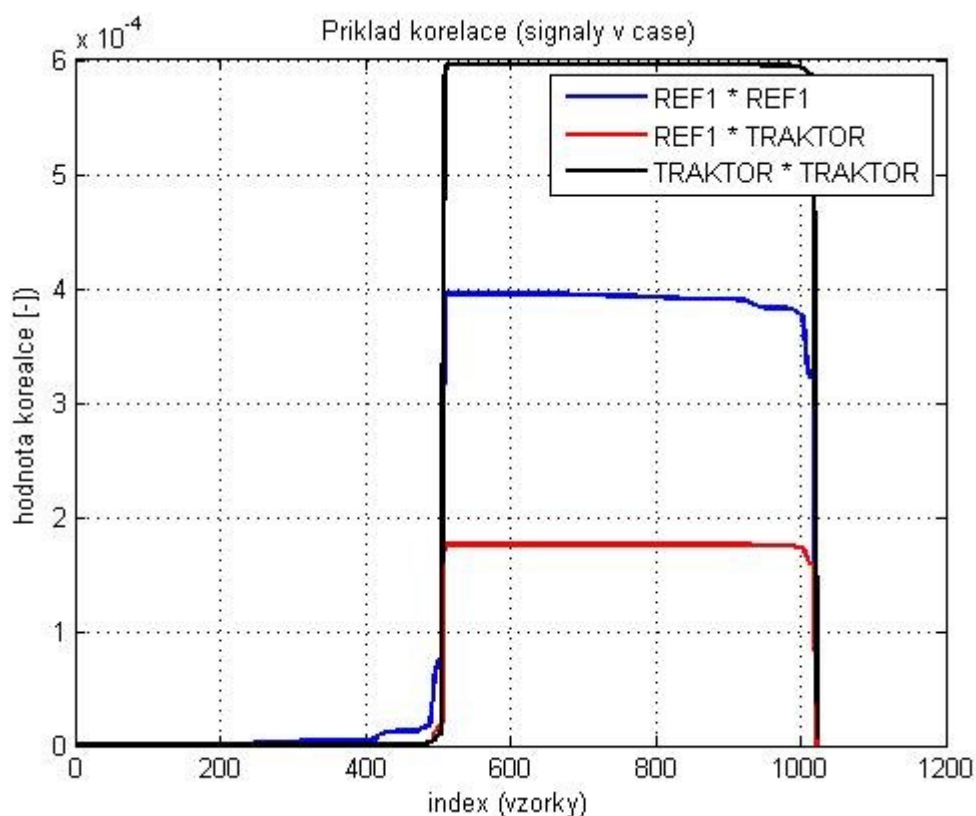
Korelace proběhla pro referenční signál sám se sebou, referenční signál s audio signálem traktoru, traktor proto, že je to jeden z možných zvuků, které jsou v lese slyšet a je zvuku motorové pily poměrně blízký a pro signál traktoru sám se sebou. Cílem je na zvuk traktoru nereagovat, proto je potřeba znát korelaci traktoru s naším referenčním signálem.



Obrázek 37 Graf příkladu korelace [vlastní]

Z grafu 37 je patrné, že tento způsob korelace pro vstupní hodnoty v jednotkách decibel na volt není vhodný pro detekci audio signálu motorové pily.

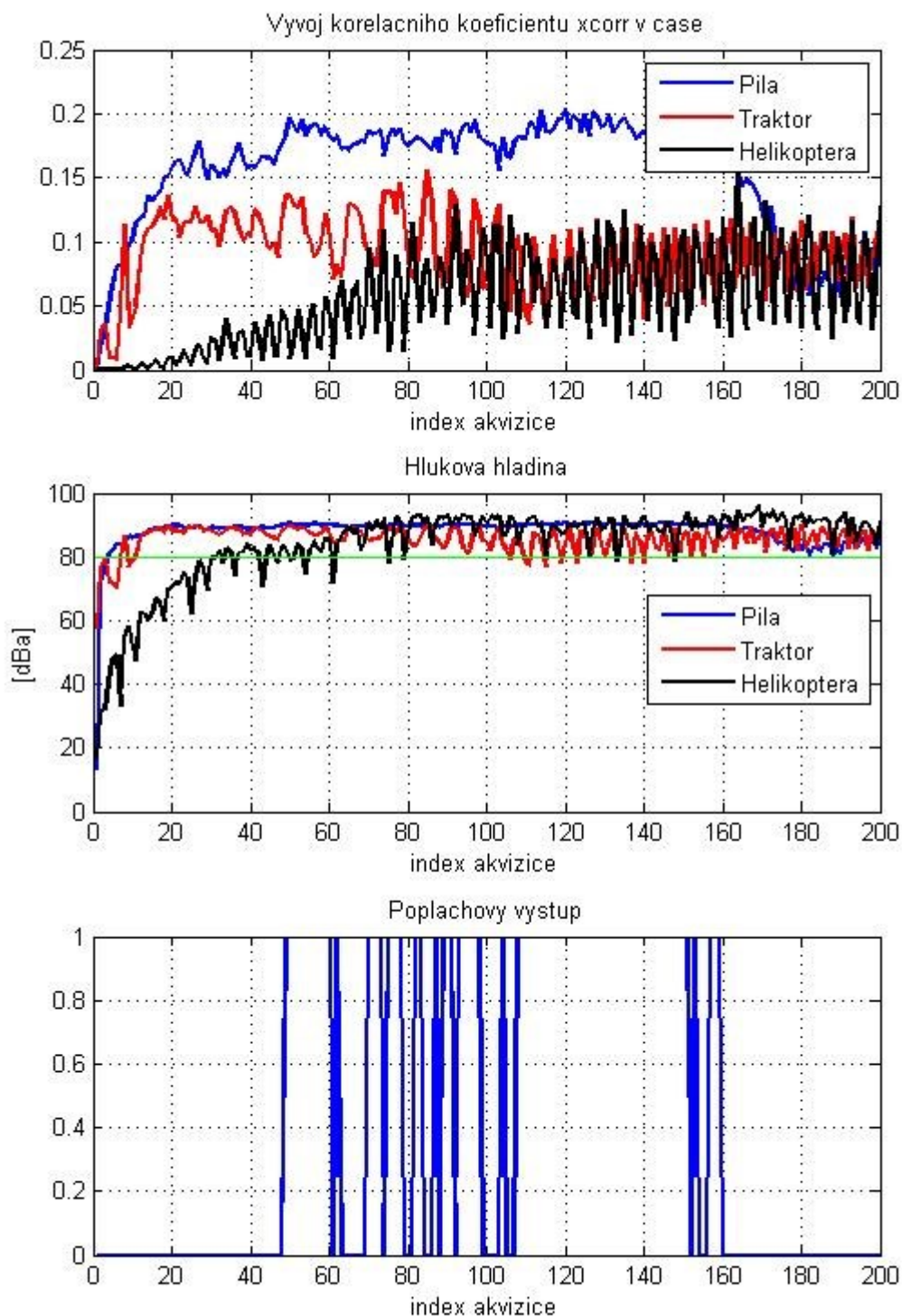
Dalším modifikace proběhla tak, že vstupní hodnoty nebyly brány v decibelech na volt, ale došlo nejprve k přepočtu frekvenčního spektra na výkonové spektrum a byly korelačně porovnávány spektra výkonová.



Obrázek 38 Korelace výkonových spekter vybraných signálů [vlastní]

Zde z obrázku 40 je zřejmé, že i zde je rozlišitelnost mezi signály velmi malá a nevhodná pro naši aplikaci. Práh, který se v programu nastavuje a určuje shodu či ne by musel být velmi malý a nejspíše by docházelo k falešným poplachům.

Další možností bylo vstupní data brát v jednotkách volt. Zde jsme dosahovali již lepších výsledků, a proto vznikly tři grafy nad sebou (viz obrázek 39) a byl přidán ještě jeden signál, který se může v lese objevovat, a to je helikoptéra.



