

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky



Bezdrátový systém na monitorování hluku a predikci ekvivalentní hladiny akustického tlaku

Diplomová práce

Bc. Jan Toman

Magisterský program: Komunikace, Multimédia a elektronika
Studijní obor: Multimediální technika
Vedoucí práce: Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.

Praha, květen 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Toman** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **406119**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Multimediální technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Bezdrátový systém na monitorování hluku a predikci ekvivalentní hladiny akustického tlaku

Název diplomové práce anglicky:

Wireless System for Noise Monitoring and Equivalent Sound Pressure Level Prediction.

Pokyny pro vypracování:

Podějte přehled hardwarových možností snímání a zpracování zvuku pomocí vhodné embedded platformy. Navrhněte a experimentálně ověřte síť bezdrátových, spolupracujících, cenově dostupných kalibrovaných snímačů, která bude sloužit k predikci ekvivalentní hladiny akustického tlaku.

Seznam doporučené literatury:

- [1] J. Merhaut a kol. Příručka elektroakustiky. Státní nakladatelství technické literatury. Praha, 1964.
- [2] O. Jiříček. Úvod do akustiky. Vydavatelství ČVUT. Praha, 20 02.
- [3] K. Sotirakopoulos, R. Barham, B. Piper. Designing and evaluating the performance of a wireless sensor network for environmental noise monitoring applications. EuroRegio2016, June 13-15, Porto, Portugal

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Stanislav Vítek, Ph.D., 13137

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **27.09.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **09.01.2018**

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2018/2019

Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Dne 25. května 2018 v Praze

.....
Jan Toman

Poděkování

Děkuji panu Ing. Stanislavovi Vítkovi, Ph.D. za věcné připomínky, cenné rady, trpělivost a vstřícnost při konzultacích během zpracovávání této diplomové práce.

Obsah

Prohlášení	iii
Poděkování	iv
Abstrakt	vii
Abstract	viii
Seznam používaných zkratk	ix
Úvod	1
1 Měření hluku	2
1.1 Měřené veličiny	2
1.1.1 Hladina akustického tlaku	2
1.1.2 Vážená hladina akustického tlaku	3
1.1.3 Ekvivalentní hladina akustického tlaku	3
1.1.4 Hladina expozice zvuku	3
1.2 Hygienické limity	5
1.3 Zvukoměr	6
1.4 Monitorovací stanice	8
2 Bezdrátová komunikace	10
2.1 Bezdrátové sítě krátkého dosahu	10
2.2 LPWAN	14
2.2.1 SigFox	15
2.2.2 LoRa	19
2.2.3 NB-IoT	22
2.2.4 Alternativy	24
2.2.5 Shrnutí	24
3 Vestavěný systém	26
3.1 BeagleBoard	27
3.2 Raspberry Pi	28
3.3 Arduino	30
3.4 Pycom	33
3.5 Alternativy	34
3.6 Možnosti snímání zvuku	36
3.7 Shrnutí	38

4	Predikce dat	40
4.1	Časová řada	40
4.2	Predikční metody	42
4.2.1	Naivní model	42
4.2.2	Aritmetický průměr	42
4.2.3	Klouzavý průměr	43
4.2.4	ARIMA	43
4.2.5	Posuzování kvality predikce	45
4.3	Predikce ekvivalentní hladiny akustického tlaku	46
5	Návrh systému	47
5.1	Senzor	47
5.1.1	Snímání dat	48
5.1.2	Zpracování dat	50
5.1.3	Kalibrace	51
5.2	Komunikace	61
5.3	Predikční algoritmus	63
5.3.1	Adaptivní ARIMA	63
6	Testování systému	65
6.1	SoundFox	65
6.2	Charakter naměřených dat	70
6.3	Vyhodnocení predikčního algoritmu	72
	Závěr	75
	Seznam tabulek	77
	Seznam obrázků	78
	Příloha A - Struktura datového nosiče	80
	Příloha B - Implementace	81
	Literatura	86

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá systémem pro měření hluku a predikcí ekvivalentní hladiny akustického tlaku pomocí sítě cenově dostupných zkalibrovaných bezdrátových senzorů. Cílem práce je návrh a experimentální ověření celého systému, který je schopný v reálném čase snímat hladinu hluku, bezdrátově přenášet data a provádět predikci ekvivalentní hladiny hluku za určitý čas. Jednotlivé senzory jsou sestavené z levných jednodeskových počítačů Raspberry Pi Zero W, které ke komunikaci s řídicím počítačem Raspberry Pi 2 využívají LPWAN bezdrátovou technologii Sigfox. Predikce dat je docílena pomocí adaptivního modelu ARIMA.

Keywords: Internet věcí, měření hluku, ekvivalentní hladina akustického tlaku, Sigfox, Raspberry Pi, predikce dat, Python, vestavěný počítač, časová řada, LPWAN, ARIMA

Abstract

This master thesis deals with noise monitoring system and prediction of equivalent continuous sound level using low-cost calibrated wireless sensors. The aim of the thesis is to design and experimentally verify the whole system, which is capable of real-time noise measurement, wireless communication and prediction of the equivalent continuous sound level for a specific period of time. Sensors are based on low cost single-board computers Raspberry Pi Zero W, which are using the LPWAN Sigfox technology for communication with the main computer Raspberry Pi 2. Prediction algorithm is based on adaptive model of ARIMA.

Keywords: Internet of Things, noise monitoring, equivalent continuous sound level, Raspberry Pi, Sigfox, data prediction, Python, embedded system, time series, LPWAN, ARIMA

Seznam používaných zkratek

- 3GPP** The 3rd Generation Partnership Project. 22, 24
- ACF** Autocorrelation Function. 44
- ADF** Augmented Dickey-Fuller. 44, 63, 71, 72
- ADR** Adaptive Data Rate. 21
- AES** Advanced Encryption Standard. 20
- AIC** Akaike Information Criterion. 45, 64
- API** Application Programming Interface. 16
- AR** Autoregressive. 43–45
- ARIMA** Autoregressive Integrated Moving Average. 43, 46, 63–65, 70, 72, 73, 76
- ARM** Advanced RISC Machine. 27, 29
- ARMA** Autoregressive Moving Average. 43, 44
- BIC** Bayesian Information Criterion. 45
- BLE** Bluetooth Low Energy. 11, 13, 28, 38
- CPU** Central Processing Unit. 26, 33, 34
- CSI** Camera Serial Interface. 29
- CSS** Chirp Spread Spectrum. 19
- CSV** Comma-separated Values. 61, 62
- DSI** Digital Serial Interface. 29
- FIR** Finite Impulse Response. 59
- FS** Frame Select. 36
- FTP** File Transfer Protocol. 62
- GPIO** General Purpose Input/Output. 29, 30, 33, 34, 36, 38, 48

- GPU** Graphical Processing Unit. 26, 29
- GSM** Global System for Mobile Communications. 15
- GSMA** Global System for Mobile Communications. 24
- HDD** Hard Disk Drive. 8, 9
- HDMI** High Definition Multimedia Interface. 28, 34
- I²C** Inter-Integrated Circuit. 29, 33, 34
- I²S** Inter-IC Sound. 29, 34, 36, 39
- IDE** Integrated Development Environment. 32
- IIR** Infinite Impulse Response. 50
- IoT** Internet Of Things. 1, 10–12, 14, 15, 22, 24, 27, 31–34, 38, 39, 75
- IP** Internet protocol. 61, 62, 66
- IR** Infrared Radiation. 35, 39
- LEQ** Equivalent Continuous Sound Level. 3, 9, 38, 46, 51, 63, 64, 66, 67, 72–74, 81
- LoRa** Long Range. 19–22, 25, 61
- LoRaWAN** Long Range Wide-Area Network. 19, 20, 22
- LPWAN** Low-Power Wide-Area Network. 1, 14, 15, 19, 24, 25, 38, 61, 75, 76
- LTE** Long-Term Evolution. 15, 23
- MA** Moving Average. 43–45
- MAD** Mean Absolute Deviation. 45
- MAPE** Mean Absolute Percent Error. 45, 73, 74
- MSE** Mean Squared Error. 45, 73, 74
- NB-IoT** Narrow-Band Internet Of Things. 22–25
- NFC** Near Field Communication. 13
- NMT** Noise Monitoring Station. 8, 9
- NTP** Network Time Protocol. 27
- OS** Operační Systém. 35, 38, 47
- PACF** Partial Autocorrelation Function. 45
- PAN** Personal Area Network. 12

PC Personal Computer. 47, 61, 62

PWM Pulse Width Modulation. 33, 34

RAM Random-access memory. 34

RMS Root Mean Square. 51

RPi Raspberry Pi. 26, 28–30, 37, 47–49, 53, 61, 65–67

RTC Real-time Clock. 29, 33, 38, 39, 65

SARIMA Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average. 45, 46

SBC Single Board Computer. 26

SCK Serial Clock. 36

SD Serial Data. 36

SEL Sound Exposure Level. 3, 9

SIM Subscriber Identity Module. 15, 23, 35

SPI Serial Peripheral Interface. 29, 33

SPL Sound Pressure Level. 2, 9, 51, 59, 66

SSE Sum of Squared Errors. 45

SSH Secure Shell. 66

UART Universal Asynchronous Receiver-transmitter. 29, 33, 34

UMTS Universal Mobile Telecommunication System. 15

UNB Ultra Narrow-Band. 15, 16

USB Universal Serial Bus. 9, 27, 29, 31, 34, 36, 38, 48, 49, 51, 53, 54, 56, 58, 75

Úvod

Zvýšená hladina hluku se v poslední době stala nedílnou součástí našich životů, a to nejen vzhledem k neustále se rozšiřující dopravní infrastruktuře, ale také vzhledem ke snaze o maximální automatizaci v celé řadě dalších průmyslových odvětví. Právě negativní dopad zvýšené hladiny hluku na lidské zdraví vedl k vytvoření celé řady nových zákonů a legislativ, které by měly zabránit překračování hygienických limitů a tudíž chránit naše zdraví. Dodržování těchto zákonů je ovšem z praktického hlediska velmi obtížné pokud nemáme neustálou kontrolu nad aktuální hladinou hluku. Ta se dá změřit mnoha již dnes dobře známými postupy, leč právě tyto konvenční metody se zdají být nepoužitelné pro případy velkoplošného monitorování vzhledem k jejich velkým finančním nákladům. V tuto chvíli vstupuje do hry pojem zvaný Internet Of Things (IoT), který vznikl na základě dnešního rozmachu levných elektronických zařízení s možností připojení k internetu. Ten zahrnuje některé důležité aspekty pro úspěšnou tvorbu levné sensorové sítě, jako jsou například cenově dostupné komponenty nebo bezdrátová konektivita s možností připojení velkého počtu zařízení do sítě.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a experimentálním ověřením distribuovaného systému složeného ze spolupracujících a cenově dostupných kalibrovaných snímačů, které jsou schopné snímat akustický tlak, na jehož základě je možné vypočítat ekvivalentní hladinu akustického tlaku za určitý interval. Tento systém by měl umět již na základě měřeného vývoje akustické situace postupnou predikcí avizovat možné překročení nastavené limitní hodnoty za daný časový interval, aniž by uplynul celý čas vymezený pro měření. Nedílnou součástí systému je zajištění bezdrátové komunikace pomocí jedné z dostupných technologií určených pro použití v oblasti IoT.

Teoretická část práce slouží jako vstupní předpoklad pro úspěšné sestavení výše zmíněné sensorové sítě. Nejprve je tedy zaměřena na teoretický úvod o měření hluku a technologiích bezdrátové komunikace se zaměřením na Low-Power Wide-Area Network (LPWAN) sítě působící na území České republiky. Dále popisuje možnosti snímání a zpracování zvuku pomocí vestavěných platforem vhodných pro účely IoT. V závěru teoretické části jsou rozebrány možnosti predikce ekvivalentní hladiny akustického tlaku se snahou o nalezení univerzálního řešení této problematiky.

Kapitola 1

Měření hluku

V této kapitole popíše teoretické základy ohledně měření hluku, které se zejména provádí v zájmu ochrany lidského zdraví a přijatelných podmínek k životu. Nejprve se tedy podíváme na samotné veličiny popisující hluk, dále na jeho hygienické limity v různých prostředích stanovené zákony a nakonec jakými přístroji se dá hluk změřit.

1.1 Měřené veličiny

V kapitole jsou uvedeny ve stručné formě základní akustické veličiny, které se používají k popisu hluku. Pojem hluk jako takový vychází z interakce zvuku s naším biologickým aparátem a dá se obecně považovat za negativní jev [1].

1.1.1 Hladina akustického tlaku

Právě hladina akustického tlaku, z anglického Sound Pressure Level (SPL), je měřítkem zvukové energie emitované zdrojem hluku a vypočte se z akustického tlaku s ohledem na logaritmické vnímání člověka (viz rovnice (1.1)).

$$L = 20 \cdot \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ [dB]} \quad (1.1)$$

kde p je naměřený akustický tlak a $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa je práh slyšení neboli referenční hodnota akustického tlaku. Jedná se o minimálně vnímatelnou hodnotu akustického tlaku nepoškozeným lidským sluchovým orgánem.

1.1.2 Vážená hladina akustického tlaku

Vzhledem k nelineárnímu vnímání zvuku lidským sluchem, jehož citlivost je závislá jak na frekvenci, tak na velikosti akustického tlaku přijímaného ze zdroje hluku, musíme hladiny akustického tlaku v jednotlivých frekvenčních pásmech korigovat ve shodě s váhovacími filtry. Hodnoty korekcí (váhové křivky) jsou přímo dány normou ČSN EN IEC 61672-1 (viz tabulka 1.1). Nejčastěji se používá váhovací filtr typu A, jehož frekvenční charakteristika odpovídá fyziologickému vnímání člověka na nižších hodnotách akustického tlaku a proto se taky používá pro měření těchto hladin. Opakem tohoto filtru je potom váhování typu D, které slouží například pro měření leteckého provozu (velké hodnoty akustického tlaku).

1.1.3 Ekvivalentní hladina akustického tlaku

Protože při působení zvuku na lidské zdraví má rozhodující vliv celková suma akustické energie, které je jedinec dlouhodobě vystaven, používá se k hodnocení proměnného zvuku veličina nazývaná jako ekvivalentní hladina akustické tlaku neboli Equivalent Continuous Sound Level (LEQ). Ekvivalentní hladina akustického tlaku se vztahuje vždy jen k určitému časovému intervalu (např. 8 hodin pracovní doby) a je definována jako hladina akustického tlaku zvuku ustáleného, který by měl v daném časovém intervalu energetický obsah stejný jako daný zvuk proměnný, a tedy i předpokládané stejně škodlivé účinky. Stanoví se jednoduše pomocí rovnice (1.2), jako energetický průměr z hladin akustického tlaku, vyskytujících se v daném intervalu.

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right) [\text{dB}] \quad (1.2)$$

Kde T je délka měření, $p(t)$ je naměřený akustický tlak a p_0 práh slyšení.

1.1.4 Hladina expozice zvuku

Dalším pojmem je hladina expozice zvuku, někdy přezdívaná jako Sound Exposure Level (SEL), která vyjadřuje celkovou energii akustické události. Tato veličina se primárně používá v měřeních, kde je akustická situace tvořena převážně diskrétními hlukovými událostmi. Jedná se například o měření průletů letadel, průjezdů vozidel nebo střelby a exploze.

$$L_{AE} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right) [\text{dB}] \quad (1.3)$$

Kde T_0 je referenční časový interval (1 s), $p(t)$ je naměřený akustický tlak a p_0 práh slyšení.