Obrázek 39 Grafy srovnávající korelaci pro různé signály jejich hluková hladina a poplachová zpráva [vlastní]

První graf (obrázek 39 – Vývoj korelačního koeficientu v case) zobrazuje vývoj korelačního koeficientu v čase, respektive pro je vypočten pro každou akvizici signálu, kdy celkový počet akvizic byl zvolen 200. Z grafu je vidět, že korelace referenčního signálu a se signálem pily dosahuje hodnot kolem 0,18 až 0,20. Korelace signálu pily se signálem traktoru je o něco nižší, hodnoty od 0,05 až 0,15 a korelace signálu pily se signálem helikoptéry je ještě příznivější a zde korelační koeficient dosahuje hodnot mezi 0,05 a 0,1.

V druhém grafu (obrázek 39 - Hluková hladina) je přepočítaná a zobrazena hodnota v akustických decibelech. Zelená čára ukazuje hranici 80 dB.

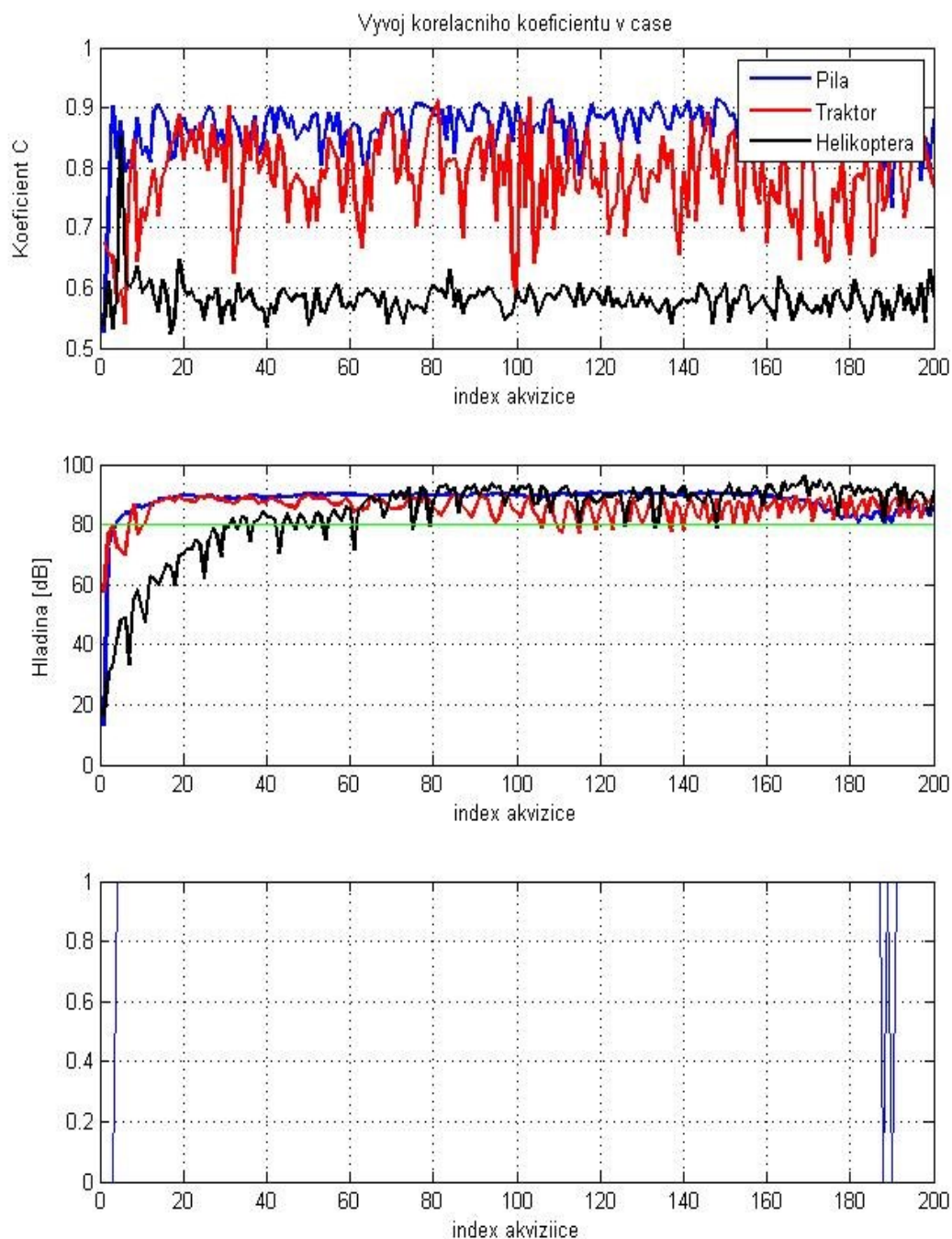
Na základě těchto výsledků byl nastaven threshold pro poplachovou zprávu, hodnoty prahu byly nastaveny, tak že když korelační koeficient překročil 0.18 a zároveň zvuková hladina překročila 80 dB. Došlo k odeslání SMS zprávy, zde se (obrázek 39 – Poplachový výstup), to simulovalo tím, že signál přešel z nuly do jedničky.

Dalším možným způsobem korelace je Pearsonova korelace. Tato korelace vrací korelační koeficient v rozmezí -1 až 1. Kdy kladné hodnoty znamenají kladnou lineární korelaci a záporné hodnoty negativní lineární korelaci. Čím blíže je hodnota korelace k 1 nebo -1 tím silnější korelace je, jinak řečeno, čím blíže korelační koeficient je k 1 nebo -1, tím podobnější jsou si signály. Pro Pearsonovu korelaci byl využit následující vzatah:

$$r = \frac{\sum_{n=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{n=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{n=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Kde x_i jsou jednotlivé vzorky prvního signálu, y_i jsou jednotlivé vzorky druhého signálu, $\bar{x}$ a $\bar{y}$ jsou průměry daných signálů.

Pro Pearsonovu korelaci stejně jako pro korelaci křížovou vznikly tři grafy nad sebou (obrázek 40), vstupními daty, zde jsou spektra v decibelech na volt. Korelace výkonových spekter zde vycházela nevhodně, proto se rovnou přešlo na korelaci frekvenčních spekter v dBV.