Tabulka 1.1: Hodnoty korekčních filtrů

Jmenovitý kmitočet [Hz]	Kmitočtové vážení [dB]					Přejímací meze [dB]	
	A	B	C	D	Z	Třída 1	Třída 2
16	-56,7	-29	-8,5	-22,6	0	2 ; -4	5 ; $-\infty$
20	-50,5	-24	-6,2	-20,6	0	± 2	± 3
25	-44,7	-20	-4,4	-18,7	0	± 2	± 3
31,5	-39,4	-17	-3	-16,7	0	± 2	± 3
40	-34,6	-14	-2	-14,7	0	± 2	± 3
50	-30,2	-12	-1,3	-12,8	0	± 2	± 3
63	-26,2	-9,3	-0,8	-10,9	0	± 2	± 3
80	-22,5	-7,4	-0,5	-9	0	± 2	± 3
100	-19,1	-5,6	-0,3	-7,2	0	± 2	± 3
125	-16,1	-4,2	-0,2	-5,5	0	± 2	± 3
160	-13,4	-3	-0,1	-4	0	± 2	± 3
200	-10,9	-2	0	-2,6	0	± 2	± 3
250	-8,6	-1,3	0	-1,6	0	± 2	± 3
315	-6,6	-0,8	0	-0,8	0	± 2	± 3
400	-4,8	-0,5	0	-0,4	0	± 2	± 3
500	-3,2	-0,3	0	-0,3	0	± 2	± 3
630	-1,9	-0,1	0	-0,5	0	± 2	± 3
800	-0,8	0	0	-0,6	0	± 2	± 3
1000	0	0	0	0	0	± 2	± 3
1250	0,6	0	0	2	0	± 2	± 3
1600	1	0	-0,1	4,9	0	± 2	± 3
2000	1,2	-0,1	-0,2	7,9	0	± 2	± 3
2500	1,3	-0,2	-0,3	10,4	0	± 2	± 3
3150	1,2	-0,4	-0,5	11,6	0	± 2	± 3
4000	1	-0,7	-0,8	11,1	0	± 2	± 3
5000	0,5	-1,2	-1,3	9,6	0	± 2	± 3
6300	-0,1	-1,9	-2	7,6	0	2 ; -4	5 ; $-\infty$
8000	-1,1	-2,9	-3	5,5	0	2 ; -4	5 ; $-\infty$
10000	-2,5	-4,3	-4,4	3,4	0	2 ; -4	5 ; $-\infty$
12500	-4,3	-6,1	-6,2	1,4	0	2 ; -4	5 ; $-\infty$
16000	-6,6	-8,4	-8,5	-0,7	0	5 ; $-\infty$	5 ; $-\infty$
20000	-9,3	-11	-11	-2,7	0	3 ; $-\infty$	5 ; $-\infty$

1.2 Hygienické limity

V dnešní době moderních technologií, těžkého průmyslu a rozšířené dopravy (automobilová, letecká, železniční atd.) se po celém světě potýkáme se zvýšenou hladinou hluku. Hlavním problémem jsou pak její dlouhodobé účinky, které mají negativní vliv na fyzické (zhoršení sluchu) a mentální (únava) zdraví člověka [2]. Ve snaze vyvarovat se těmto účinkům vydala vláda několik nařízení, která vycházejí z předpisů Evropské unie. Přičemž ochrana lidského zdraví před hlukem je popsána v zákoně č. 258/2000 Sb. a povolené limitní hladiny hluku jsou podrobně stanoveny nařízením č. 272/2011 Sb. [2][3]. Druhé nařízení dále rozděluje, na jaké prostředí se limitní hladiny akustického tlaku vztahují:

- Pracoviště
- Chráněný venkovní prostor
- Chráněný venkovní prostor staveb
- Chráněný vnitřní prostor staveb.

Právě limitní hodnoty hluku jsou ještě rozšířeny mnoha dodatky, které například rozlišují, zdali se na pracovištích jedná o duševní práci náročnou na pozornost či o práci rutinní povahy. Nařízení vlády rozděluje hluk také na ustálený + proměnný, impulsní, vysokofrekvenční, nízkofrekvenční + infrazvuk či ultrazvuk. Nás budou zajímat hlavně expoziční limity u hluku ustáleného a proměnného (viz tabulka 1.2).

Tabulka 1.2: Hluk na pracovišti

Ustálený a proměnný hluk	Limitní hodnota
Přípustný expoziční limit ustáleného a proměnného hluku při práci	$L_{Aeq,8h} = 85 \text{ dB}$
Pracoviště, na němž je vykonávána práce náročná na pozornost a soustředění, a dále pro pracoviště určené pro tvůrčí práci	$L_{Aeq,8h} = 50 \text{ dB}$
Pracoviště ve stavbách pro výrobu a skladování, kde hluk nevzniká pracovní činností vykonávanou na těchto pracovištích, ale je způsobován větracím nebo vytápěcím zařízením	$L_{Aeq,T} = 70 \text{ dB}$

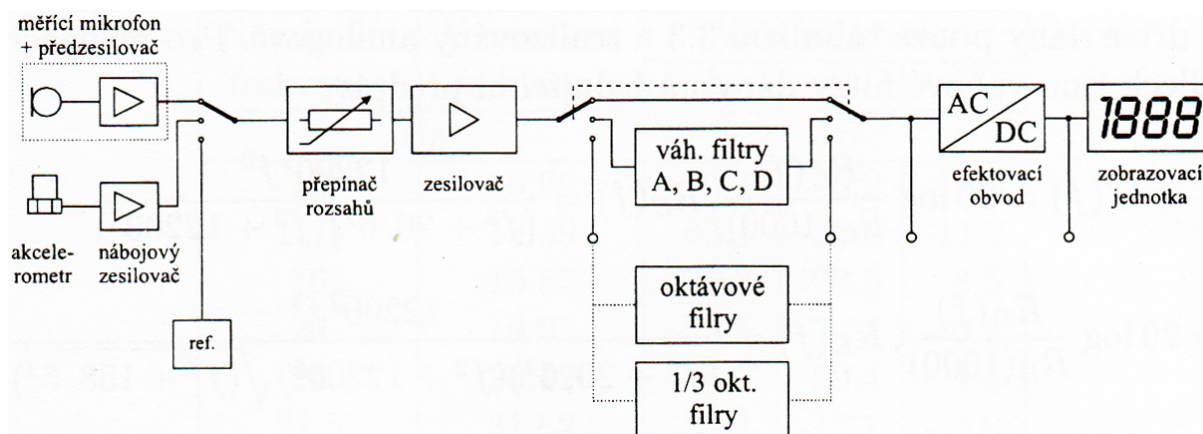
Pokud se jedná o pracoviště, kde je pracovní doba ve sledovaném období proměnná nebo se hladina hluku mění, avšak méně než o 10 dB od výsledků opakovaných měření, kde jednotlivé hladiny nepřekročí hranici 107 dB, stanovuje se takzvaná průměrná expozice, která se počítá podle vztahu (1.4).

$$L_{Aeq,s} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{s} \left(\sum_{k=1}^n 10^{0,1 \cdot (L_{Aeq,8,k})} \right) \right] [\text{dB}] \quad (1.4)$$

Kde n je počet směn během pracovní doby, při kterých je zaměstnanec exponován hluku, a s je celkový počet pracovních dnů v daném období.

1.3 Zvukoměr

Zvukoměr je přístroj na měření akustického tlaku, který se skládá z několika částí, viz Obrázek 1.1. Nejdůležitějším prvkem je vstupní měnič, kterým obvykle bývá mikrofon. Ten má za úkol při snímání převést akustický tlak na elektrické napětí s co nejmenší chybou. Zpravidla se využívá kondenzátorový mikrofon, u kterého se především klade důraz na plochou frekvenční charakteristiku v celém slyšitelném pásmu a časovou stabilitu (pro mnoholeté užívání). Zvukoměr dále obsahuje zesilovač a analogové přepínání rozsahů. Další části již souvisejí se zpracováním signálu a následným zobrazením výsledků, tudíž mohou být jak na analogové, tak digitální straně. Zvukoměr v této části standardně obsahuje váhové a oktákové filtry. Další důležitou částí je převodník střídavého signálu na stejnosměrný a zobrazovací jednotka [1].



Obrázek 1.1: Blokové schéma zvukoměru¹

V České republice je v oblasti stanovení technických požadavků na zvukoměrná zařízení platná norma ČSN EN IEC 61672-1, která je českou verzí evropské normy EN 61672-1:2013 [4]. Tato norma specifikuje dvě kategorie přesnosti (třída 1 a třída 2) a uvádí technické parametry, které musí zvukoměr příslušné třídy přesnosti splňovat. Rozsah platnosti normy se vztahuje na tři druhy přístrojů k měření zvuku:

- Časově vážící zvukoměr, který měří ekvivalentní hladiny frekvenčně váženého akustického tlaku
- Integroující - průměrující zvukoměr, který měří ekvivalentní hladiny frekvenčně váženého akustického tlaku
- Integroující zvukoměr, který měří hladiny frekvenčně vážené zvukové expozice

¹Převzato z: JIŘÍČEK, Ondřej. Úvod do akustiky. Vydavatelství ČVUT, Praha. 2002, s. 61



Obrázek 1.2: Ukázky tří zvukoměrných zařízení - Norsnic 140², Svantek 971³ a Brüel & Kjær 2250-S⁴

Zvukoměr třídy 1 je zařízení pro měření v laboratorních podmínkách a v terénu, třída 2 je pouze pro terénní měření. Zvukoměr třídy 2 smí mít některé vlastnosti zvukoměru třídy 1. Pokud však některá z vlastností vyhoví jen požadavkům pro třídu 2, spadá přístroj automaticky pod tuto kategorii (viz tabulka 1.3). Zvukoměr může být dále specifikován v jedné konfiguraci jako přístroj třídy 1 a v jiné konfiguraci jako přístroj třídy 2 (například s rozdílným mikrofonom nebo předzesilovačem).

Tabulka 1.3: Shrnutí technických požadavků na zvukoměrné zařízení dle ČSN EN IEC 61672-1

Parametr	Třída 1	Třída 2
Váhový filtr A	ANO	
Váhová filtr C	ANO	NE
Dynamický rozsah	Min. 60 dB na 1 kHz	
Frekvenční rozsah	63 Hz - 16 kHz	63 Hz - 8 kHz
Spektrální analýza - 1/3 okt.	63 Hz - 1 kHz	63 Hz - 8 kHz
Spektrální analýza - 1/12 okt.	1 - 16 kHz	-
Možnost kalibrace	ANO	
Konstanty časového vážení	Fast (125 ms), Slow (1 s)	
Pracovní rozsah teplot	-10 °C až +50 °C	0 °C až + 40 °C

²Převzato z: http://www.schallmessung.com/wp-content/uploads/2016/09/nor140_3_oh.png

³Převzato z: <https://www.inlec.com/media/2015/10/svantek-971-class-1-sound-level-meter-analyser-hire-2.jpg>

⁴Převzato z: https://www.bksv.com/-/media/Images/Products/sound-and-vibration-meters/sound-level-meters/Type-2250-S-new/Type-2250-S-soundlevel-meter_1180x674.ashx

1.4 Monitorovací stanice

Chceme-li provádět dlouhodobější měření například v oblasti silničního či leteckého provozu, je nasnadě využít modernějších a sofistikovanějších systémů, jimiž jsou monitorovací stanice na měření hluku neboli Noise Monitoring Station (NMT). Ty je možné nainstalovat prakticky kdekoliv, a pokud je možnost trvalého napájení, tak i na libovolně dlouhou dobu. Otázkou potom zůstává, zdali je stanice schopná sama data posílat na server nebo jestli je potřeba jednou za čas stanice obejít a data ručně stáhnout. Dalším výhodou těchto stanic bývá možnost připojení meteorologické stanice, která dodává příslušná data o klimatických změnách, které mohou sloužit k přesnějšímu vyhodnocení hladin hluku v daném místě.



Obrázek 1.3: Ukázky tří NMT - Nor 1530⁵, Svantek 258⁶ a Brüel & Kjær 3639 - E, G⁷

Nezákladnějších komponentem těchto stanic je vždy zvukoměr a k němu patříčná ochranná skříň. Různé funkce a vlastnosti stanice jsou dány samotným modelem a převážně jeho finální cenou. Dále jsou vypsány některé příklady nadstandardních funkcí monitorovacích stanic na měření hluku:

- Vyjímatelný zvukoměr
- Vnitřní paměť (např. SD karta či Hard Disk Drive (HDD))
- Dálkový přenos dat (přenos po fyzickém médiu či bezdrátově)
- Dálkové ovládání (např. s využitím WiFi či Bluetooth)
- Výstupní řízení (výstražná zařízení, zaslání SMS nebo emailu apod.)
- Možnost audio nebo video nahrávky

⁵Převzato z: http://www.apg-solutions.biz/uploads/5/9/0/1/59012371/_2155684.png?293

⁶Převzato z: http://svantek.co.uk/wp-content/uploads/2016/10/sv_258_photo_1.jpg

⁷Převzato z:

<https://www.airport-technology.com/wp-content/uploads/sites/14/2017/10/4-NMT3639.jpg>

Mezi největší výrobce monitorovacích stanic na světě patří norský Norsonic, dánský Brüel & Kjaer a polský Svantek. Dále existuje spousta menších společností, které vyrábějí monitorovací stanice pro speciální účely, ovšem jejich pozice na trhu ve vývoji zvukoměřných zařízení není tak významná. Tři příklady monitorovacích stanic a jejich základních parametrů jsou vypsány níže (viz tabulka 1.4).

Tabulka 1.4: Porovnání parametrů tří NMT od hlavních výrobců

Výrobce	Norsonic	Svantek	Brüel & Kjaer
Model	Nor 1530	SV 258	3639 - E, G
Zvukoměr	Nor 140	SVAN 958 A	-
Standard	Třída 1		
Váhovací filtry	A, C, Z	A, C, Z, G	A, C, Z
Časová konstanta	Slow, Fast, Impuls		
Frekvenční rozsah	0,4 Hz - 20 kHz	0,5 Hz - 20 kHz	12,5 Hz - 20 kHz
Dynamický rozsah	120 dB	114 dB	110 dB
Filtry	oktáva, 1/3 oktávy		
Módy měření	SPL, LEQ, PEAK, MAX, MIN, SEL, ...		
Konektivita	Universal Serial Bus (USB), RS-232		
Komunikace	Bluetooth, WiFi, 4G	WiFi, 3G	LAN, GPRS, GSM
Paměť	SD karta	ne	HDD 40 GB
Záložní baterie	ano	až 3 dny v provozu	14 či 28 hodin
Zvuková nahrávka	ano	ne	ano
Meteo-stanice	lze	ne	ne
Solární panel	ne	lze	ne
Přenosnost	ne	ano	ano
GPS	ne	ne	ano
Teplota	-10 °C až +50 °C		
Vlhkost	až 90%	až 90%	až 99%
Voděodolnost	ano	ano	ano

Kapitola 2

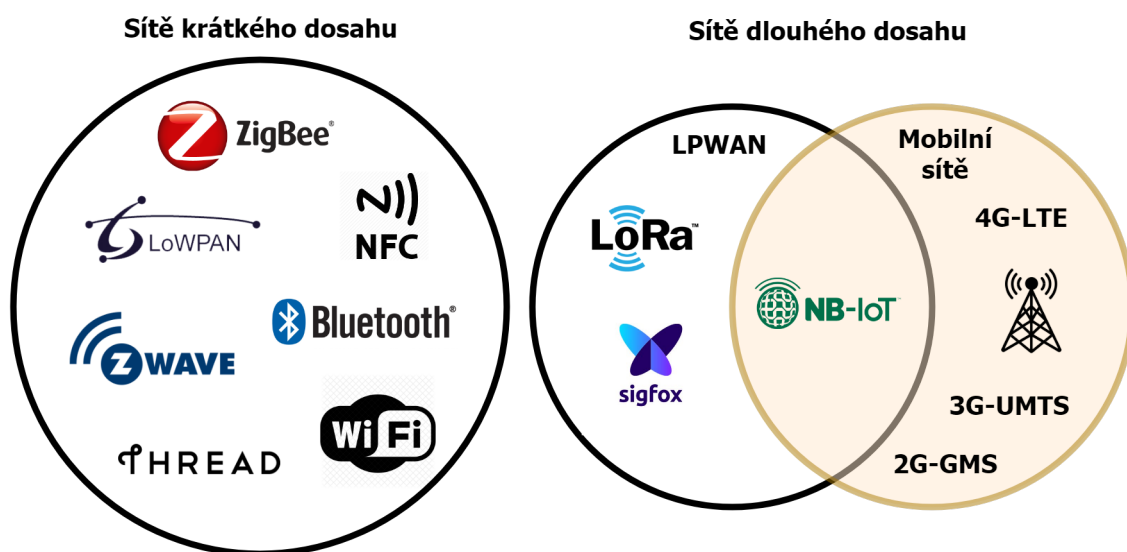
Bezdrátová komunikace

V posledních několika letech se začal pojem Internet věcí, z anglického IoT, objevovat čím dál častěji. Vzhledem k dnešnímu rozmachu levných elektronických zařízení s možností připojení k internetu, se začíná pojem IoT skloňovat nejen mezi uživateli, ale převážně v oblasti výzkumu a vývoje, kde se tento fenomén potýká s celou řadou technických nedostatků [5]. Prozatím byl tento pojem chápán převážně jako jednoduchý způsob sběru dat, ale s pokročilým rozvojem se stal nezbytnou součástí konceptů jako jsou SmartHomes, SmartCities nebo Industry 4.0, které se jeví jako nevyhnutelná budoucnost 21. století. To ovšem nejsou jediné možnosti uplatnění a IoT už začíná nejen pronikat do oblastí spojených s průmyslem či zdravotnictvím, ale také dopravou, logistikou, robotikou či do herního průmyslu [6]. Uplatnění je opravdu velké škála a se samotným nástupem těchto technologií vzešla i nová otázka ohledně jejich komunikace. Vzhledem k potřebám senzorů jako jsou například energetické nároky nebo dosah připojení, si již nelze vystačit s konvenčními metodami.

Právě z tohoto důvodu vznikla celá řada nových technologií či došlo k uzpůsobení těch starých. Ty lze obecně rozdělit dle jejich dosahu na bezdrátové sítě krátkého dosahu a dlouhého dosahu. V této práci se s ohledem na velké množství různých standardů a technologií zaměříme pouze na ty nejrozšířenější a nejpoužívanější [7][8].

2.1 Bezdrátové sítě krátkého dosahu

V této kapitole budou stručně popsány technologie pro bezdrátové sítě krátkého dosahu. Tyto technologie jako je například Bluetooth, ZigBee nebo WiFi jsou velmi vhodné pro IoT projekty u jednotlivých uživatelů. Na druhou stranu nemusí být dostačujícím a nejvhodnějším řešením v oblasti průmyslu a zapojování rozlehlých senzorových sítí [7].



Obrázek 2.1: IoT komunikační protokoly

WiFi

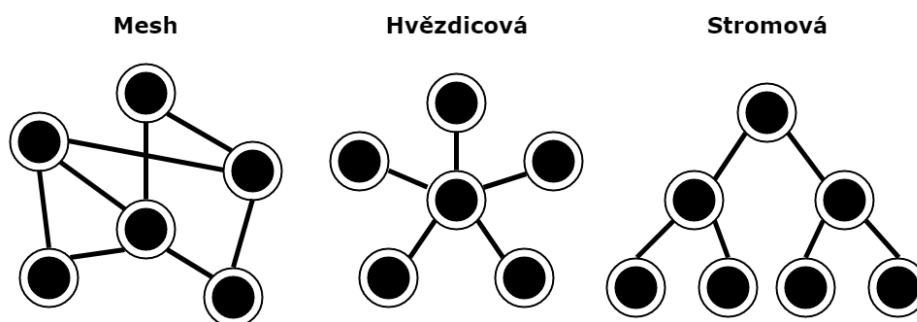
Technologie WiFi se obecně vztahuje k několika standardům IEEE 802.11 popisující bezdrátovou lokální síť a její komunikaci. První verze byla vydána v roce 1997 a v současnosti se tato technologie dá považovat za jeden ze základních kamenů celého internetu [9]. Tato technologie, pracující v pásmu 2,4 GHz či 5 GHz dle standardu, byla původně zamýšlena pro vysokorychlostní přenosy dat mezi zařízeními v lokální síti, a tak vůbec nebrala v úvahu aplikaci IoT a její potřeby. To bylo poprvé zohledněno v konceptu standardu s názvem WiFi HaLow (802.11 ah), který by měl pokrýt potřeby SmartHomes, SmartCities a celkově M2M komunikace. Tento nově představený standard, který pracuje v pásmu 900 MHz, by měl srazit energetickou spotřebu na 100 mW, dále být schopný delšího dosahu připojení a rychlosti přenosu až 347 Mbit/s [7].

Bluetooth

Technologie Bluetooth, definovaná na standardu IEEE 802.15.1, je používána pro přenos dat na krátké vzdálenosti v režimu komunikace Master a Slave. Tato technologie se v současnosti stává čím dál populárnější, a to hlavně díky neustále se zvyšujícímu počtu používaných elektronických zařízení jako jsou chytré telefony, tablety, notebooky apod. Jedním z neduhů klasického Bluetooth je limitovaný počet Slave zařízení (maximálně 7 připojených zařízení k jednomu Master) a jeho topologie. Z těchto důvodů byla vytvořena nová verze pod názvem Bluetooth Low Energy (BLE), která disponuje neomezeným počtem připojení k jednomu zařízení Master, dále nižší spotřebou energie, kratším časem připojení a podporou hvězdicové topologie [10][11].

6LowPAN

Internetový protokol verze 6 (IPv6) nazývaný 6LowPan, který je určen pro bezdrátové osobní sítě Personal Area Network (PAN) s nízkou spotřebou energie, je jedním z prvních hojně používaných IoT komunikačních protokolů. Výhodou je možnost připojení zařízení k IP síti bez jakýchkoliv dalších mezi-relací. Technologie podporuje 2^{128} IP adresování a několik různých topologií (například mesh nebo hvězdicovou) [12][13].



Obrázek 2.2: Vybrané topologie sítí

ZigBee

O založení nového komunikačního protokolu ZigBee, se postarala ZigBee Alliance⁸ v roce 2004, která tak učinila na základě standardu IEEE 802.15.4 pro bezdrátové sítě s nízkou spotřebou energie. Technologie ZigBee byla vytvořena pro užívání v osobních sítích PAN, které vyžadují nízkou spotřebu zařízení (delší výdrž baterie) a zabezpečenou komunikaci, ale zároveň si postačí s nízkým datovým tokem. ZigBee podporuje celou řadu různých topologií, jako je například mesh, hvězdicová nebo stromová [13][8].

Z-Wave

Z-Wave je technologie vytvořená dánskou firmou Zensys, která je specificky vyvinuta pro inteligentní řešení ovládání domácnosti, domů a budov s možností připojení až 50 koncových zařízení. Většina zařízení, které lze koupit na oficiálních stránkách Z-Wave⁹, fungují na základě point-to-point komunikace o nízké přenosové rychlosti. To v domácnostech více než vyhovuje požadavkům IoT, které většinou pracují s malými zprávami (ovládání světla či monitorování spotřeby energie). Koncová zařízení jsou zpravidla schopná pouze plnit příchozí příkazy nebo odpovědět na konkrétní dotazy. Z-wave podporuje pouze mesh topologii [7][14].

⁸<http://www.zigbee.org/>

⁹<http://www.z-wave.com/>

NFC

Near Field Communcation (NFC) je bezdrátová technologie, která slouží pro přenosy na velmi krátké vzdálenosti. Pro umožnění přenosu je potřeba obě zařízení přiložit k sobě na vzdálenost méně než jednotek centimetrů (peer-to-peer komunikace). Podobně jako RFID používá tagy, které obsahují malé množství dat. Tento tag může být buď pouze k přečtení (RFID princip) nebo s možností přepisu a pozdější změny zařízením. NFC technologie je hojně používána ve spojení s chytrými telefony, bezkontaktními platbami nebo průmyslovými aplikacemi. Výhodou této technologie může být vysoká rychlost reakce systému nebo velmi nízké pořizovací náklady [13][15].

Tabulka 2.1: Souhrn bezdrátových sítí krátkého dosahu

Technologie	WiFi	BLE	6LowPan / ZigBee	Thread	Z-wave	NFC
Frekvenční pásmo	2,4 a 5 GHz	2,4 GHz	868 MHz (EU) 915 MHz (USA) 2,4 GHz (globálně)	2,4 GHz	868 - 908 MHz	125 kHz 13,56 MHz 860 MHz
Dosah	10 m	100 m	100 m	30 m	Uvnitř - 30 m Venku - 100 m	10 cm 1 m 1 m
Datový tok	54 Mbit/s	1 Mbit/s	250 kbit/s	250 kbit/s	40 kbit/s	106 kbit/s 212 kbit/s 44 kbit/s
Topologie	P2P, hvězdice	Bus, hvězdice	Mesh, hvězdice	Mesh	P2P	-
Druh sítě	WLAN	WPAN	WPAN	WPAN	WPAN	WPAN
Rozprostření spektra	DSSS, OFDM	FHSS	DSSS	DSSS	DSSS	GSMA
Energetické nároky	Vysoké HaLow - nízké	Nízké	Nízké	Nízké	Velmi nízké	Velmi nízké

Thread

Technologie Thread byla speciálně vyvinuta za cílem komunikace dvou zařízení. Je schopná pracovat v malých i velkých sítích se zařízeními o nízké spotřebě s rychlostí až 250 kbit/s. Jednou z největších výhod je nezávislost Slave zařízení, které si v případě neschopnosti připojení k původnímu Master zařízení, automaticky nalezne a připojí se k novému Master zařízení. A to díky použití mesh topologie společně s 6LowPan technologií, kde se každé koncové zařízení může chovat jako Master a neexistuje zde limit připojených Slave zařízení [16][11].

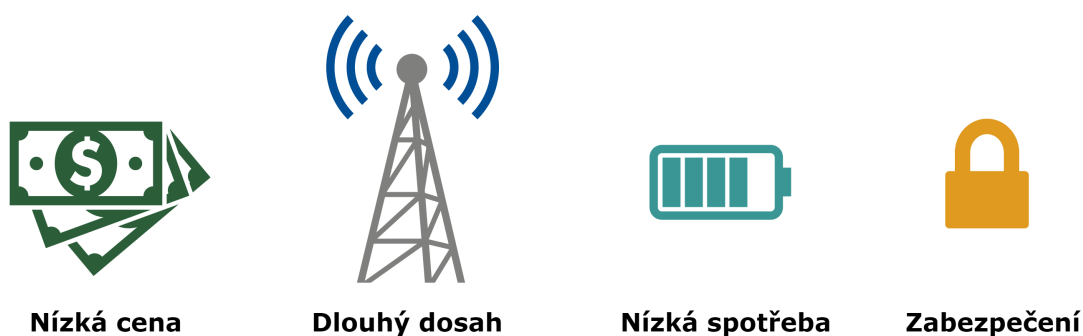
Shrnutí

Vzhledem k velkému počtu bezdrátových technologií krátkého dosahu je velmi obtížné určit, která z nich se jeví jako nejlepší. Spíše než snažit se upřednostnit jednu z technologií, je podstatnější uvědomit si, jaká jsou důležitá kritéria při tvorbě naší vlastní sítě a na základě toho si vybrat danou technologii. Krom již dříve zmíněných stěžejních parametrů (viz tabulka 2.1) můžeme za další kritéria považovat následující:

- Zabezpečení sítě
- Cena
- Dostupnost
- Kompatibilita s ostatním hardwarem
- Latence
- Spolehlivost

2.2 LPWAN

Jedním z aspektů samotného IoT je nezávislost a rozptřeni koncových zařízení na větší vzdálenosti, než dovolují technologie zmíněné v předchozím odstavci. Právě z tohoto důvodu došlo k vytváření nových technologií, které by byly schopny posílat relativně malé množství dat vícekrát za hodinu na velké vzdálenosti z různého prostředí, a přitom by nemuselo docházet k neustálému dobíjení baterií. Tyto technologie se již ze samotných vlastností nazývají jako LPWAN neboli rozsáhlá síť s nízkými energetickými nároky. V budoucnu se předpokládá, že počet připojení do těchto sítí exponenciálně vzroste a pro mnoho zařízení bude připojením primárním. Z těchto důvodů by každá organizace nebo společnost, která chce skutečně využít možnosti IoT, měla zvážit i účinnou strategii LPWAN [17].

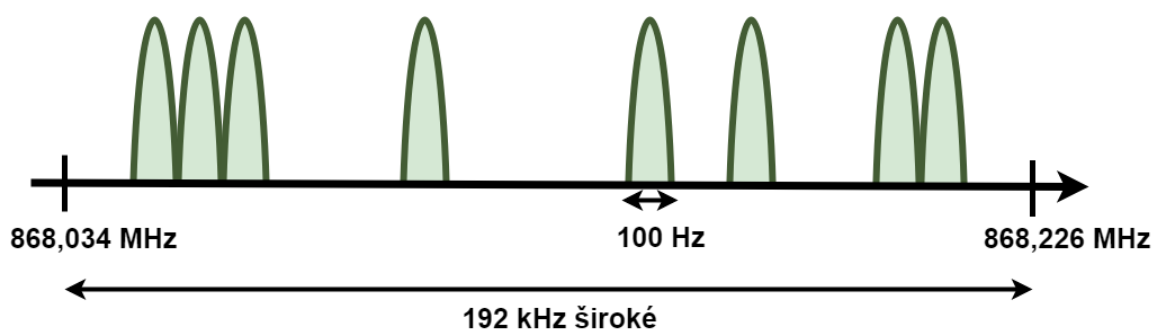


Obrázek 2.3: Základní charakteristiky LPWAN technologií

Než se začneme zabývat samotným výčtem nejpoužívanějších LPWAN technologií působících na území České republiky, rád bych zmínil možnost využití konvenčních mobilních sítí jako je Global System for Mobile Communications (GSM), Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) nebo Long-Term Evolution (LTE). Ty sice splňují většinu předpokladů pro využití v IoT, ale v současnosti zaostávají v některých důležitých atributech. Těmi jsou hlavně energetické nároky a cena koncových produktů, protože tyto sítě byly vytvářeny za cílem poskytnutí rychlého připojení k internetu a jejich design je pro účely IoT zbytečně komplikovaný [18].