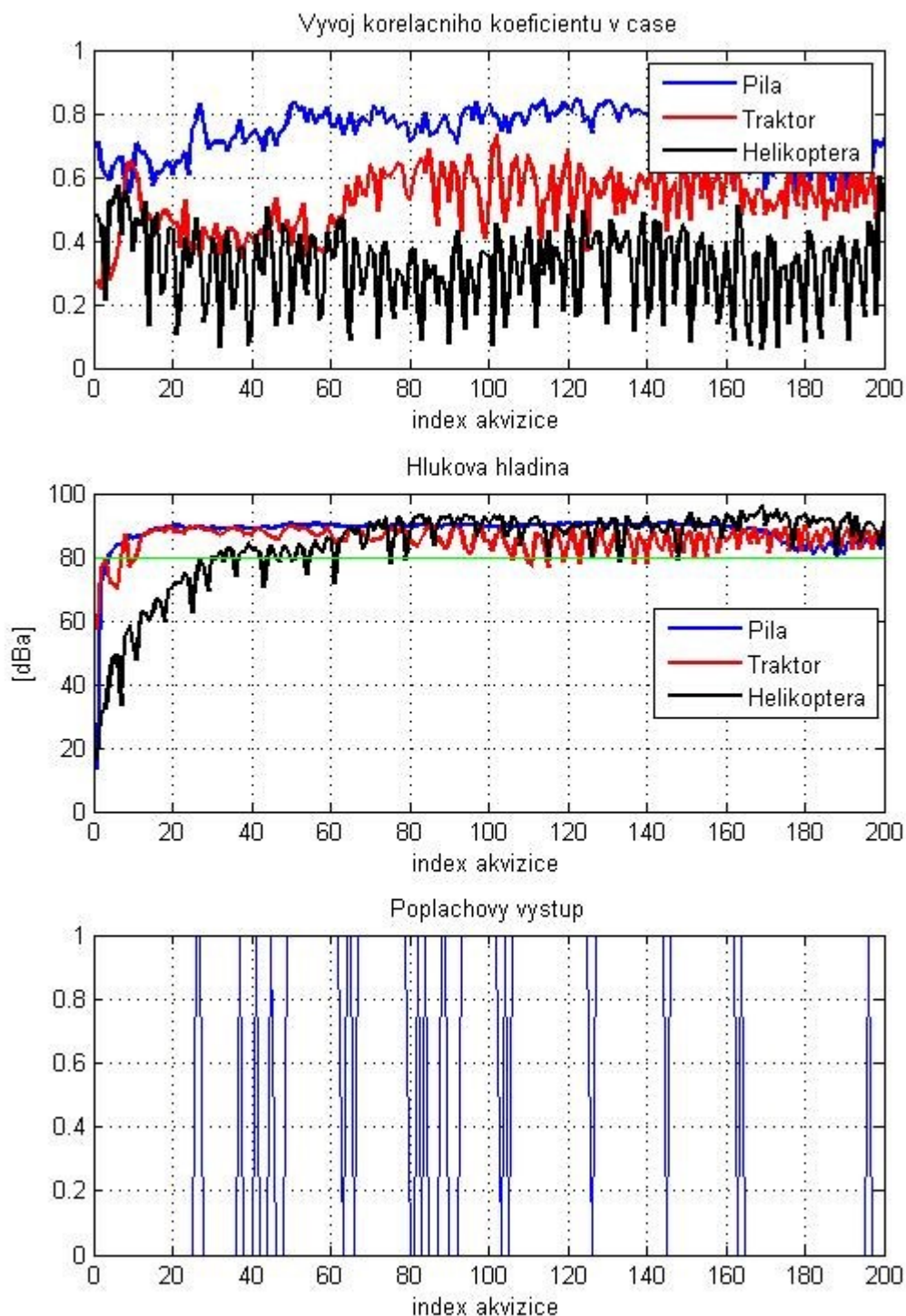
Obrázek 40 Grafy srovnávají Pearsonovu korelaci pro různé signály jejich hluková hladina a poplachová zpráva, vstupní data frekvenční spektra [vlastní]

V prvním grafu (obrázek 40 – Vývoj korelačního koeficientu v case), je stejně jako u předchozího obrázku zobrazen vývoj korelačního koeficientu v čase, pro 200 akvizic. Zde jsou hodnoty korelačního koeficientu již větší a je zde tak lepší možnost nastavení rozhodovacího prahu. Korelační koeficient pro korelaci referenčního signálu s pilou vychází kolem 0,8 až 0,9, kdy 1 je maximum čili je zde poměrně velká shoda. Korelace referenčního signálu a traktoru vychází však poměrně nepříznivě, pohybuje se ve stejných hodnotách jako korelace referenčního signálu s pilou. Bohužel spektra těchto dvou signálů jsou poměrně podobná a tímto způsobem lepších výsledků nedosáhneme, ovšem výsledky jsou pořád lepší jak u korelace křížové a zároveň se jen jedná o simulaci, v reálném prostředí může být realita jiná. A korelace referenčního signálu se signálem helikoptéry vychází okolo 0,5.

Druhý graf (obrázek 40 - Hluková hladina), je zobrazení zvukové hladiny v čase pro dané signály. Zelená čára zobrazuje zvukovou hladinu 80 dB. Všechny tři typy signálu jsou poměrně hlasité a hladinu překročí.

Poslední graf (obrázek 39 – Poplachový výstup) simuluje odesílání SMS, kdy při překročení nastaveného prahu, korelační koeficient větší jak 0,75 a zároveň zvuková hladina přesáhla 80 dB dojde ke změně signálu z 0 na 1. V aktuálním případě dochází k poplachu velmi často, z důvodu vysoké korelační hodnoty referenčního signálu s traktorem a nevhodně nastaveném prahu.

Další možnosti úpravy Pearsonovi korelace je stejně jako u korelace křížové použít vstupní hodnoty ve voltech. Tato úprava je zobrazena na obrázku 41. Stejně jako v předchozím případě se jedná o tři grafy nad sebou. V prvním vývoj korelačního koeficientu v čase. Druhý je hluková a poslední Poplachový výstup.



Obrázek 41 Grafy srovnávají Pearsonovu korelaci pro různé signály jejich hluková hladina a poplachová zpráva, vstupní data ve voltech [vlastní]

Při použití Pearsonovi korelace a vstupních hodnot ve voltech je simulační situace o něco příznivější. Korelační koeficient pro korelaci referenčního signálu s pilou vychází kolem 0,8. Korelace referenčního signálu a traktoru vychází o něco lépe, než v přechodném případě hodnota koeficientu se pohybuje v rozmezí 0,4 až 0,65. Korelace referenčního signálu a helikoptéry vychází kolem 0,3.

Hladinu zvuku 80 dB stejně jako v předchozích případech překročí všechny tři signály, a z poplachového výstupu je zřejmé že k odeslání SMS neodchozí tak často při nastavených prahových hodnotách korelační koeficient C je 0,75 a hladina zvuku 80 dB.

Tabulka 2 Porovnání korelačních koeficientu pro různé typy korelace [vlastní]

	Xcorr [V]	Pearson[dBV]	Pearson [V]
REF-Pila	0,18	0,85	0,8
REF-Traktor	0,1	0,8	0,6
REF-Helikoptéra	0,1	0,6	0,3

Na základě těchto výsledků do finálního programu byla použita Pearsonova korelace, v obou provedeníh.

5.2 Program pro Arduino UNO R4

Program pro Arduino má strukturu, která byla již nastíněna v úvodním odstavci kapitoly 5. Zde budou jednotlivé části popsány více do detailu. Program byl napsán v Arduino IDE verzi 2.3.3. K tvorbě programu bylo použito několik knihoven, které si popíšeme níže.

5.2.1 Použité knihovny

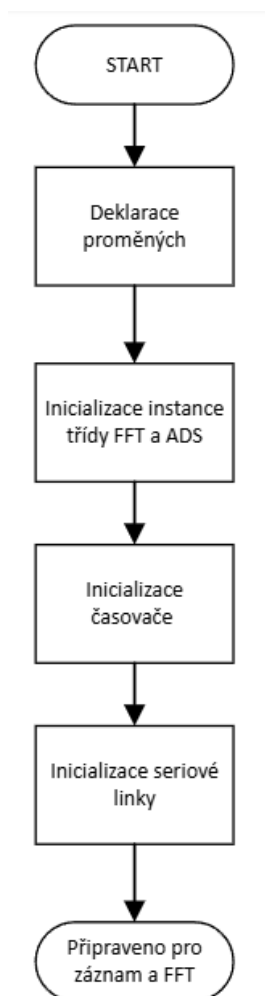
Všechny použité knihovny jsou volně dostupné na internetu, instalace probíhá buď to pomocí library manager nebo include library. Ke všem knihovnám se také dá najít jejich popis a ukázkové příklady.

- Wire.h – slouží pro komunikaci po sběrnici I2C
- LiquidCrystal_I2C.h – slouží pro práci s LCD displejem se sběrnici I2C
- SPI.h – slouží pro komunikaci s modulem ADS1256
- arduinoFFT – knihovna pro práci s FFT
- FspTimer.h – knihovna pro práci s časovači

Dále byla ještě použita knihovna pro ADS1256, ovšem nebyla přidána jako `#include`, ale pouze z ní byly využity některé funkce potřebné pro správnou komunikaci s A/D převodníkem.