2.2.1 SigFox

Prvním veřejným operátorem pro IoT se v Čechách stala společnost SimpleCell¹⁰. Ta ve spolupráci s provozovatelem mobilních služeb T-mobile pracuje na celkovém pokrytí České republiky technologií SigFox, která byla vytvořena francouzskou stejnojmennou firmou. K rozšíření této technologie po celé republice právě poslouží již stávající stožáry T-Mobile, které se osadí moduly pro komunikaci v síti Sigfox. Ta pracuje v nelicenčním pásmu o frekvenci 868 MHz, které lze využívat zdarma za předpokladu dodržení podmínek stanovených Českým telekomunikačním úřadem. Díky využití pásma na sub-GHz frekvenci, je Sigfox síť použitelná i ve vnitřním prostředí. Na druhou stranu tyto frekvence špatně prochází zemínou, a tak pokrytí dosáhne jen do suterénu. Použití modulace DBPSK a technologie Ultra Narrow-Band (UNB) umožní vystačit si s šířkou pásma pouhých 192 kHz. Každá zpráva potom v pásmu zabírá 100 Hz a je posílána s rychlostí 100 nebo 600 bit/s v závislosti na regionu [19].

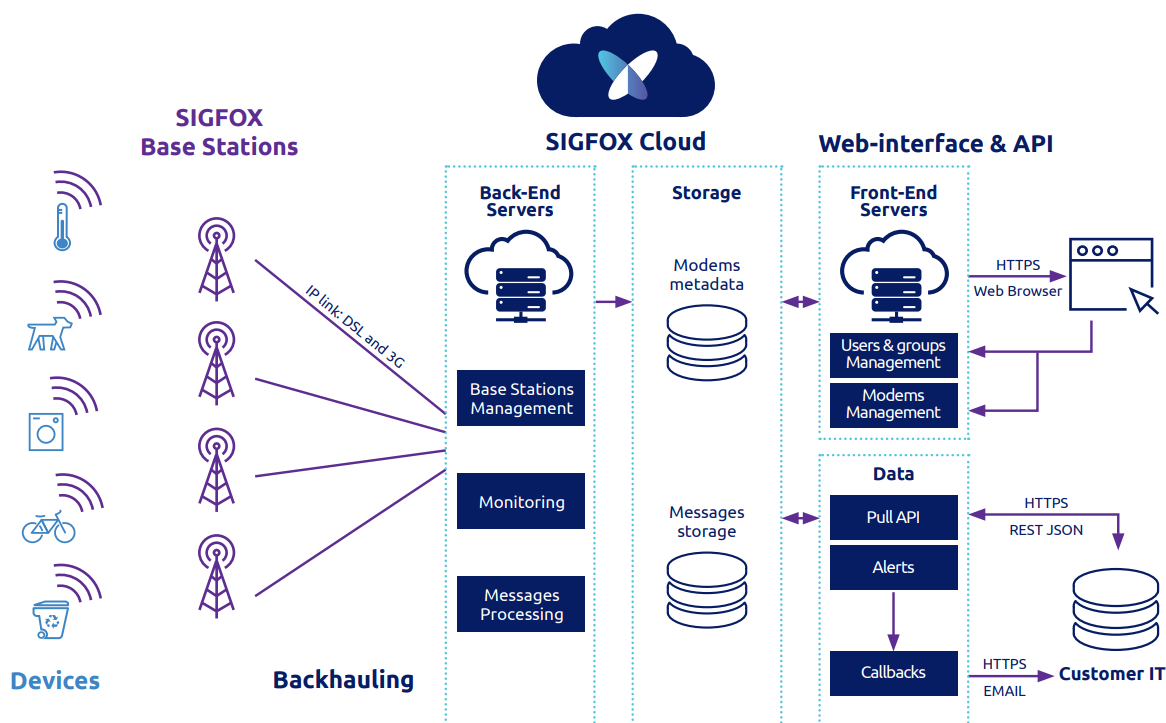


Obrázek 2.4: Sigfox UNB technologie

Každé Sigfox zařízení, které chce být připojené do sítě, musí obsahovat komunikační čip neboli modem. Tento modem neobsahuje klasickou Subscriber Identity Module (SIM) kartu ani nedisponuje IP adresou. K identifikaci zařízení v síti slouží unikátní 32 bitové Sigfox ID číslo, které je přiřazeno již při výrobě modemu.

¹⁰<https://simplecell.eu>

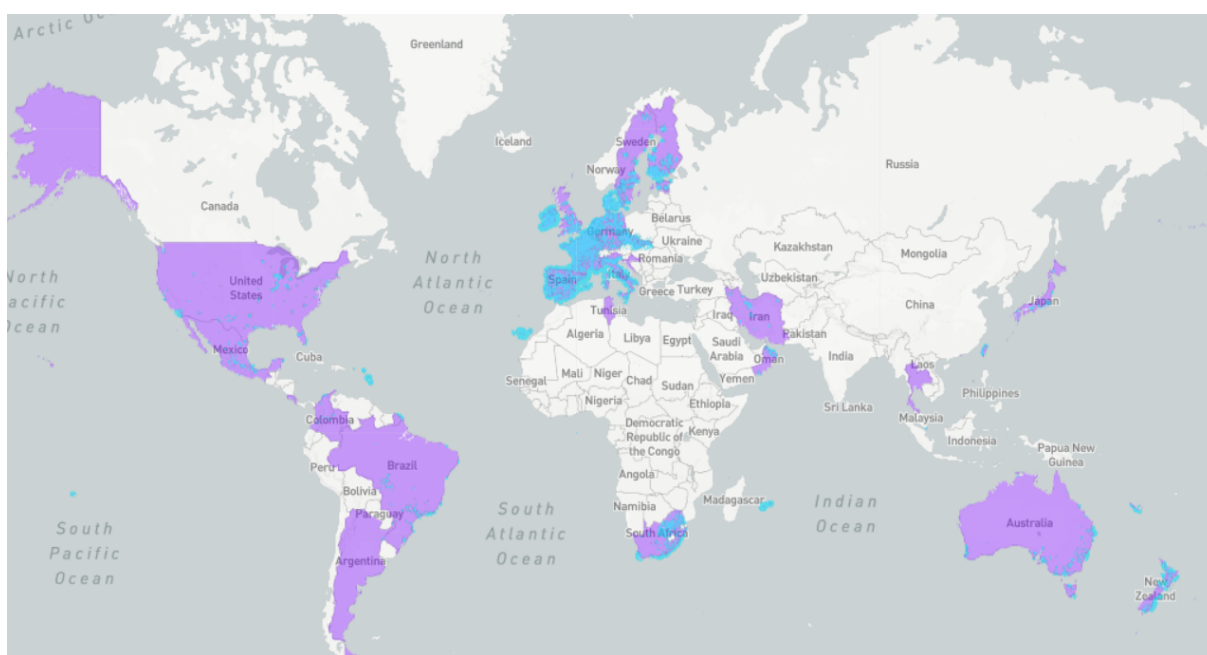
Denně je možné poslat 140 zpráv o velikosti 0-12 Byte směrem na cloud (uplink) a 4 zprávy o fixní velikosti 8 bajtů směrem k zařízení (downlink). Downlink zpráva je inicializována samotným zařízením, kde následuje 20 sekundové zpoždění mezi prvním odeslanou zprávou a možností přijímání, které trvá maximálně 25 sekund. Každá zpráva obsahuje kryptografický token, který umožňuje vzájemnou autentifikaci mezi sítí a zařízením. Dalším obsahem je sekvenční číslo (unsigned integer), které slouží k odstranění duplicit při příjmu. Toto číslo se zresetuje a začne od nuly po dovršení maximální hodnoty, což se teoreticky stane jednou za měsíc při odeslání 140 zpráv denně. Vysílací výkon zařízení je maximálně 25 mW (14 dBm) a proto je spotřeba energie naprosto minimální, což dále vede k dlouhé výdrži baterie.



Obrázek 2.5: Architektura technologie Sigfox¹⁰

Přenos mezi zařízením a sítí je asynchronní. To znamená, že emitovaná zpráva ze zařízení je odeslána na náhodné frekvenci a po odeslání prvotní zprávy se ze zařízení zašlou další dvě duplicitní zprávy na odlišných frekvencích a s různým zpožděním. Sigfox stanice neustále skenují celé spektrum 192 kHz a hledají UNB signál k demodulaci. Po přijetí zprávy, která je většinou zachycena alespoň dalšími dvěma stanicemi, jsou data přeposlána pomocí zabezpečeného IP spojení do Sigfox cloudu, kde jsou přístupná koncovému uživateli. Samotný uživatel má po přístupu na server k dispozici různé nástroje pro vývoj a využití aplikačního webového rozhraní Application Programming Interface (API).

Pokrytí technologií Sigfox je naznačené níže (viz obrázek 2.6). Modré zbarvení znamená již pokryté oblasti. Jedná se hlavně o západní část Evropy, kde pokrytí České republiky je již z více než 95% rozlohy. Fialová barva potom značí oblasti, které jsou ve fázi testování a s plánovaným budoucím pokrytím. K roku 2018 došlo k částečnému či úplnému pokrytí 45 zemí a regionů o celkové rozloze 3,8 km². K zjištění pokrytí určitého území lze využít oficiálních stránek Sigfox¹¹, které ovšem poskytují pouze možnost vyhledávání podle určitých zemí a výstupem jsou pouze obarvené plochy v dané lokalitě (viz obrázek 2.6). Druhou možností je využít stránek SimpleCell¹², kde máme možnost zadat přesnou adresu a dozvědět se výsledek kvality signálu ve třech úrovních: Outdoor (venku), Indoor (uvnitř) a Deep indoor (podzemí).



Obrázek 2.6: Pokrytí technologií Sigfox¹¹

Nejprve společnost Sigfox ve své technické specifikaci uváděla několik oficiálních a certifikovaných kitů pro prototypování (viz tabulka 2.2). V průběhu několika posledních měsíců se ovšem na trhu vyrojila celá řada koncových certifikovaných i necertifikovaných produktů. Ty se dají najít na partnerských stránkách Sigfoxu¹³, kde je možnost jejich filtrace podle několika kategorií (např. zóna působení, spotřeba energie nebo dostupnost v komerční sféře).

¹¹<https://www.sigfox.com/en/coverage>

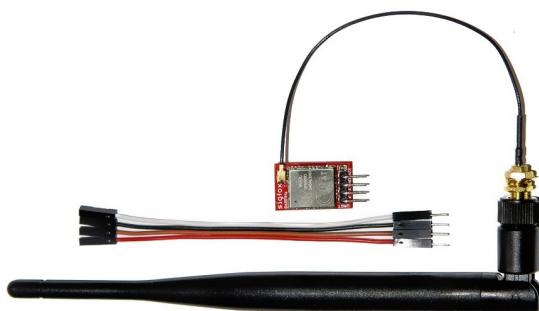
¹²<https://coverage.simplecell.eu/>

¹³<https://partners.sigfox.com/>

Tabulka 2.2: Kity pro prototypování k síti SigFox

Název kitu	IDE	CPU	Rozhraní	SigFox konektivita	Cena bez DPH
Arrow SmartEverything Evaluation Kit	Arduino IDE	Atmel SAM D21 (ARM Cortex M0+)	USB, Serial (TX/RX)	Ano - 1 rok	2 800 Kč
DIY Open-source Home Automation Platform	Visual Studio Code	STM32L083CZ (ARM Cortex M0+)	GPIO (18x), I2C (2x) UART (3x), SPI (1x) ADC (5x), DAC (2x) 10-pin SWD pro ladění Micro-USB	Zapotřebí kontaktovat SimpleCell	1 490 Kč
Pycom SiPy Evaluation Kit	Pymakr (MicroPython REPL)	Espressif ESP32	UART (2x), SPI (2x) I2C, I2S, Micro SD	Ano - 1 rok	29,95 EUR
Sigfox Breakout Board (BRKWS01) Evaluation Kit	Vlastní	ON Semiconductor AX-SFEU SoC	UART	Ano - 1 rok	19,90 EUR
Thinextra XKit Evaluation Kit	Arduino IDE	Atmel ATmega328P	USB, Serial (TX/RX)	Ano - 1 rok	27 USD
LPWAN Sigfox node breakout	Vlastní	-	UART Serial (TX/RX)	Ano - 1 rok	365 Kč
Sens'it 2.0 (Custom case)	Vlastní	-	USB	Ano - 1 rok	1 690 Kč
Sigfox module	Arduino Raspberry Pi Waspnote	-	GPIO shield	Ano - 1 rok	66 EUR
Arduino MKRFOX1200	Arduino	SAMD21 (ARM Cortex M0+) + 32bit low power ARM MCU	USB, UART, SPI, I2C	Ano - 2 roky	35 EUR

Nejjednodušší variantou je použití LPWAN Sigfox node breakout. Ten se prodává samotný za necelých 365 Kč nebo s příslušenstvím za 530 Kč¹⁴. Dražší varianta zahrnuje čtyři vodiče, anténu (5 dBi) a USB–UART převodník. Převodník se zejména hodí pro odlaďování modulu a jeho připojení pomocí USB portu. Balení dále obsahuje návody na první spuštění modemu, registraci do české sítě LPWAN¹⁵ a nakonec do samotného Sigfoxu.

Obrázek 2.7: LPWAN Sigfox node breakout¹⁶

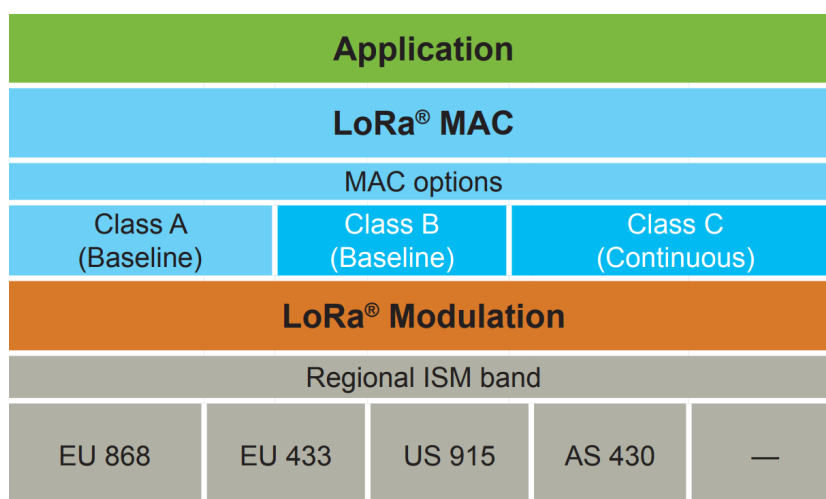
¹⁴<https://arduino-shop.cz/iot-bezdratove-periferie/1584-lpwan-sigfox-node-1493197325.html>

¹⁵<https://www.lpwan.cz/>

2.2.2 LoRa

Další budovaná LPWAN technologie v České republice se nazývá Long Range (LoRa). O její rozšíření se zde starají například České Radiokomunikace nebo českobudějovická společnost Starnet. Samotná technologie je spravována pomocí Lora Alliance, která je otevřená nezisková asociace složená z řady členů¹⁷ jako je například Cisco Systems, Inc, ORANGE, IBM Research GmbH nebo ARM Ltd. Jejich cílem je standardizovat LPWAN technologie a rozšířit je pokud možno po celém světě [20].

Pod pojmem LoRa (Longa Range) se skrývá definice fyzické vrstvy, která umožňuje bezdrátovou komunikaci na velmi velké vzdálenosti. Toho je docíleno díky využití Chirp Spread Spectrum (CSS) modulace a komunikace (stejně jako u technologie Sigfox) v nelineárním pásmu. Na rozdíl od Sigfoxu, každá zpráva zabírá o 25 kHz více pásma, tedy 125 kHz. Přestože tento typ modulace je už po léta používán pro armádní účely a vesmírný program, ještě nikdy nebyl implementován cenově dostupný pro komerční sféru [21].