5.2.2 Algoritmus programu

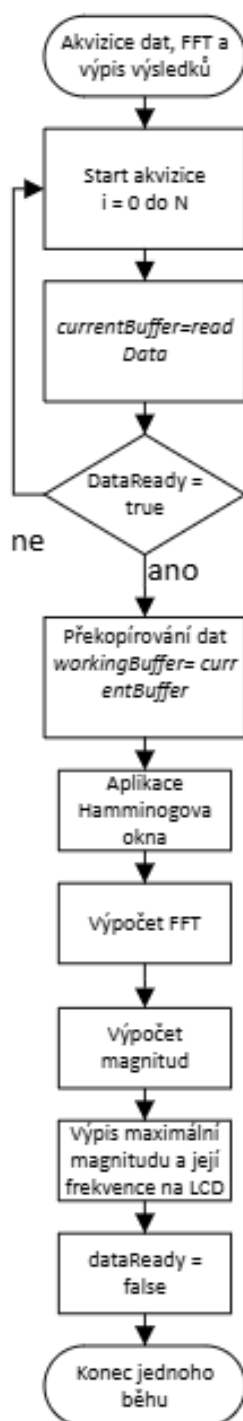
Na začátku programu dojde k deklaraci potřebných proměnných a inicializaci instancí A/D převodníku a FFT. Následně dojde k inicializaci časovače, který se stará o pravidelné odebírání vzorků. A v poslední řadě je inicializována sériová linka pro výpis na displej.



Obrázek 42 Vývojový diagram preprocesingu [vlastní]

V deklaraci proměnných probíhá nastavení parametrů potřebných pro FFT, a to počtu vzorků $N = 512$ a nastavení vzorkovací frekvence na $F_s = 22050$ Hz. Dále jsou deklarovány parametry potřebné pro funkci A/D převodníku a vektory pro ukládání dat z jednotlivých akvizic. Dále jsou deklarovány pomocné proměnné pro výpočty korelací.

Když je vše deklarováno a inicializováno dochází k akvizici dat, a to pomocí přerušení a časovače.



Obrázek 43 Vývojový diagram jednoho běhu, akvizice a výpočet FFT [vlastní]

Na obrázku 43 je vývojový diagram jednoho běhu akvizice s výpočtem FFT, v reálném programu tenhle proces probíhá pořád dokola. Při spuštění programu začne akvizice dat, která probíhá v přerušení, tak aby časový úsek mezi vzorky byl vždy stejný a byla data

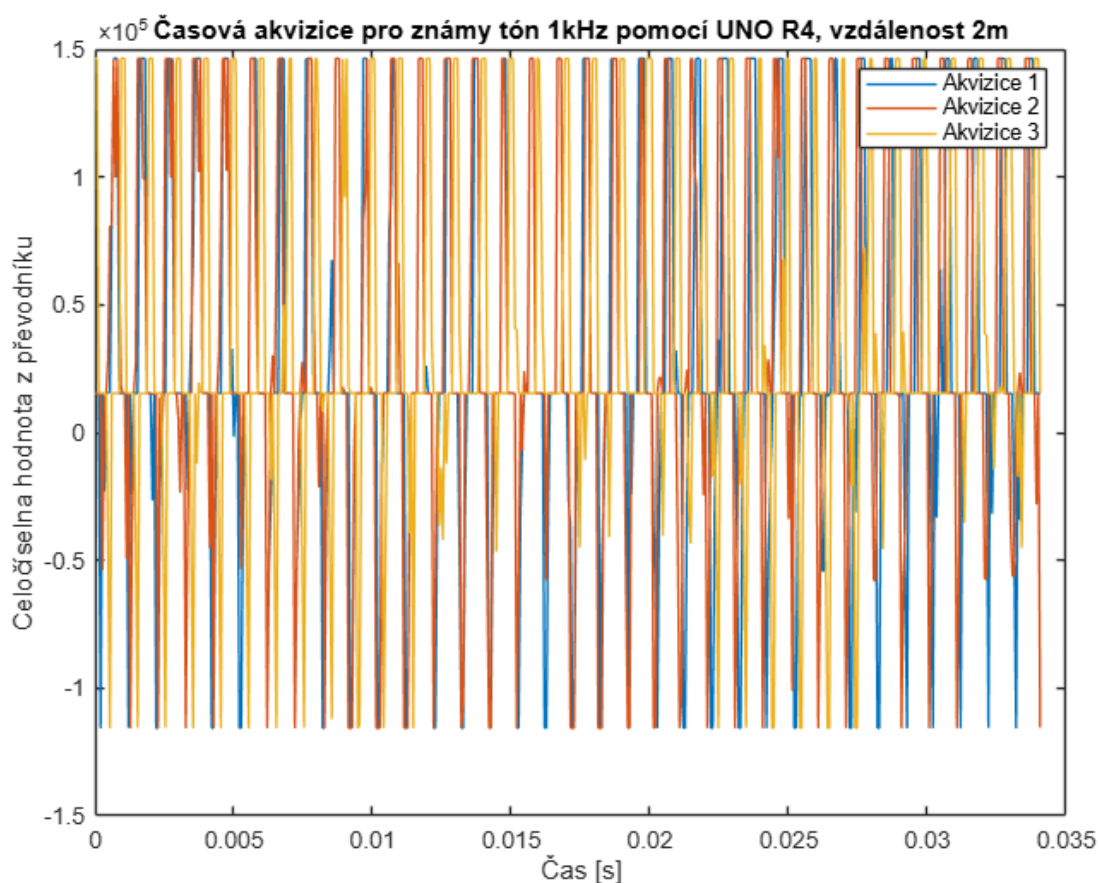
použitelná pro výpočet FFT. Funkce, který akvizici zajišťuje se jmenuje *timer_callback*, kdy v téhle funkci jsou přímo čtena data z A/D převodníku a ukládána do vektoru *currentBuffer*. Funkce běží pořád dokola až do doby, než dojde k naplnění vektoru 512 vzorky. V ten okamžik se proměnná *dataReady* nastaví do jedničky a program skočí do hlavní smyčky *loop* kde se zakáže přerušování, následně se překopírují data do vektoru *workingBuffer*, přerušování se zase povolí. A připraví se data pro výpočet FFT. Zákaz přerušování je tam z důvodu, aby při kopírování dat nedošlo k jejich nahodilému přepisu. Jsou-li data připravena pro FFT, aplikuje se na ně Hammingovo okno, dojde k výpočtu spektra a uloží se do proměnné *RealIn*. Dalším krokem je výpočet magnitud, frekvencí, přepočet spektra na dBV a výpočet akustické hladiny v dB. Ve spektru jsou nalezeny maximální hodnoty amplituda, příslušná frekvence, na které se nachází a tyto hodnoty jsou vypsány na displeji. Dále na displej probíhá výpis akustické hladiny signálu v dBa.

Další částí programu je výpočet korelačního koeficientu, k tomu slouží funkce *calculateCorrelation*, v programu je využita Pearsonova korelace. Vstupem funkce jsou dva vektory, a to náš referenční signál *REF1* a vektor *H_kore*, ve které se nachází výsledky FFT analýzy, třetím vstupním parametrem funkce je délka vektorů. Výsledek funkce je uložen do proměnné *correlationValue*, dále je tato hodnota porovnávána s hodnotou nastavenou v proměnné *CORRELATION_THRESHOLD*, což je námi definovaná hodnota odhadnutá z prvotních testů. Aktuálně je nastavena na 0.4. Dále se tam nachází jednoduchý *if* podmínka, která testuje, zda byla překročena prahová hodnota *CORRELATION_THRESHOLD* a zda zároveň je akustická hladina větší jak 90 dBa. Když je tato podmínka splněna, nastaví se digitální D4 na HIGH, to se přečte na UNO R3, ke kterému je připojená GSM modul SIM900 a odešle se SMS.

Aby se tohle mohlo stát bylo potřeba vybrat vhodnou SIM kartu pro GSM modul SIM900. Po průzkumu trhu byla zvolena SIM karta O2 Machine, která je přesně dělána právě do těchto aplikací.

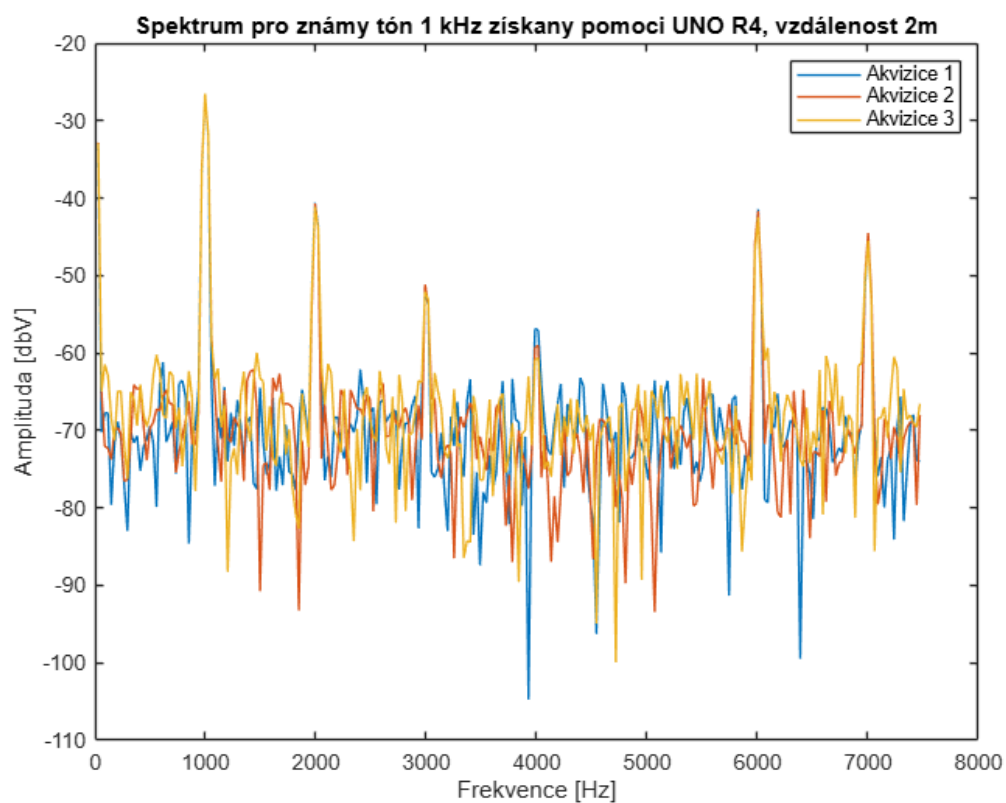
6 TESTOVÁNÍ

V této kapitole je popsáno testování již zhotovené elektronické krabice. Než proběhlo testování na otevřeném stanovišti a v lese, proběhli prvotní testy u uzavřené místnosti u počítače. Prvotní testy ani neprobíhali pro detekci pily, ale známých signálů generovaných pomocí Online Tone Generator [27]. Zde byla nastavena frekvence 1 kHz a pro bylo testováno, zda zařízení správně detekuje výrazné složky signálu.

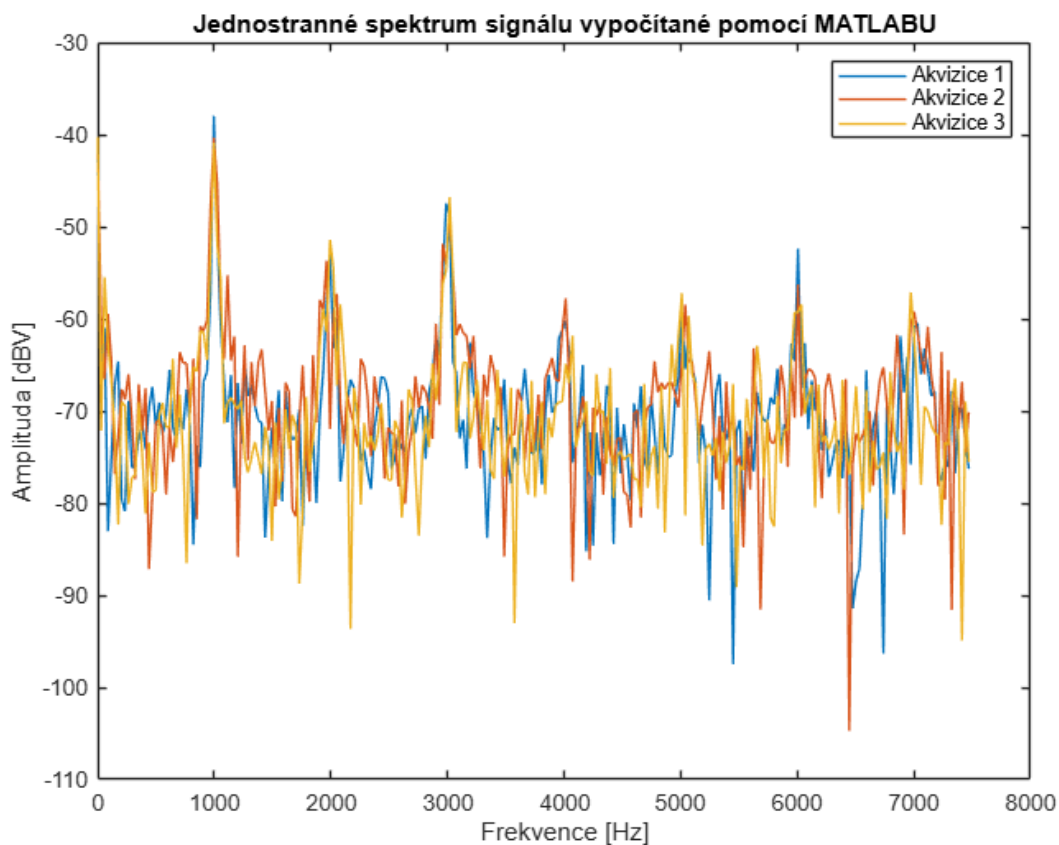


Obrázek 44 Graf akvizic v časové oblasti pro signál 1 kHz e vzdálenosti 2 m [vlastní]

Na obrázku 44 se nachází graf, ve kterém jsou vidět 3 akvizice z UNO R4, kdy byl do mikrofону pouštěn ton o frekvenci 1 kHz a následně byly přeneseny pomocí sériové linky do počítače a vykresleny v programu MATLAB.