Obrázek 2.8: Model technologie LoRa¹⁸

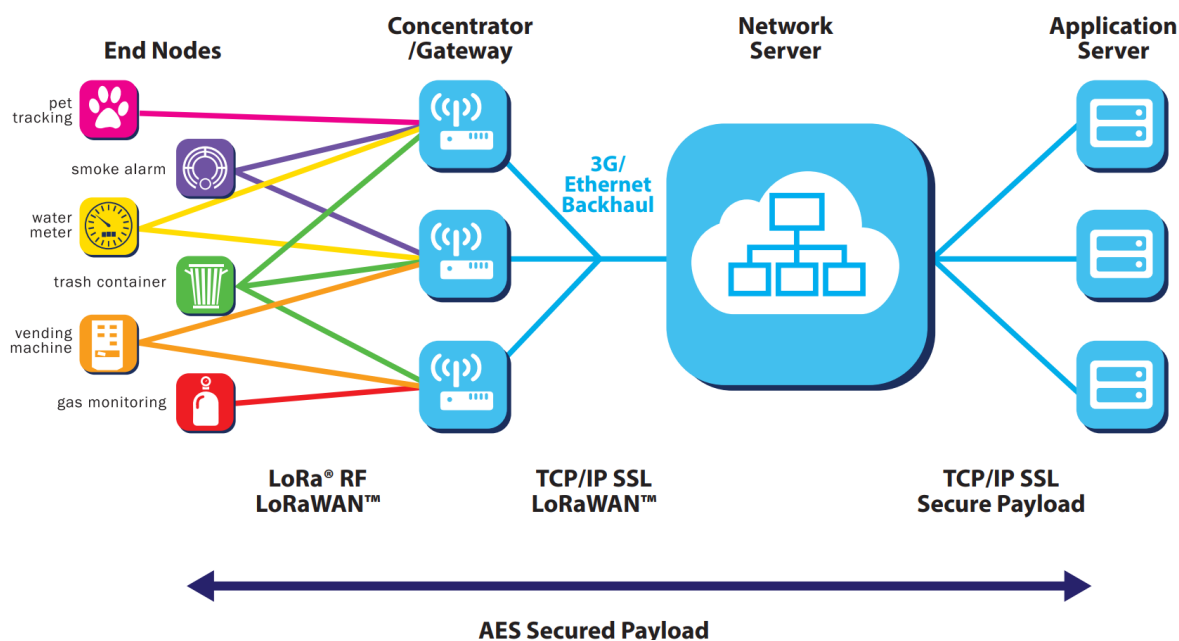
Přidružený pojem Long Range Wide-Area Network (LoRaWAN) potom definuje samotný komunikační protokol a síťovou architekturu systému. Na rozdíl od většiny bezdrátových protokolů používá technologie LoRaWAN hvězdicovou topologii. Tato topologie vede ke zvýšení síťové kapacity a snížení energetických nároků, protože jednotlivá koncová zařízení nejsou nucena přeposílat informaci dál. Jednotlivá stanice potom dokáže pokrýt celá města či území o rozloze stovek kilometrů čtverečních v závislosti na jeho geografických vlastnostech. Podobně jako u technologie Sigfox, jsou zprávy z koncových zařízení zachyceny více stanicemi, které dále data přeposílají pomocí IP propojení na cloudové servery (viz obrázek 2.9).

¹⁶Převzato z: <https://partners.sigfox.com/products/lpwan-sigfox-node>

¹⁷<https://lora-alliance.org/member-directory>

¹⁸Převzato z: <https://www.leverage.com/research-papers/lora-lorawan-primer>

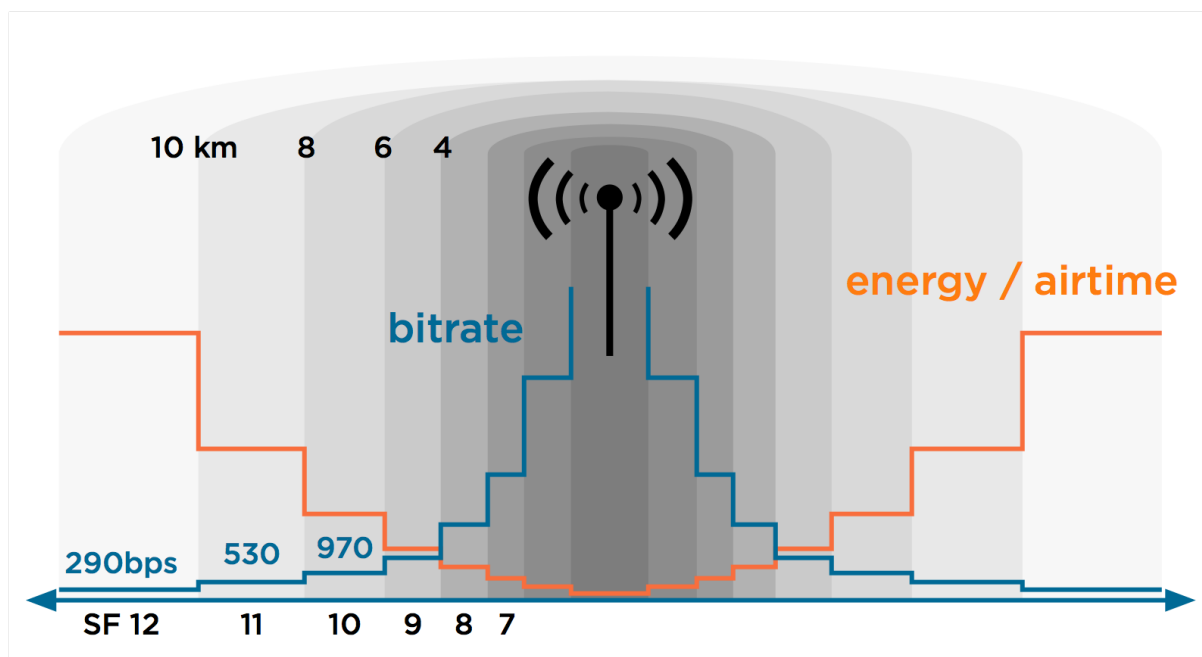
¹⁹Převzato z: <https://lora-alliance.org/about-lorawan>

Obrázek 2.9: Architektura technologie LoRa¹⁹

Zabezpečení sítě je docíleno pomocí Advanced Encryption Standard (AES) algoritmu a dvou-úrovňové kryptografie, která využívá dvou unikátních 128 bitových klíčů. První klíč se nazývá NSK (Network Session Key) a je sdílený mezi koncovým zařízením a sítí. Druhý, AppSKey (Application Session Key), je sdílený mezi koncovým zařízením a aplikační úrovní sítě [21]. Minimální energetická spotřeba zajištěna díky asynchronní komunikaci, která je definována třemi různými způsoby na základě třídy zařízení (A, B či C) [22].

- **Třída A** – je základní třída, která musí být podporována všemi LoRaWAN koncovými zařízeními. Komunikace je zde vždy inicializována koncovým zařízením a je plně asynchronní. Každé odeslání zprávy (nehledě na čas), je následováno dvěma krátkými okénky pro možné přijímání, a tak je veškerá komunikace oboustranná. Koncové zařízení má tak možnost přejít do spánkového režimu, kdy mu samotná aplikace dovolí, neboť zde není žádný důvod k pravidelnému připojování do sítě. Z tohoto důvodu se třída A také nazývá jako třída nejnižší spotřeby, protože veškerá komunikace (uplink i downlink) je inicializována samotným koncovým zařízením.
- **Třída B** – je na rozdíl od třídy A synchronizována se sítí a vysílá jejím směrem pravidelné signály. To vede k plánovanému otevírání přijímacích okének a poskytuje síti možnost downlink komunikaci s předem danou latencí. Délka zpoždění je programovatelná až na maximální dobu 128 sekund, a tak vyhoví širokému spektru aplikací. Již z principu je ovšem jasné, že tato metoda pravidelného příjmu vede k mírnému zvýšení spotřeby energie koncového zařízení.

- **Třída C** – je poslední možnost, která je zaměřená na co nejmenší možné zpoždění příjmu ze sítě. Toho je docíleno díky permanentnímu otevření přijímacího okénka koncového zařízení vyjma doby, kdy dochází k vysílání. Na základě tohoto může síťový server inicializovat downlink komunikaci v jakékoliv době. Neustálý příjem vede ke značenému zvýšení spotřeby zařízení (cca 50 mW), a tak se třída C doporučuje pouze pro aplikace, kde je možnost neustálého napájení.

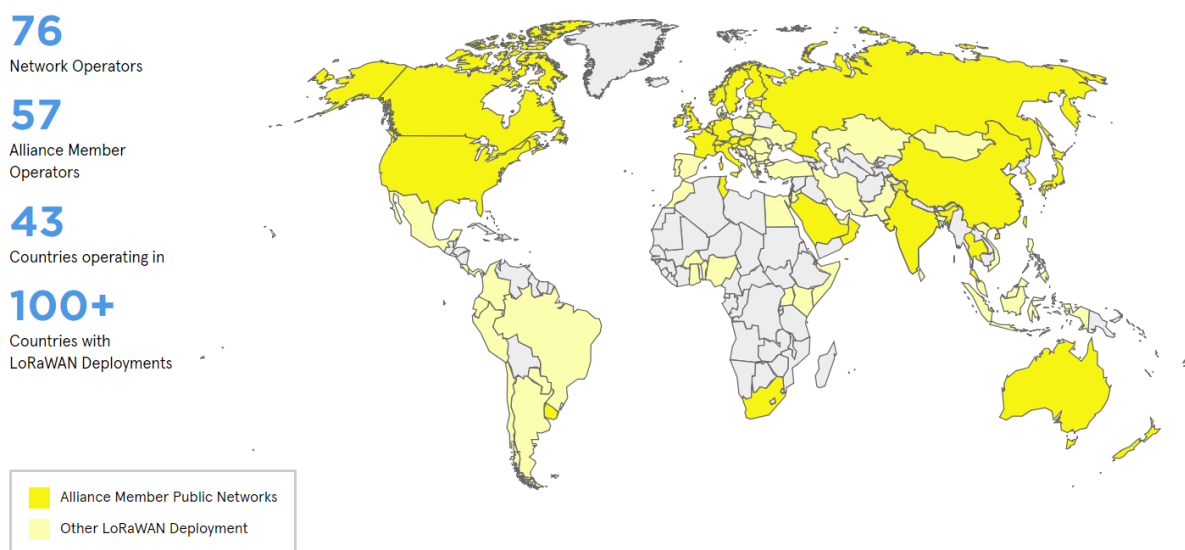


Obrázek 2.10: Adaptivní datový tok technologie LoRa²⁰

Aby síť byla schopná komunikovat s velkým množstvím koncových zařízení naráz (velká kapacita sítě), používá adaptivního datového toku Adaptive Data Rate (ADR). Ten je vypočítán na základě vzdálenosti koncového zařízení od stanice a délce vysílané zprávy (viz obrázek 2.10). V praxi to znamená, že koncové zařízení, které je velmi blízko přijímací stanice a má v úmyslu zaslat velmi krátkou zprávu, dostane maximální možný prostor (vysoký datový tok) k vysílání tak, aby zabíralo pásmo na co nejkratší možnou dobu. Výhodou tohoto principu je velká flexibilita sítě, která si například po přidání nové přijímací stanice automaticky upraví datové toky pro jednotlivá koncová zařízení. Na druhou stranu je tímto způsobem velmi ovlivněná energetická spotřeba zařízení, která roste se vzdáleností od přijímací stanice [21].

²⁰Převzato z: <http://lorawan.lace.io/wp-content/uploads/2016/02/adr.jpg>

Pokrytí LoRaWAN technologií k dubnu 2018 je znázorněné na obrázku níže (viz obrázek 2.11). To momentálně zahrnuje 76 síťových operátorů, kteří jsou rozprostřeny po 43 různých zemích. Na oficiálních stránkách LoRa Alliance je potom interaktivní mapa, která poskytuje informaci o konkrétních operátorech zabezpečujících dané území (viz obrázek 2.11). Stejně tak lze na těchto stránkách nalézt veškerý možný hardware vybavený technologií LoRa a připravený k použití.



Obrázek 2.11: Pokrytí technologií LoRa²¹

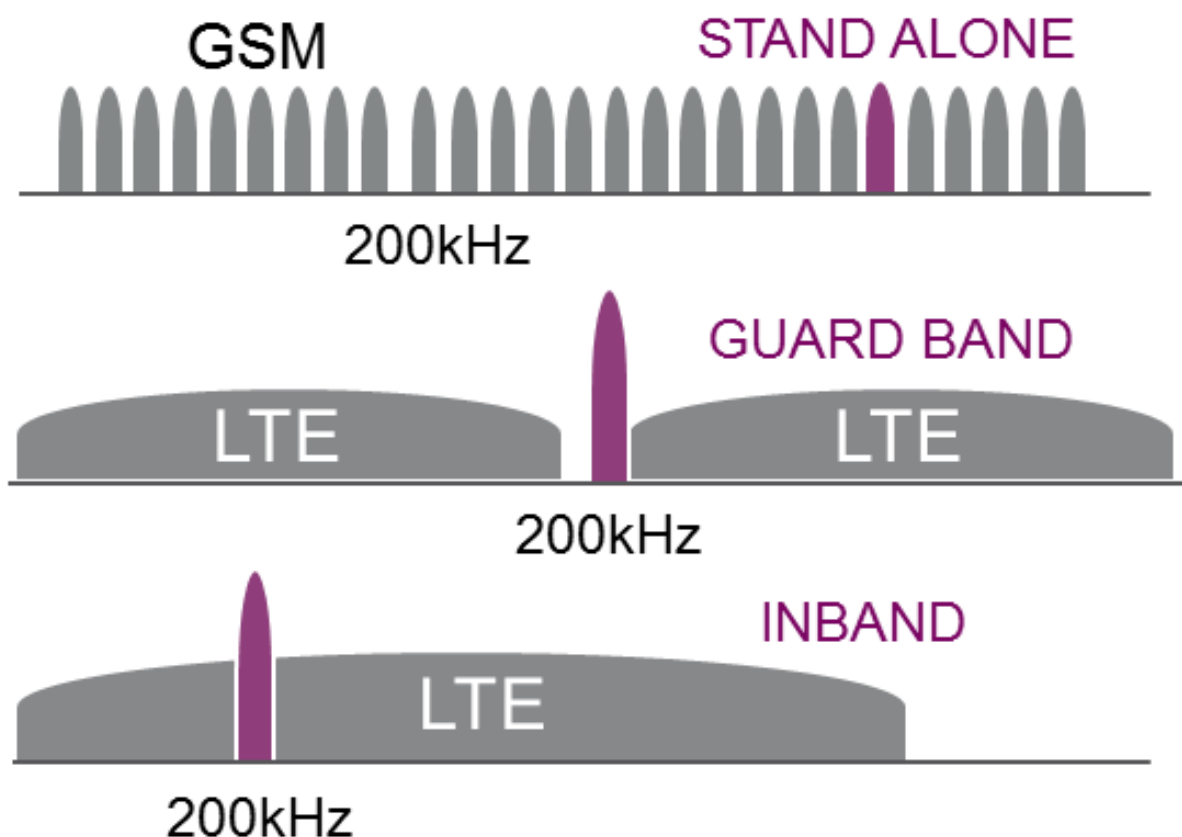
2.2.3 NB-IoT

Třetí a poslední síť vytvářená v České republice pro účely IoT se nazývá Narrow-Band Internet Of Things (NB-IoT). Ta byla definována v roce 2016 skupinou The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) v jejich třináctém vydání (LTE Advanced Pro) adresovaném pro IoT trh. Tuto síť známou ještě pod názvem LTE-M2 zde v současnosti budují a rozšiřují mobilní operátoři T-Mobile, O2 i Vodafone. Stejně jako u předchozích technologií, i tato síť slouží pro k propojení širokého spektra IoT zařízení, s cílem maximalizace dosahu připojení a minimalizace energetických nároků. Největším rozdílem je ovšem využití existující komunikační infrastruktury mobilních operátorů, kde pouhá úprava softwaru na vysílacích stanicích umožní vyhradit část pásma pro internet věcí. To pro operátory znamená, že není potřeba instalovat žádný dodatečný hardware jako u předchozích technologií [6].