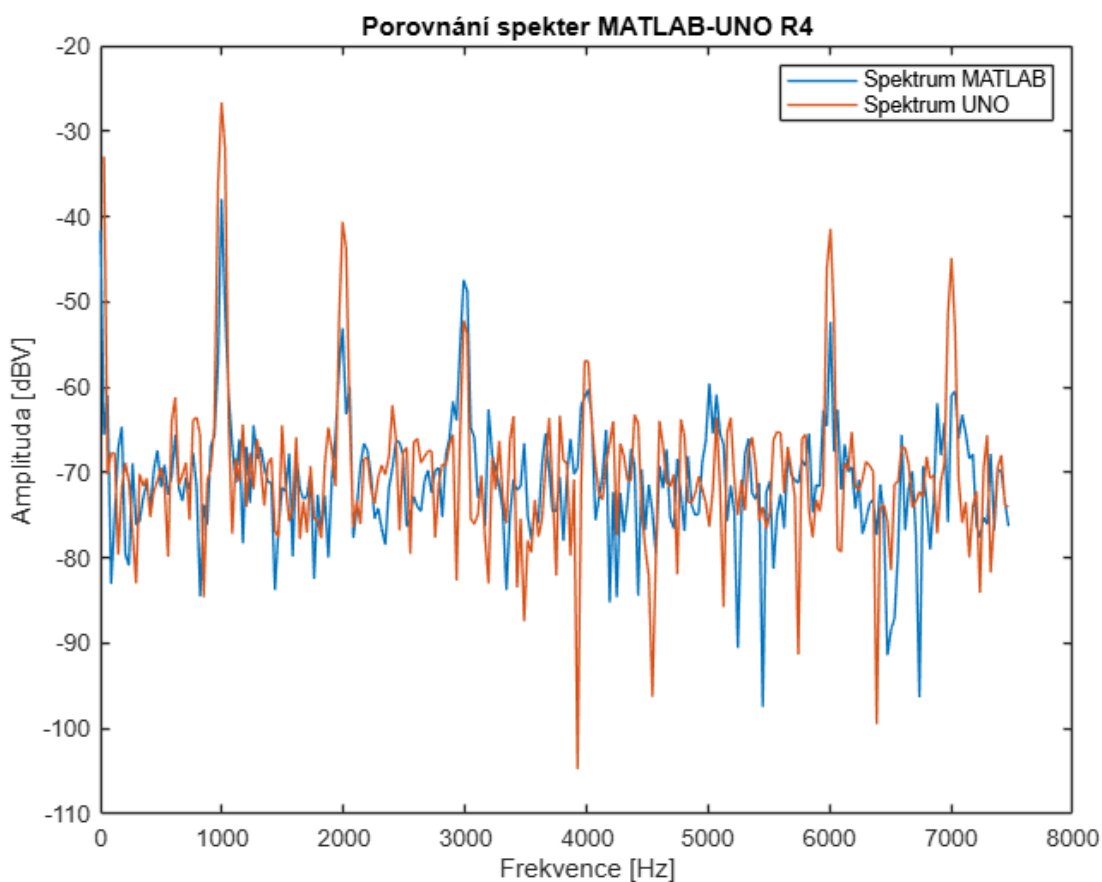
Obrázek 45 Graf vypočítaných frekvenčních spekter pomocí UNO R4 [vlastní]



Obrázek 46 Graf vypočítaných frekvenčních spekter pomocí MATLABU [vlastní]

Na obrázcích 45 a 46 jsou již vypočítaná frekvenční spektra ze získaných tří akvizic, v prvním případě se jedná o spektra vypočítané pomocí programu v UNO R4, následně pak byly pomocí sériové linky přeneseny do PC a vykresleny v softwaru MATLAB.

Na druhém obrázku (obrázek 46) jsou frekvenční spektra vypočítané přímo v programu MATLAB pro stejné tři akvizice. Již z porovnání je patrné, že spektra jsou podobná, což značí správnost funkce programu v UNO R4. Pro lepší představivost jsou následně spektra jedné akvizice porovnány na obrázku 47.



Obrázek 47 Porovnání získaných spekter MATLAB vs UNO R4 [vlastní]

Z obrázku 47 je ještě lépe viditelné, že největší špička se nachází na frekvenci 1000 Hz, tím jsme si ověřili funkčnost zařízení, že správně zaznamenává akustický signál a správně probíhá i jeho vyhodnocení.

6.1 Testování na otevřeném stanovišti a v lese

Pro testování v reálných podmínkách, nejprve na volném stanovišti, v mém případě na louce a následně v reálných lesních podmínkách bylo nejprve potřeba změřit zvukové hladiny motorové pily na krajích hlídané zóny, testy probíhali na ploše o velikosti 50x50m. Zvukové hladiny byly měřeny pomocí hlukoměru. Zařízení bylo umístěno uprostřed a hodnoty akustických hladin pro pilu jsou v tabulce níže.

Tabulka 3 Tabulka závislosti akustické hladiny na vzdálenosti [vlastní]

Vzdálenost [m]	Akustický hladina [dBa]
2	92
7	86
15	84
25	78

Akustický hladina pro vzdálenost 25 m byla následně použita v programu jako jedna z hodnotících kritérií pro určení nelegální těžby dřeva, druhé kritérium je korelační koeficient, který byl nastaven na 0,4. Když se oba z těchto parametrů zároveň překročili, došlo k vyhodnocení, že probíhá nelegální těžba dřeva.



Obrázek 48 Krabice s elektronikou, dole vyvedený mikrofon [vlastní]



Obrázek 49 Testování na louce [vlastní]



Obrázek 50 Testování v lese [vlastní]

Testy nejprve proběhli na louce (obrázek 49) a potom v lese (obrázek 50), testování v obou případech probíhalo bez posílání SMS, a to z časových důvodů, ovšem GSM modul byl otestován v umělých podmínkách, posílání SMS je funkční, v kódu je zahrnuto.

Pro oba případy došlo k testování, kdy zdroj zvuku, motorová pila, byla v chodu v různých vzdálenostech od zařízení a byly sledovány hodnoty vypisující se na LCD displeji. Korelační koeficient se pro vzdálenosti od 5 do 25 metrů pohyboval v rozmezí 0,55 až 0,4. Čili vždy k překročení stanoveného thresholdu a bylo správně vyhodnocena neoprávněná těžba výpisem na LCD. Když byla nebyla nastartována a bylo ticho zvuková hladina v lese se pohybovala okolo 40 dBa a korelační koeficient byl velmi malý, menší jak 0.1.

Ovšem při hlasitých zvucích jako třeba traktor či hlasité mluvení, docházelo k chybnému vyhodnocení, což nám potvrdilo testy z MATLABU. Toto může být způsobeno několika faktory, jedním z nich je že kmitočtový krok 43,06 Hz (pro $N = 512$ a $F_s = 22050$ Hz) je poměrně velký, bohužel jsme byly omezeni hardwarem, kdy UNU R4 již nestačila paměť pro větší počet vzorků i vzorkovací frekvence byla hraniční, se zvýšením již nestačil ani výpočetní výkon, a celé vyhodnocení při zvýšení vzorkovací frekvence trvalo stovky milisekund, což by způsobilo vynechání několika akvizic. Druhým faktorem je že například u traktoru se ve spektru objevují podobné složky a pro jejich eliminaci by bylo složitější rozhodovací funkci, kdy bychom třeba brali b potaz několik faktorů dohromady jako například Pearsonovu korelaci zároveň s křížovou korelací a dalšími parametry. Z časových důvodů však již nebylo možné tohle doladit. Nicméně zařízení je tedy částečně funkční a hlavní cíl byl splněn, a to je detekce motorové pily.

7 EKONOMICKÉ A TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole je zhodnocen výsledné zařízení, a to jak z technické stránky, tak i z ekonomické.

Tabulka 4 cena jednotlivých součástí [vlastní]

Název	Cena [Kč]
Arduino UNO R4 Minima	526
Arduino UNO R3, ATmega328P	158
ADS1256 ADC převodník 24-bit 30KHz	552
Mikrofon modul MAX4466	49
LED display 16×2 + pájený I2C modul	97
SIM 900 GPRS/GSM shield	399
Klávesnice 16 tlačítek - 4 x 4	19
Propjovací kabely	35
Elektroinstalční krabice	250
Univerzální plošný spoj - 30 x 70 mm	17
50x70mm oboustranná PCB prototypová deska	18
Elektronické součástky(rezistory, kondenzátory,...)	30
Celkem	2150

Z tabulky 4 vyplývá, že celkové náklady dosáhly 2150 Kč, což je vzhledem k povaze projektu poměrně nízká částka. Na trhu se obdobná zařízení prakticky nevyskytují, a proto je obtížné provést přímé srovnání. Pokud však vezmeme v úvahu, jak dlouho trvá než les doroste, a jakou hodnotu má jeho ochrana, považují tuto cenu za velmi příznivou a dobře odůvodněnou investici.

Z technického hlediska je zařízení částečně funkční, při časových možnostech a omezení hardwaru si myslím, že výsledky, kterých jsme dosáhli pro zvolené maximální možné nastavení ($N = 512$, $F_s = 22050$ Hz), jsou celkem dobré. Díky návrhu vlastního zesilovacího obvodu pro mikrofon jsme dosáhli velmi nízkých šumových hladin ± 10 mV (20 mV peak-to-peak), šumové hladiny při měření osciloskopem při puštění známém tonu byly okolo -70 dBV, zatímco špička signálu se pohybovala okolo -30 dBV, z toho vyplývá že jsme dosáhli poměrně dobré dynamiky. Celé zařízení je navrženo tak aby odolávalo vnějším vlivům počasí a nemohlo dojít k nahodilému styku s elektronikou. Ovšem jak jsem zmiňoval v předešlé kapitole 6.1, zařízení správně reaguje a vyhodnocuje motorovou pilu až na 25 m, tak i bohužel nesprávně reaguje na obdobné hlasité signály.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala návrhem a realizací systému pro zabezpečení lesního porostu proti neoprávněné těžbě dřeva pomocí mikropočítačové platformy Arduino. Cílem bylo navrhnout jednoduché, cenově dostupné a energeticky nenáročné zařízení, které bude schopné akusticky detekovat zvukové projevy nelegální těžby, provoz motorové pily, a odeslat upozornění prostřednictvím GSM sítě na mobilní telefon.

V první části práce byla nejprve zpracována nezbytná teorie, která poskytla nezbytné poznatky z oblasti akustiky, frekvenční analýzy signálů, typologie mikrofónů a možností mikropočítačových systémů Arduino a popis použitého softwaru, bez kterého by se to neobešlo.

V druhé části práce, tedy té praktické, se pojednává o hardwarovém a softwarovém provedení celého zařízení. Dále zde jsou popsány získané výsledky a ekonomické a technické zhodnocení. V první zmíněné části jsou popsány jednotlivé použité komponenty a celkové zpracování zařízení, elektroinstalační krabice. Je zde také popsáno propojení jednotlivých modulů a celkové zapojení. Dále jsou zde popsána šumová měření, jejich vyhodnocení a následný návrh a zhotovení nového zapojení zesilovače pro mikrofón. Toto bylo potřeba udělat z důvodu že šumové hladiny na mikrofónu, v tichosti dosahovali příliš velkých hodnot až 100 mV peak-to-peak, což pro účely záznamu zvuku a jeho vyhodnocení mohlo způsobovat nepřesnost. Ve vlastním zapojení byly dosaženy nízké šumové hladiny a to 20 mV peak-to-peak pro zesílení $G = 10$. Dále byla provedena analýza audio signálu motorové pily v programu MATLAB, pomocí této analýzy byly získány informace o frekvenčním spektru motorové pily, na jehož základě byla určena vzorkovací frekvence a počet vzorků pro FFT. Dále proběhla korelační analýza, na jejíchž základě byl vybrán vhodný způsob korelace do výsledného programu pro UNO R4. Část testování v MATLABU zabrala velkou podstatnou část času, aby byly získány přesné informace o audio signálu motorové pily.

Další část se zabývá návrhem programu pro UNO R4. V této části je popsána činnost samotného zařízení, algoritmus běhu programu a knihovny vyžité k jeho funkci. Testování a ladění zabralo, taky poměrně hodně času, a to hlavně z důvodu že UNO R4 je poměrně nová vývojová deska a její podpora zatím není tak velká jako u jeho předchůdce UNO R3, takže bylo potřeba postupovat pomalu a testovat každou část samostatně.

Poslední částí je testování výsledného zařízení, kdy nejprve proběhli jen prvotní testy v uzavřené místnosti, detekce tónu o frekvenci 1 kHz, a až když byla ověřena správná funkčnost na tomhle, došlo k testům na otevřeném stanovišti a následně v reálných lesních podmínkách. Z důvodu časové nouze testování probíhalo bez GSM modulu, ten byl otestován zvlášť v simulačních podmínkách, kdy byla ověřena jeho funkčnost. Testování v lese bylo vymezeno na plochu 50x50 m, kdy zařízení bylo uprostřed, detekci byly proběhla správně až na vzdálenost 25 m (hranice vymezeného prostoru), čili až na tuto vzdálenost byl překročen nastavený práh korelačního koeficientu, a v případě kdy byl připojený GSM modul by došlo k odeslání SMS. Problém nastal, když zněl jiný výrazný hlasitý signál, kdy i v tomto případě docházelo k překročení korelačního prahu, existuje více možností, proč tomu tak bylo, ty jsou popsány podrobněji v kapitole 6.1. Výstupem práce je tedy částečně funkční zařízení, které v budoucnu může být dále laděno například lepším systémem vyhodnocení korelace.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02460-1. [citováno 2025-03-14].
- [2] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace (Měření a hodnocení)*. Sdělovací technika, 2008. ISBN 8090193625. [citováno 2025-03-14].
- [3] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. Praha: Prometheus, 2003, ISBN 80-7196-264-3. [citováno 2025-03-14].
- [4] ŠÍŘENÍ ZVUKU. Eduportál Techmania [online]. Plzeň: Techmania Science Center, 2007 [citováno 2025-03-14]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/akustika/sireni-zvuku>
- [5] VAŠINA, Martin. 2. Akustika, základní pojmy a veličiny v akustice. Online. In: . S. 15. Dostupné z: . [citováno 2025-03-23].
- [6] VAŠINA, Martin. 2. Akustika, základní pojmy a veličiny v akustice. Online. In: . S. 15. Dostupné z: https://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_03.pdf. [citováno 2025-03-23].
- [7] KRÁLOVÁ, Magda. ZÁKLADY FYZIOLOGICKÉ AKUSTIKY. Eduportál Techmania [online]. Plzeň: Techmania Science Center, 2007 [citováno 2025-03-23]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/akustika/zaklady-fyziologicke-akustiky>
- [8] JANČA, Radek. Základy zpracování signálů, Fourierova transformace [přednáška]. In: YouTube [online]. Praha: FEL ČVUT v Praze, 27. září 2021. [citováno 2025-04-21]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=TDFMIaWAgEA&t=2724s>
- [9] *Mikrofony*. Online. Encyklopedie fyziky. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/377-mikrofony>. [citováno 2025-04-14].
- [10] KONSTRUKCE MIKROFONŮ. Online. ELEKTROAKUSTIKA. Dostupné z: https://www.elektroakustika.cz/types_microphones.html. [citováno 2025-04-14].
- [11] *Analýza signálů ve frekvenční oblasti*. Online. Katedra informatiky a výpočetní techniky. Dostupné z: https://www.kiv.zcu.cz/~mautner/Azs/Azs5_Fourierova_transformace.pdf. [citováno 2025-04-21].

- [12] VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*. Vydání druhé. Bučovice: Martin Stříž, 2017. ISBN 978-80-87106-93-8. [citováno 2025-03-14].
- [13] *Arduino*. Online. What is arduino? Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. [citováno 2025-03-14].
- [14] VODA, Zbyšek. Seznámení s Arduinem. Online. 2014. Dostupné z: <https://bastlirna.hwkitcheen.cz/seznameni-s-arduinem/>. [citováno 2025-03-14].
- [15] *Arduino*. Online. Arduino. Dostupné z: <https://docs.arduino.cc/software/ide/>. [citováno 2025-03-17].
- [16] MALÝ, Martin (2010). Arduino: jak pro něj začít programovat. Online. *Root*. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/arduino-jak-pro-nej-zacit-programovat/>. [citováno 2025-03-17].
- [17] *What's the difference between UNO R3 and UNO R4 boards?* Online. Arduino. Dostupné z: <https://support.arduino.cc/hc/en-us/articles/9350551575964-What-s-the-difference-between-UNO-R3-and-UNO-R4-boards>. [citováno 2025-03-24].
- [18] PINKER, Jiří. *Mikroprocesory a mikropočítače*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-110-1. [citováno 2025-03-14].
- [19] HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C*. 1. díl. 6. vyd. České Budějovice: Kopp, 2010. ISBN 978-80-7232-383-8. [citováno 2025-03-14].
- [20] FLAJZAR, Tomáš. *GSM alarm: přenos poplachu na mobilní telefon : kompletní stavební návod GSM pageru včetně zdrojového programu*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-183-7. [citováno 2025-03-14].
- [21] REJČÍŘÍK, Alexandr. *SMS: střežení a ovládání objektů pomocí mobilu a SMS : GSM pagery a alarmy : princip použití, návody, příklady*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-082-2. [citováno 2025-03-14].
- [22] PIXABAY. Pixabay – Bezplatné obrázky a videa [online]. [citováno 2025-05-10]. Dostupné z: <https://pixabay.com/>
- [23] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *SMS: střežení a ovládání objektů pomocí mobilu a SMS : GSM pagery a alarmy : princip použití, návody, příklady*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-082-2. [citováno 2025-05-10].