²¹Převzato z: <https://lora-alliance.org/>

Díky koexistenci se stávajícími mobilními sítěmi 2G, 3G a 4G, NB-IoT disponuje jejich bezpečnostními funkcemi jako je například ověření totožnosti uživatele, integrity dat nebo identifikace mobilního zařízení. Nevýhodou se může zdát nutnost použití SIM karty, která bude v modulu zabudovaná či bude nabízet možnost výměny. Uživatel tedy po zakoupení a následném spuštění zařízení aktivuje SIM kartu, které se spojí s NB-IoT sítí. NB-IoT pracuje ve třech různých módech: Stand-alone, Guard band a In-band [20].

- **Stand-alone** znamená provoz NB-IoT v rámci jiného pásma než LTE. V případě využití GSM se zde výhodně projeví fakt, že 200 KHz odpovídá šířce pásma jednoho kanálu.
- **Guard Band** používá doposud volných hraničních pásem (100 kHz) oddělujících dvě odlišně používané LTE frekvence (například dvěma operátory). Ty v případě nenavazujících LTE pásem dají dohromady 200 kHz.
- **In-band** využívá minimálně jednoho rádiového bloku LTE (200kHz) pro potřeby NB-IoT



Obrázek 2.12: Módy technologie NB-IoT²²

²²Převzato z: <https://www.netmanias.com/en/post/blog/11745/iot-nb-iot/nb-iot-the-choice-of-frequency-deployment-mode-and-coverage>

Princip komunikace je zde velmi podobný jako s předchozími LPWAN technologiemi. Zařízení vysílají nebo přijímají data z nejbližší NB-IoT základnové stanice, odkud jsou přeposlána do nadřazeného serveru(cloudu). Tam jsou data uložena, zpracována a následně zpřístupněna koncovému uživateli přes webovou stránku či mobilní aplikaci [23].

V současnosti je v České republice pokrytí touto technologií prakticky stoprocentní díky mobilnímu operátoru Vodafone²³. Druzí dva operátoři svoje sítě zatím pomalu rozšiřují a testují jejich funkčnost po malých částech. V případě NB-IoT lze seznam použitelného hardware nalézt na stránkách Global System for Mobile Communications (GSMA), kde jsou produkty od různých výrobců jako je například Quectel, u-blox nebo Telit²⁴.

2.2.4 Alternativy

Předchozí výčet LPWAN sítí není zdaleka celý a za hranicemi České republiky se můžeme setkat s celou řadou dalších technologií. Mezi ty patří například Weightless, WavIoT, Wi-SUN nebo RPMA od Ingenu. Dále také technologie založené na mobilních sítích jako je LTE-M (LTE-MTC, Cat-M1) nebo EC-GSM-IoT (Extended Coverage GSM), které jsou podobně jako NB-IoT zdefinovány skupinou 3GPP (v dřívějších vydáních) [18].

2.2.5 Shrnutí

V současné době je velmi obtížné určit, která z LPWAN technologií je nejlepší. To je dáno především faktem, že jsou všechny sítě poměrně nové a nemají ještě svoje pevné místo ve světě IoT. To by se ovšem mělo v blízké době změnit a proto je vhodné patřičně zvážit, kterou technologii si vybrat. Podobně jako u technologií pro sítě krátkého dosahu, mezi kritické faktory pro volbu LPWAN technologie (viz tabulka 2.3) můžou patřit následující:

- Nízké investiční náklady na výstavbu infrastruktury
- Odolnost vůči rušení a zabezpečení sítě
- Kapacita sítě (maximální počet uzlů v síti)
- Pokrytí v dané oblasti
- Hardware možnosti připojení do sítě
- Jednosměrná vs. obousměrná komunikace
- Latence systému
- Cena za služby

²³<https://www.vodafone.cz/en/about-vodafone/press-releases/message-detail/vodafone-dokoncil-pokryti-ceske-republiky-siti-pro/>

²⁴<https://www.gsma.com/iot/mobile-iot-modules/>

Zatímco Sigfox se v oblasti LPWAN technologií chlubí nejnižšími náklady a celosvětovým měřítkem, jeho omezení zasílaných zpráv za den ho limituje na užší spektrum aplikací. Technologie LoRa jako jediná nabízí možnosti update firmwaru „vzduchem“, tedy že si modul sám stáhne potřebné soubory a automaticky provede aktualizaci [24]. Další výhodou je její odolnost vůči pohybu koncových zařízení ve vysoké rychlosti a jednoduchá realizace pokrytí relativně malých území [25]. Na druhou stranu je nevýhodou snižující se datový tok s přibývajícými koncovými zařízeními ve stejné síti [26]. Jelikož NB-IoT zařízení využívají licencovaného pásma mobilních operátorů, dosahují také nejvyšší rychlosti v porovnání s druhými dvěma technologiemi. Prozatímni největší problém NB-IoT je nedostatek komerčních koncových zařízení za dostupnou cenu. V současnosti se tedy jeví jako vhodná volba spíše pro společnosti ochotnými připlatit si za velmi nízkou odezvu a vysokou kvalitu služeb [17].

Tabulka 2.3: Srovnání LPWAN technologií působících na území České republiky

Technologie	SigFox	LoRa	NB-IoT
Frekvenční pásmo	Nelicencované ISM 868 MHz (EU) 915 MHz (USA) 433 MHz (Asie)	Nelicencované ISM 868 MHz (EU) 915 MHz (USA)	Licencované LTE pásmo
Modulace	UNB/GFSK/DBPSK	\gls{CSS}	OFDMA/SC-FDMA
Dosah	město - 10km venkov - 50km	město - 5km venkov - 15km	město - 8km venkov - 25km
Datový tok	100 bit/s max. 12/8 bytes zpráva	50 kbit/s	250 kbit/s
Energetická spotřeba	Velmi nízká	Velmi nízká	Velmi nízká
Životnost baterie	až 10 let	až 10 let	až 10 let
Budget link	146 dB	154 dB	150 dB
Odolnost proti rušení	Velmi vysoká	Velmi vysoká	Nízká
Mobilita	Ano	Ano	Limitovaná
Lokalizace	Ano	Ano	Ne
Typ komunikace	Uplink / downlink	Uplink / downlink	Uplink / downlink

Nutno podotknout, že i přes dávno fungující infrastrukturu mobilních sítí po celém světě, která je nesmírnou výhodou NB-IoT, existují stále oblasti, které jsou pokryty pouze technologiemi LoRa a Sigfox. To se v brzké budoucnosti nejspíš rychle změní a pokrytí NB-IoT bude celosvětově mnohem větší než u druhých dvou případů [27]. V případě lokálního pokrytí (8000 m²), které bylo testováno v dánské oblasti North Jutland, byly všechny technologie schopné pokrýt více jak 95 % vnitřních prostor se ztrátou signálu 20 dB. Sigfox a NB-IoT oproti technologii LoRa ovšem prokázaly lepší schopnost uplinku a menšímu množství selhaných odeslání [28].

Kapitola 3

Vestavěný systém

Vestavěný systém je primárně jednoúčelový systém s cílem plnění specifických funkcí, a právě díky této vlastnosti je jeho cena mnohonásobně nižší než u klasických osobních počítačů. Může se například jednat o domácí spotřebiče, průmyslová zařízení, hračky, mobilní zařízení apod. Vzhledem k současným technologiím a vysokým výpočetním výkonům, dokáží dnešní vestavěné systémy provádět několik úloh naráz, a tak se stávají velmi populární nejen v profesionální sféře [29].



Obrázek 3.1: Nejpopulárnější výrobci - Raspberry Pi, Arduino, BeagleBoard a Orange Pi

Jedním z druhů vestavěného systému je jednodeskový počítač neboli Single Board Computer (SBC). Ten je postavený na jednom plošném spoji a krom základních komponent jako je Central Processing Unit (CPU) a paměť, obsahuje většinou i Graphical Processing Unit (GPU) a celou řadu vstupně/výstupních periférií. Vzhledem k nepřehlednému množství SBC na trhu, se v této práci zaměřím pouze na ty nejrozšířenější a nejpopulárnější. Jedná se například o produkty od značky Raspberry Pi (RPi), Arduino či BeagleBoard [30]. Široký výčet všech možných SBC a jejich srovnání lze nalézt na různých internetových stránkách věnujících se této problematice²⁵. Některé stránky dokonce umožňují si vyfiltrovat produkty podle různých parametrů a nakonec si je dát k porovnání s ostatními²⁶.

²⁵<https://www.postscapes.com/internet-of-things-hardware/>

²⁶<https://www.board-db.org/>

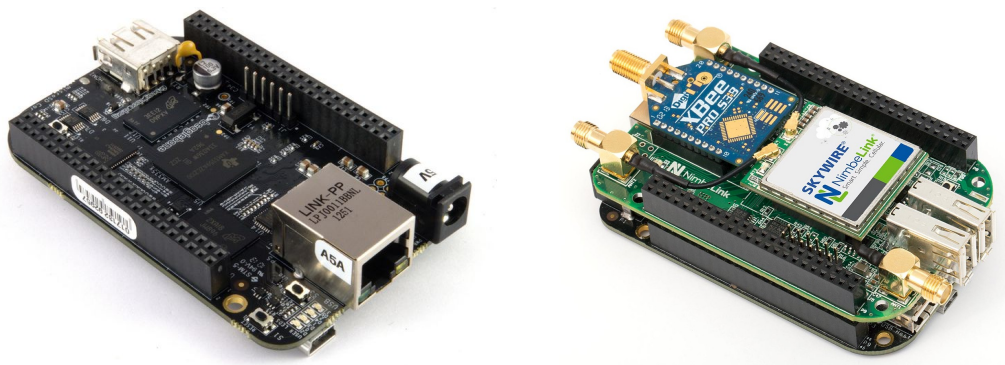
3.1 BeagleBoard

Náhly rozmach vestavěných platform v komerční sféře byl odstartován projektem *Beagle* společnosti Digi-key ve spolupráci s Texas Instruments a Newark Elements 14. V rámci tohoto projektu byl v červenci roku 2008 vyroben historicky první plně funkční open-source jednodeskový počítač jménem BeagleBoard. Od té doby bylo vydáno několik dalších modelů, které jsou shrnuty v následující tabulce (viz tabulka 3.1). Všechny modely jsou postaveny na procesoru Advanced RISC Machine (ARM) a skýtají možnosti použití celé řady operačních systémů (např. Debian, Ubuntu či Android). Dalším společným rysem je tlačítko pro reboot systému, možnost USB klienta pro připojení k počítači nebo Network Time Protocol (NTP) časová synchronizace. Možnosti této platformy jsou opravdu široké a krom samotného výzkumu je populární i v oblastech robotiky, SmartHomes, práce s drony nebo IoT [31].

Tabulka 3.1: Srovnání produktů BeagleBoard

Model	BeagleBoard	BeagleBoard xM	BeagleBone	BeagleBone Black	Beagleboard-X15	PocketBeagle
Vydání	2008	2010	2011	2013	2016	2017
Cena	125 \$	149 \$	89 \$	45 \$	260 \$	25 \$
SDRAM	128 MB	512 MB			2048 MB	512 MB
CPU	OMAP3530 ARMCortex A8 @ 720 MHz	AM37x ARMCortexA8 @ 1 GHz			Dual ARM Cortex-A15 Dual ARM M4 @ 212 MHz Quad PRU @ 200 MHz	Octavo Systems OSD3358 ARM Cortex-A8 @ 1GHz
GPU	Power VR SGX530	Power VR SGX530			DualPower VR SGX544	Power VR SGX530
DSP	TMS320C64x+	TMS320C64x+			Dual TMS320C66X	-
USB porty	1 (OTG)	4			7 (1x microUSB)	1 (OTG)
WiFi						
Bluetooth	-					
Ethernet	10/100 Mbit/s				2x 10/100/1000 Mbit/s	-
Video In	-	-			jack 3,5 mm	-
Video Out	DVI-D	DVI-D, S-video			HDMI	-
Audio In	-				jack 3,5 mm	-
Audio Out	-	jack 3,5 mm			HDMI	-
Ostatní	McBSP, JTAG UART, McSPI, DSS, I2C, PWN	McBSP, DSS, I2C, UART, McSPI			UART, GPMC, SPI, I2C, ADC, CAN bus	UART, PWM, SPI, I2C, ADC, CAN bus
Uložiště	MMC, SD, SDIO	MMC, SD			8-bit eMMC 4 GB, MicroSD	MicroSD
Napájení	Mini USB or 2.1 mm x 5.5 mm 5 V jack					MicroUSB

Mezi nejpopulárnější model patří BeagleBone Black, a to zejména z důvodu nízké pořizovací ceny a vysokého výpočetního výkonu. Další jeho výhodou je možnost použití takzvaných *Capes* a *PocketCapes*, které jsou právě kompatibilní s modely řady BeagleBone²⁷. Ty fungují jako rozšiřující desky a poskytují celou řadu dalších možností pro připojení různých modulů a periférií.



Obrázek 3.2: BeagleBone Black²⁸ a BeagleBone GPS/LTE Cape²⁹

Na základě modelu BeagleBone Black byl vytvořen produkt BeagleBone Green (44 \$) od firmy SeedStudio. Ten disponuje silnějším grafickým procesorem a možností použití *Grove modules*, jakožto rozšiřovacích modulů speciálně vyvíjených pro produkty firmy SeedStudio. Jednou z nevýhod je potom absence High Definition Multimedia Interface (HDMI). K tomuto modulu byla ještě vytvořena o trochu dražší verze (53 \$) verze Wireless, která disponuje technologií WiFi a Bluetooth 4.1 s BLE (to za cenu chybějícího Ethernet portu). Posledním nezmíněným modelem je BeagleBone Blue (79 \$), který je postavený na modelu Green Wireless a byl speciálně vyvinut jako robotický kontrolér s celou řadou integrovaných senzorů.

3.2 Raspberry Pi

Raspberry Pi (dále jen RPi), série produktů malých jednodeskových počítačů vyráběných neziskovou organizací Raspberry Pi Foundation ve Velké Británii. Původně byla vyvíjena jako nástroj v oblasti vzdělávání, ale to ještě nikdo netušil, jakým se stane hitem nejen mezi mladistvými. To dokazuje nespočetně velké množství projektů od velmi rozsáhle komunity, která se rozrůstá každým dnem. Jedním z dalších stěžejních faktorů této popularity může právě být nízká pořizovací cena a velký výpočetní výkon, kterou se tato platforma chlubí [32]. Porovnání jednotlivých modelů RPi a výpis charakteristických parametrů jednodeskových počítačů je níže (viz tabulka 3.2).