- [24] FLAJZAR, Tomáš. GSM alarm: přenos poplachu na mobilní telefon : kompletní stavební návod GSM pageru včetně zdrojového programu. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-183-7. [citováno 2025-05-10].
- [25] KLÍČ, Alois; VOLKA, Karel a DUBCOVÁ, Miroslava. Fourierova transformace. Online. 3. 2002. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/mat/Pavel.Pokorny/students/ft/skripta/Four.pdf>. [citováno 2025-05-10].
- [26] (Vzájemná) Korelace , Cross Correlation. Online. S. 9. Dostupné z: http://vision.uamt.feec.vutbr.cz/ZVS/lectures/01_convolutionn.pdf. [citováno 2025-05-12].
- [27] *Online Tone Generator*. Online. Dostupné z: <https://onlinetonegenerator.com>. [citováno 2025-05-25].
- [28] VOJÁČEK, Antonín. MEMS mikrofony – obecný popis struktury a funkce. Online. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mems-mikrofony-obecny-popis-struktury-a-funkce>. [citováno 2025-05-20].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Šíření rovinné vlny na měřicí plochu S [5]	16
Obrázek 2 Akustický tlak a přepočet na jeho hladinu [5]	18
Obrázek 3 Přepočet akustického výkonu a jeho hladiny [6]	20
Obrázek 4 Dělení signálů [vlastní]	23
Obrázek 5 Převod signálu do frekvenčního spektra pomocí FR [11]	25
Obrázek 6 Převod signálu do frekvenčního spektra pomocí FT [11]	26
Obrázek 7 Převod signálu do frekvenčního spektra pomocí DTFT [11]	27
Obrázek 8 Signál a jeho frekvenční spektrum získané pomocí DFT [11]	28
Obrázek 9 Příklad FFT analýzy signálu [vlastní]	29
Obrázek 10 Arduino Mini [14]	32
Obrázek 11 Arduino Nano [14]	32
Obrázek 12 Arduino Micro [14]	33
Obrázek 13 Arduino UNO R3 [14]	34
Obrázek 14 Arduino Mega2560 [14]	35
Obrázek 15 Vývojové prostředí Arduino IDE [vlastní]	37
Obrázek 16 Popis prostředí Arduino IDE [vlastní]	38
Obrázek 17 Krabice s elektronikou [vlastní]	42
Obrázek 18 Blokové schéma zapojení	43
Obrázek 19 Schéma propojení UNO R4 a ADS1256	44
Obrázek 20 Vývojová deska UNO R4 Minima [vlastní]	46
Obrázek 21 Arduino UNO R3 [vlastní]	46
Obrázek 22 GPRS GSM Shield SIM900 [vlastní]	47
Obrázek 23 ADS1256 [vlastní]	48
Obrázek 24 MAX4466 [vlastní]	49
Obrázek 25 Šum na MAX4466 [vlastní]	49
Obrázek 26 Schéma zapojení invertujícího zesilovače [vlastní]	50
Obrázek 27 Šum na mikrofону s vlastním zesilovačem [vlastní]	50
Obrázek 28 FFT pomocí osciloskopu, referenční zvuk tón o 1 kHz [vlastní]	51
Obrázek 29 LCD I2C 16x2 [vlastní]	52
Obrázek 30 Schéma napájecího obvodu [vlastní]	53
Obrázek 31 Napájecí obvod [vlastní]	53
Obrázek 32 Vývojový diagram programu [vlastní]	54
Obrázek 33 Průběh audio signálu motorové pily v čase [vlastní]	55
Obrázek 34 Průběh signálu motorové pily ve frekvenčním spektru [vlastní]	56

Obrázek 35 3D Spektrogram signálu motorové pily [vlastní]	56
Obrázek 36 2D Spektrogram signálu motorové pily [vlastní]	57
Obrázek 37 Graf příkladu korelace [vlastní]	58
Obrázek 38 Korelace výkonových spekter vybraných signálů [vlastní]	59
Obrázek 39 Grafy srovnávající korelaci pro různé signály jejich hluková hladina a poplachová zpráva [vlastní]	60
Obrázek 40 Grafy srovnávající Pearsonovu korelaci pro různé signály jejich hluková hladina a poplachová zpráva, vstupní data frekvenční spektra [vlastní]	62
Obrázek 41 Grafy srovnávající Pearsonovu korelaci pro různé signály jejich hluková hladina a poplachová zpráva, vstupní data ve voltech [vlastní]	64
Obrázek 42 Vývojový diagram preprocesingu [vlastní]	66
Obrázek 43 Vývojový diagram jednoho běhu, akvizice a výpočet FFT [vlastní]	67
Obrázek 44 Graf akvizic v časové oblasti pro signál 1 kHz e vzdálenosti 2 m [vlastní]	70
Obrázek 45 Graf vypočítaných frekvenčních spekter pomocí UNO R4 [vlastní]	71
Obrázek 46 Graf vypočítaných frekvenčních spekter pomocí MATLABU [vlastní]	71
Obrázek 47 Porovnání získaných spekter MATLAB vs UNO R4 [vlastní]	72
Obrázek 48 Krabice s elektronikou, dole vyvedený mikrofon [vlastní]	73
Obrázek 49 Testování na louce [vlastní]	74
Obrázek 50 Testování v lese [vlastní]	74

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Srovnání vybraných desek Arduino [vlastní]	36
Tabulka 2 Porovnání korelačních koeficientu pro různé typy korelace [vlastní]	65
Tabulka 3 Tabulka závislosti akustické hladiny na vzdálenosti [vlastní]	73
Tabulka 4 cena jednotlivých součástí [vlastní]	76

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

V	Volt
mV	Milivolt
dB	Decibel
dBV	Decibel na volt
p	Akustický tlak
p _b	Barometrický tlak
Pa	Pascal
μPa	Mikropascal
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
°C	Stupeň Celsia
m/s	metr za sekundu
f	Frekvence
m	metr
P	Akustický výkon
W	Watt
p ₀	Amplituda akustického tlaku
W/m ²	Watt na metr čtvereční
S	Plocha
F	Síla
v	Rychlost
T	Perioda
I	Akustická intenzita
p _{ef}	Efektivní hodnota akustického tlaku
v _{ef}	Efektivní hodnota akustické rychlosti

L_p	Hladina akustického tlaku
L_w	Hladina akustického výkonu
W_0	Refereční hodnota akustického výkonu
L_I	Hladina akustické intenzity
I_0	Referenční hodnota akustické intenzity
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
DSP	Digitální zpracování singálů
FŘ	Fourierovy řady
FR	Obecná Fourierova transformace
DTFT	Diskrétní časová Fourierova transformace
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
FFT	Rychlá Fourierova transformace
f_s	Vzorkovací frekvence
N	Počet vzorků
SDA	Serial data
SCL	Serial clock
USB	Universal serial bus
IoT	Internet of things
G	Zesílení

SEZNAM PŘÍLOH