²⁷<https://beagleboard.org/capes>

²⁸Převzato z: <http://beagleboard.org/black>

²⁹Převzato z: <https://nimbelinek.com/skywire-beaglebone-black-modem/>

Nevyjmenovanými společnými rysy jednotlivých modelů je procesor založený na architektuře ARM a GPU-Broadcom VideoCore IV s OpenGL ES 2.0, OpenVG 1080p30 a H.264 vysokým profilem kódování/dekódování. Dále možnost použití Digital Serial Interface (DSI) pro připojení displeje a schopnost sériové komunikace Inter-Integrated Circuit (I²C), Serial Peripheral Interface (SPI), či Universal Asynchronous Receiver-transmitter (UART) po General Purpose Input/Output (GPIO) pinech.

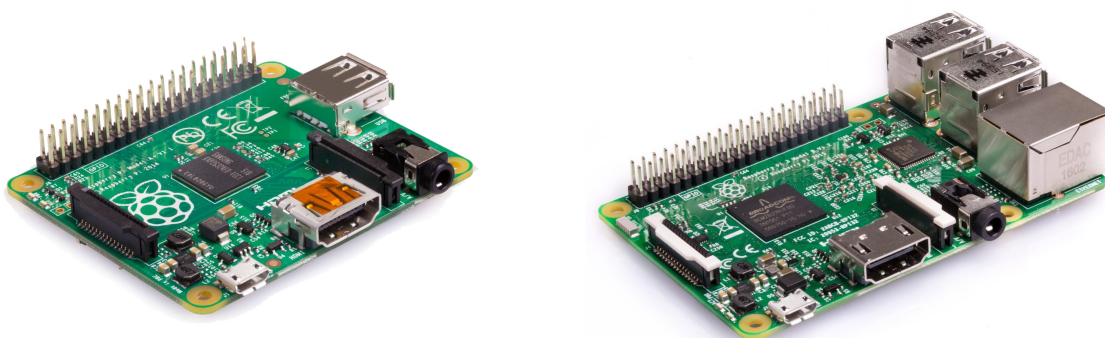
Tabulka 3.2: Srovnání modelů RPi

Model RPi	1 A	1 B	1 A+	1 B+	2 B	3 B	3 B+	ZERO	ZERO W
Vydáno	2013	2012	2014	2014	2015	2016	2018	2015	2017
Cena	25 \$	35 \$	20 \$	25 \$	35 \$	35 \$	35 \$	5 \$	10 \$
Architektura	ARMv6Z (32-bit)				ARMv7-A (32-bit)	ARMv8-A (64/32-bit)		ARMv67(32-bit)	
SoC Broadcom	BCM2835				BCM2836	BCM2837	BCM2837B0	BCM2835	
SDRAM	256 MiB	512 MiB	256 MiB	512 MiB	1024 MiB			512 MiB	
GPU	250 MHz					400 MHz		250 MHz	
CPU	ARM1176JFZ-S @ 700 MHz				Quad Cortex A7 @ 900 MHz	Quad Cortex A53 @ 1,2 GHz	Quad Cortex A53 @ 1,4 GHz	ARM11 @ 1 GHz	
USB porty	1	2	1	4				1 (MicroUSB - OTG)	
WiFi	-	-	-	-	-	802.11n	802.11b/g/n/ac	-	802.11n
Bluetooth	-	-	-	-	-	4.1 LE	4.2 LE	-	4.1 LE
Ethernet [Mbit/s]	-	10/100	-	10/100	10/100	10/100	10/100	-	-
Video In	Camera Serial Interface (CSI)							-	CSI
Video Out	HDMI, RCA		HDMI, jack 3,5 mm				Mini-HDMI GPIO		
Audio In	Inter-IC Sound (I ² S)								
Audio Out	I ² S, jack 3,5 mm, HDMI							Mini-HDMI GPIO	
Uložiště	SD		MicroSD						
Napájení	5 V DC pomocí MicroUSB nebo GPIO								

I přes obrovskou popularitu má RPi stále řadu nedostatků. Jedním je například neschopnost naboťování operačního systému z externího či USB disku. Dalším neduhem (podobně jako u platformy BeagleBoard) jsou chybějící vnitřní hodiny neboli Real-time Clock (RTC), které si drží přesný čas i po odpojení zařízení ze sítě. Hodiny se vždy aktualizují po připojení k internetu a pokud dojde k jeho odpojení, tak se zařízení snaží čas určovat díky známému taktu procesoru. To ovšem po nějaké době vede k rozladění od skutečného času, kde s nabývajícím dobou je aproximace čím dál horší. V neposlední řadě se dá považovat za nedostatek chybějící integrovaný AD převodník, který vede k potřebě použití jiných externích komponent [33]. Těch je na internetu celá řada a před samotným zakoupením je vždy dobré si ověřit jejich kompatibilitu s RPi³⁰. Při používání externích USB zařízení je potřeba počítat s limitací proudu 100 mA na USB port [34].

³⁰http://elinux.org/RPi_VerifiedPeripherals

Aby došlo k co největší minimalizaci spotřeby RPi, je vždy dobré, abychom od platformy odpojovali veškerá nepoužívaná zařízení. Dále co nejvíce pracovali v režimu offline a nezatěžovali systém připojováním do sítě pomocí WiFi či Ethernetu, což může vést až k 30% úspoře energie [35]. Další možností by mohlo být přetaktovat procesor směrem dolů a snížit tak výkon celého zařízení. Pokud bychom ovšem chtěli učinit naopak a výkon zvýšit na víc než je standardní takt, tak je zapotřebí využít externího chlazení (větráček nebo žebra) [36].



Obrázek 3.3: Raspberry Pi 3³¹

3.3 Arduino

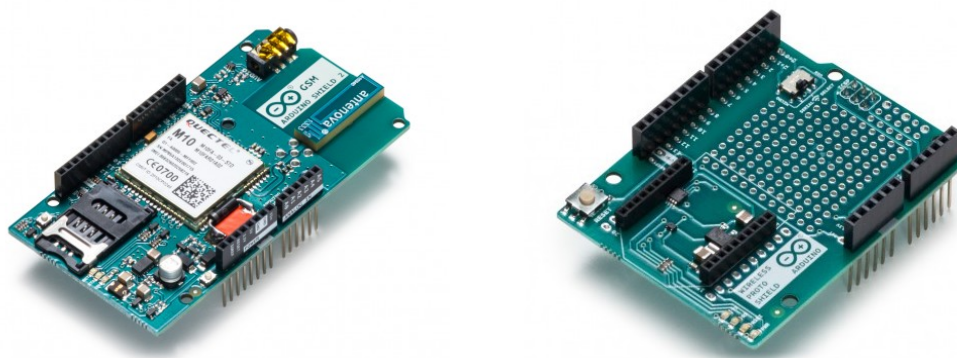
Arduino, další z řady jednodeskových počítačů, je vývojová platforma postavená na mikroprocesorech ATmega od společnosti Atmel. Na rozdíl od ostatních platforem, slouží většina produktů Arduino jako pouhý mikrokontrolér (bez operačního systému). Znovu se jedná o open-source platformu, a tak se lze na internetu setkat s celou řadou jeho napodobenin (Freeduino, Funduino, Femtoduino apod.). Arduino bylo vytvořené za účelem interakce s celou řadou senzorů, a to díky četnému obsahu vstupních a výstupních periférií. Podobně jako RPi obsahuje GPIO piny, které se dají použít k připojení celé řady rozšiřujících desek (shields). Je tedy vhodný pro hardware projekty, ve kterých chceme pracovat se vstupními daty ze senzorů či něco manuálně ovládat, aniž bychom potřebovali plný operační systém, který by mohl být pohou přítěží celého zařízení.

³¹Převzato z: <https://www.raspberrypi.org/products/>

Od prvního modelu, který byl vytvořen jako studijní pomůcka v italském institutu Interaction Design Institute Ivrea roku 2003, bylo vytvořeno obrovské množství dalších. Arduino rozlišuje svoje produkty podle využití do několika kategorií: board (jednodeskový počítač), modul, shield, kit a další příslušenství (například USB2Serial konvertor). Níže jsou vypsané produkty typu board z jednotlivých kategorií:

- **Entry level:** Uno, Leonardo, 101, Esplora
- **Enhanced features:** Mega, Zero, Due, Mega ADK, M0, M0 PRO
- **Internet of Things:** YÚN, Industrial 101, Leonardo ETH
MKR FOX 1200, MKR WAN 1300, MKR GSM 1400
- **Wearable:** Gemma, Lilypad Arduino USB, Lilypad Arduino Main Board, Lilypad Arduino Simple, Lilypad Arduino Simple Snap

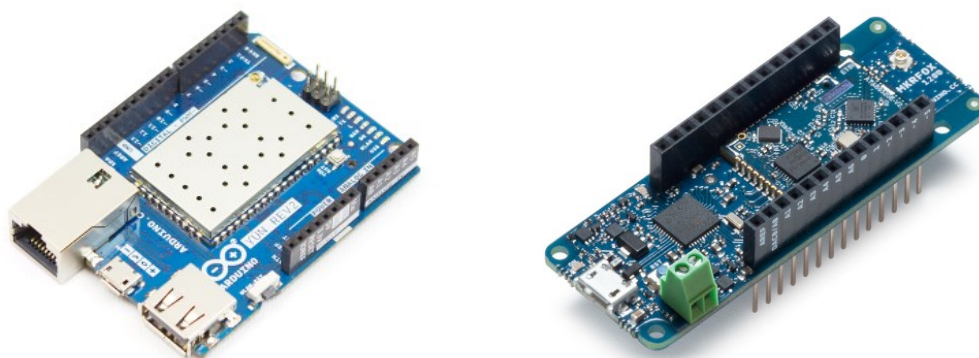
Právě kategorie Internet of Things je pro nás klíčová. V téže kategorii mezi další zajímavé produkty patří Arduino GSM Shield s integrovanou anténou, který poskytuje možnost využití telefonních služeb jako je zaslání/přijímání SMS či připojení k internetu. Dále produkt Arduino Wireless Shield, který umožňuje bezdrátovou komunikaci za pomoci Xbee modulu.



Obrázek 3.4: Arduino GSM Shield a Arduino Wireless Shield³²

V následující tabulce (viz tabulka 3.3) jsou vypsané a porovnány technické specifikace modelů vhodných pro využití v oblasti IoT. Je důležité si povšimnout, že žádný z modelů neobsahuje konvenční vstupně/výstupní periferie pro audio či video. Na druhou stranu disponují analogovými a digitálními vstupy, které v případě řady MKR mohou sloužit pro použití implementovaného AD (8/10/12 bit) či DA (10 bit) převodníku. Model Industrial 101 se od modelu YÚN liší pouze v absenci USB a Ethernet portu. Oba tyto modely se ovšem oproti řadě MKR liší implementovaným mikroprocesorem, na kterém běží operační systém Linux [37].

³²Převzato z: <https://www.raspberrypi.org/products/>

Obrázek 3.5: Arduino YÚN a Arduino MKR Fox 1200³²

K programování Arduina se běžně používá programovací jazyk C či C++. Vzhledem k širokému spektru uživatelů o různém věku a zkušenostmi s programováním, byl pro zjednodušení vytvořen druhý programovací jazyk jménem Arduino (včetně unikátního Integrated Development Environment (IDE)) [38]. Ten je založený na základě open-source programovacího jazyku Wiring³³ vytvořeného primárně k programování mikrokontrolerů.

Tabulka 3.3: Srovnání Arduino produktů určených pro IoT

Model	YÚN Rev. 2	MKR Fox 1200	MRK WAV 1300	MKR GSM 1400
Vydáno	2018	2017	2017	2017
Cena	49 £	35 £	35 £	59 £
Mikrokontrolér	Atmega32U4 @ 16 MHz	SAMD21 Cortex-M0+ 32bit low power ARM MCU @ 48 MHz		
SRAM	2,5 kB	32 kB		
EEPROM	1 kB	-		
Flash Paměť	32 kB	256 kB		
Analog I/O piny	12	8		
Digital I/O piny	20	1		
USB porty	1 (2.0)	-		
Komunikace	WiFi (802.11b/g/n) Ethernet (10/100 Mbit/s)	Sigfox (EU) 2dB anténa	Lora (EU, USA) 2dB anténa	GSM (Global) 2dB anténa
Ostatní	PWM (7)	PWM (12), UART, SPI, I ² C, ADC (3), DAC(1), RTC		
Výstupní proud z I/O pinů	40 mA	7 mA		
Uložiště	MicroSD	-		
Napájení	5 V DC pomocí micro USB			
CPU	Atheros AR9331 @ 400 MHz	-		
RAM	64 MB	-		
Flash Paměť	16 MB	-		

³³<http://wiring.org.co/>

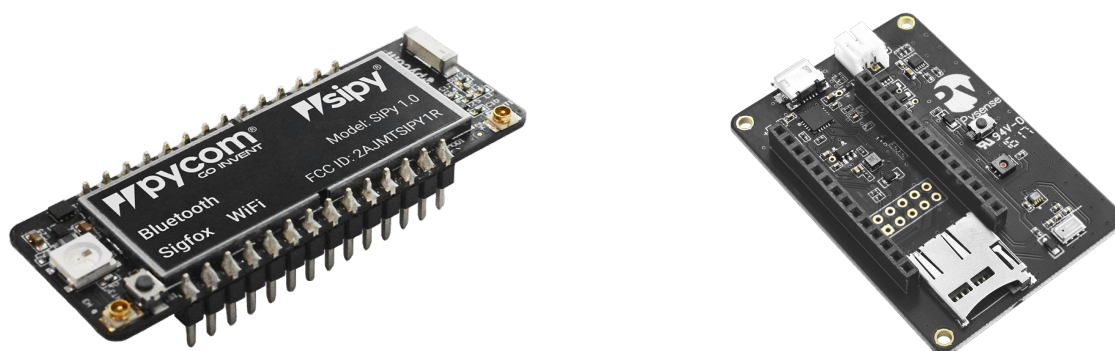
3.4 Pycom

Společnost Pycom přišla s celou řadou zajímavých IoT produktů běžících na CPU modelu Espressif ESP32. Ty pojmenovala podle bezdrátových technologií, kterými daný produkt disponuje (viz tabulka 3.4). Tato platforma obsahuje AD převodník (12 bitů), RTC, Pulse Width Modulation (PWM) a 24 GPIO pinů, dále sériové protokoly UART, SPI, I²C a I²C. Krom samotných vývojových desek, společnost vyrábí i rozšiřující desky jako je například Pysense. Ta rozšiřuje zařízení o akcelerometr, barometr, teploměr, senzor na měření vlhkosti vzduchu a množství světla v okolí.

Tabulka 3.4: Produkty značky Pycom

Model	WiPy	SiPy	LoPy	LoPy4	Gpy	FiPy
Cena	20 \$	30 \$	35 \$	35 \$	44 \$	54 \$
WiFi	x	x	x	x	x	x
Bluetooth	x	x	x	x	x	x
SigFox	-	x	-	x	-	x
LoRa	-	-	x	x	-	x
LTE-M	-	-	-	-	x	x

Tato platforma se programuje pomocí programovacího jazyku MicroPython, který vychází z klasického jazyku Python 3.5. Na rozdíl od něj obsahuje pouze omezené množství funkcí a podporovaných knihoven. Z tohoto důvodu je vhodný pouze na jednoduché úlohy a aplikace. Tento jazyk je primárně optimalizovaný pro řízení mikrokontrolerů a proto by měl být jeho vývojový proces mnohem jednodušší a rychlejší než v případě programovacího jazyku C.



Obrázek 3.6: SiPy a Pysense³⁴

³⁴Převzato z: <https://pycom.io/hardware/>

3.5 Alternativy

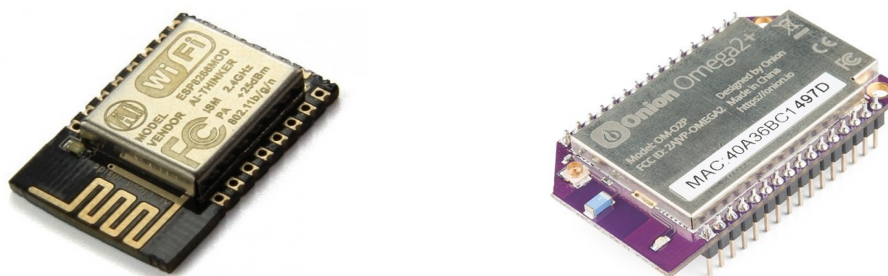
Na trhu existuje ještě celá řada dalších jednodeskových počítačů či mikrokontrolerů použitelných v oblasti IoT. Většina z nich ovšem nenabízí nic nového oproti výše řečeným platformám a mnohdy jsou pouze odlišné v otázkách výkonu, spotřeby energie či vstupně/výstupních periférií. Mezi nejznámější takové produkty a značky patří:

- Banana Pi
- FireFly
- PixiePro
- PINE64
- NanoPi
- Udo
- PandaBoard
- DragonBoard
- LinkIT
- ASUS Tinker Board
- CubieBoard
- CHIP

Zajímavostí je, že donedávna byla většina těchto jednodeskových počítačů vyráběna s co největší možnou univerzálností a vysokým výkonem nehledě na jeho spotřebu. Primárně tedy tak, aby je uživatel mohl použít na co největší množství aplikací. To se s nástupem IoT velmi rychle mění a výrobci zaměřují svoje produkty na konkrétní aplikace se snahou o co nejnižší energetické nároky samotných zařízení. Právě dále zmíněné platformy byly vybrány s ohledem na jejich specializaci v IoT.

ESP8266

Pokud by naším projektem měl být velmi jednoduchý senzor poskytující technologii WiFi (802.11 b/g/n). Není lepšího řešení než zakoupit mikrokontrolér ESP8266 za necelých 200 Kč. Ten disponuje 17 GPIO piny s možností využití I²C, I²S, UART a PWM. Další zajímavou schopností je kompatibilita s Arduino Uno a možnosti dálkového ovládání pomocí infračerveného záření. ESP8266 je tedy ideální řešení tam kde není potřeba drahých platform se silným CPU, velkou Random-access memory (RAM) a velkým množstvím periférií (USB, HDMI atd.) [37].



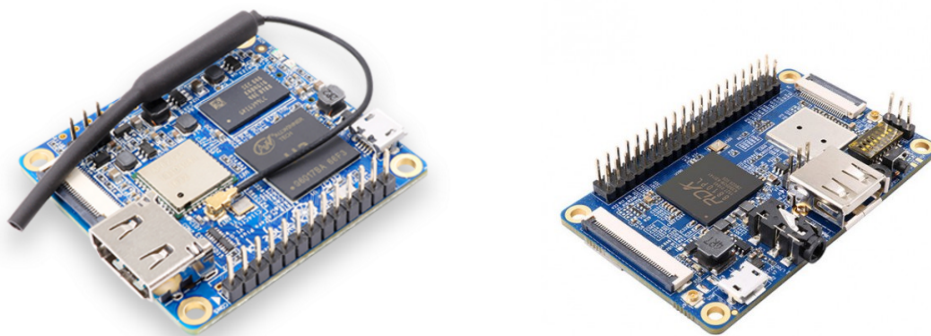
Obrázek 3.7: ESP8266³⁵ a Omega 2 Plus³⁶

Omega 2 Plus

Podobným typem zařízení jako ESP8266, je Omega 2 Plus, která se dá pořídit za necelých 230 Kč. Ta na rozdíl od předchozího mikrokontroléru disponuje speciální verzí operačního systému LEDE (Linux Embedded Development Environment) nahraného na MicroSD kartě. Tento Operační Systém (OS) podporuje celou řadu programovacích jazyků (C, C++, Python, NodeJS, PHP atd.), a díky možnosti připojení dalších rozšiřovacích komponent se tato platforma zdá být velmi univerzální.

Orange Pi

Poslední zmíněnou platformou je rodina produktů značky Orange Pi pocházejících z Číny. Tato společnost už vydala celou řadu jednodeskových počítačů, jako jsou například Orange Pi One, Lite, Plus nebo Prime. Mezi zajímavé modely patří hlavně Orange Pi Zero a Orange Pi Zero Plus 2, které se velmi podobají dříve zmíněnému Raspberry Pi Zero W. Dále modely Orange Pi 2G-IoT a Orange Pi 4G-IoT s mobilním připojením, které disponují modemy pro používání mobilních sítí za pomoci vložení externí SIM karty. V případě 4G-IOT, který obsahuje velké množství nadstandardních periférií (jack 3,5 mm, zabudovaný mikrofon nebo Infrared Radiation (IR) senzor) není zatím podpora jiného operačního systému než Android 6.0.



Obrázek 3.8: Orange Pi Zero Plus 2 a Orange Pi 2G-IoT³⁷

³⁵Převzato z:

<https://potentiallabs.com/cart/buy-esp-8266-esp12e-online-hyderabad-india>

³⁶Převzato z: <http://tienda.bricogeek.com/onion-omega2/919-onion-omega2-plus.html>

³⁷Převzato z: <http://www.orangepi.org/>

3.6 Možnosti snímání zvuku

V této kapitole bude podán přehled hardware možností snímání zvuku pomocí vestavěných platform. Ty z drtivé většiny umožňují alespoň jednu z následujících metod.

USB periferie

První a nejjednodušší metodou je za pomoci použití USB portů, které nabízí prakticky každá platforma. Přes USB se dá zapojit celá řada mikrofonů, které se dají pořídit zhruba od 50 Kč a výše, v závislosti na kvalitě mikrofonu. Nevýhodou těchto mikrofonů může být nedostatek technických specifikací a integrovaná zvuková karta, která má mnohdy speciální funkce na potlačování šumu nebo automatického zesílení.

Druhou možností je použití USB zvukové karty, které se dají sehnat od zhruba 150 Kč. Ty oproti USB mikrofonům obsahují detailnější technické specifikace a mnohdy nabízí i volbu vzorkovací frekvence (typicky 44,1 a 48 KHz). Běžně používají 16 bitový AD převodník a mikrofonní vstup je realizován pomocí konektoru jack 3,5 mm [39]. K tomuto konektoru se krom klasických mikrofonů dá připojit prakticky jakýkoliv analogový signál.

Protokol I²S

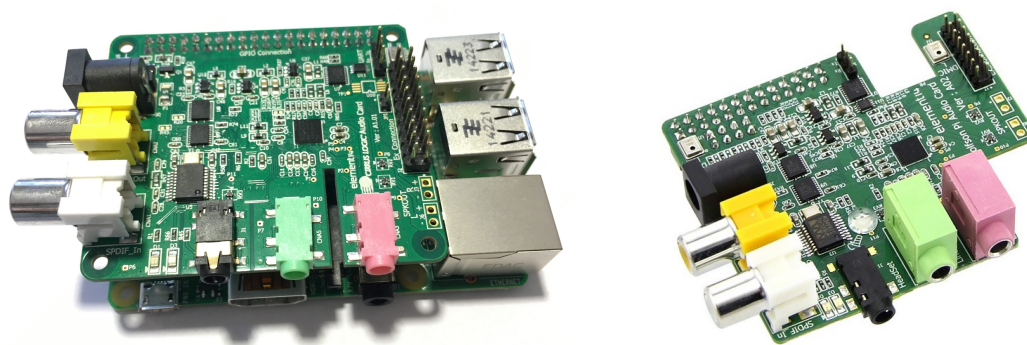
Dalším způsobem snímání zvuku je za pomoci využití sériového protokolu I²S postaveného na standardu firmy jménem Philips Semiconductor (dnes známé pod pouhým jménem Philips). Ten slouží k propojování digitálních zvukových zařízení pomocí synchronního datového přenosu vedeného po třech vodičích: Serial Clock (SCK), Frame Select (FS) a Serial Data (SD).

- **SCK**: udává taktovací frekvenci, která se odvíjí od frekvence vzorkovací, počtu bitů na kanál a celkového počtu kanálů
- **FS**: slouží k volbě kanálu u stereofonního zvuku (levý nebo pravý)
- **SD**: slouží pro přenos sériových dat

Pro správnou funkčnost tohoto protokolu je nutná možnost připojení pomocí GPIO pinů a podpora protokolu daným zařízením. Realizace této metody je mnohdy doprovázena nutností dodatečného stahování a instalace různých knihoven na základě dané platformy.

³⁸Převzato z: https://www.element14.com/community/community/raspberry-pi/raspberry-pi-accessories/cirrus_logic_audio_card/

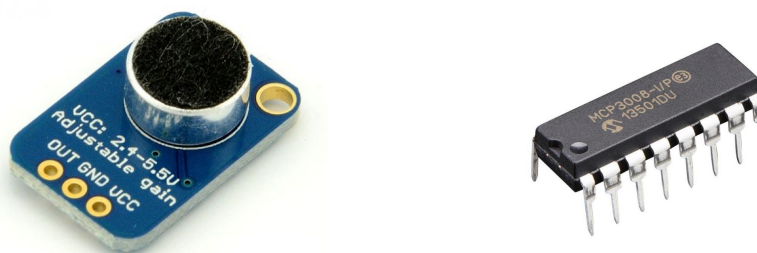
³⁹Převzato z: https://www.element14.com/community/community/raspberry-pi/raspberry-pi-accessories/wolfson_pi

Obrázek 3.9: Cirrus Logic Audio Card³⁸ a Wolfson Audio Card³⁹

Pro produkt RPi vzniklo na této bázi několik velmi kvalitních zvukových karet, jako je například Cirrus Logic Audio Card nebo Wolfson Audio Card (viz obrázek 3.9). Ty se chlubí stereofonním nahráváním díky dvěma mikrofonním vstupům, bitovou hloubkou alespoň 24 bit a vzorkovací frekvenci 192 kHz. Další výhodou je možnost připojení linkového zařízení (např. externího předzesilovače či aktivních reproduktor). Nevýhodou těchto komponent je velká pořizovací cena, která se pohybuje od 1000 Kč nahoru.

AD převodník

V neposlední řadě se nám naskytá možnost poskládat si celý řetězec pro snímání zvuku sami. V této alternativě je zapotřebí si zakoupit a příslušně zapojit mikrofon, zesilovač a A/D převodník. Pokud daná platforma má již AD převodník zabudovaný, tak pouze stačí sehnat mikrofon s integrovaným předzesilovačem. Pak už jen závisí na ceně, jak kvalitní a jaké parametry budou jednotlivé komponenty mít.

Obrázek 3.10: Elektretový mikrofon MAX4466⁴⁰ a A/D převodník MCP3008⁴¹

Například elektretový mikrofon MAX4466 s frekvenčním rozsahem 20-20 KHz a volitelným zesílením (150 Kč). Případně 10-bitový A/D převodník s 8 kanály (100 Kč).

⁴⁰Převzato z: <https://www.kiwi-electronics.nl/elektretmicrofoon-versterker-MAX4466-met-instelbare-gain>

⁴¹Převzato z: <https://thePIhut.com/products/adafruit-mcp3008-8-channel-10-bit-adc-with-spi-interface>

Externí zvukoměr

Pro úplnost bych chtěl zmínit možnost připojení externího zvukoměru. Ten se dá k platformě zapojit pomocí USB kabelu a konverze na některý ze sériových protokolů. Data se potom dají ze zvukoměru stahovat v reálném čase pomocí řady příkazů, které ovšem nejsou běžně volně dostupné (na vyžádání od výrobce). Ty například umožňují vyčítání aktuální hladiny akustického tlaku nebo LEQ za určitý interval.

3.7 Shrnutí

V rámci této kapitoly byly představeny nejrozšířenější produkty v oblasti jednodeskových počítačů a mikrokontrolerů hodících se k účelům IoT. Volba hardware platformy není jednoduchá úloha a základním krokem k jejímu úspěšnému zvládnutí je uvědomění si cíle samotného projektu. Dále je vhodné vybrat si open-source platformu, která zaručuje technickou podporu vzhledem k její rozsáhlé komunitě [30] a rozmyslet si potřebné vstupně/výstupní periferie. Klíčové vlastnosti pro výběr vhodné platformy k praktické části této práce jsou následující:

- Nízká pořizovací cena
- Nízká energetická spotřeba
- RTC
- Dostatek GPIO pinů
- WiFi či Bluetooth
- Možnost připojení LPWAN modulu
- Podpora OS Debian
- Programovací jazyk Python
- Malé rozměry zařízení
- Možnost snímání zvuku
- Open-source

Na základě těchto charakteristik a rysů pro použití v oblasti IoT, byl vytvořen finální výběr vhodných zařízení (viz tabulka 3.5). Je vhodné si povšimnout, že ve v tabulce chybí produkty značky Arduino a Pycom. To zejména z důvodů vysoké ceny a chybějícího OS, na kterém by mohl běžet plný programovací jazyk Python.

Z tohoto výběru by se pro účely praktické části této práce dal použít prakticky jakýkoliv model. Každý produkt v tomto finálním výběru má svoje výhody i nevýhody. Například zařízení CHIP disponuje integrovaným RTC, ale na druhou stranu je jeho spotřeba energie příliš vysoká. Pravým opakem je PocketBeagle, který se chlubí vynikající spotřebou za cenu chybějících periférií a vysoké pořizovací ceny.

Po pečlivém zvážení, byl vybrán model Raspberry Pi Zero W. To zejména z důvodů nízké ceny, relativně nízké spotřeby, možnosti bezdrátové komunikace Bluetooth 4.1 BLE a hlavně nabitými předchozími zkušenostmi v práci s danou platformou.

Tabulka 3.5: Srovnání platforem vhodných pro IoT účely

Model	Raspberry Pi Zero W	Orange Pi 2G-LoT	PocketBeagle	CHIP	PINE 64	NanoPi Duo
Cena	10 \$	10 \$	25 \$	9 \$	15 \$	15 \$
SoC	Broadcom BCM2835	RDA Micro 8810PL	Sitara AM3358	AllWinner R8	AllWinner A64	AllWinner H2+
CPU	ARM11 (32-bit) @ 1 GHz	ARM Cortex-A5 (32-bit) @ 1 GHz	ARM Cortex-A8 (32-bit) @ 800 MHz	ARM Cortex-A8 (32-bit) @ 1 GHz	ARM Cortex-A53 (64-bit) @ 1,2 GHz	ARM Cortex-A7 (32-bit) @ 1,2 GHz
GPU	VideoCore IV	Vivante GC860	PowerVR SGX530	Mali-400	Mali-400 MP2	Mali-400 MP2 600MHz
RAM	512 MB	256 MB	512 MB	512MB	512MB	512MB
USB porty	1	1	1	1	2	2
Ethernet	-	-	-	-	10/100 Mbit/s	10/100 Mbit/s
WiFi	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n	-	802.11 b/g/n	x	802.11b/g/n
Bluetooth	4.1 BLE	2.0	-	4.0	4.0	-
Video In	CSI	CSI	-	CSI	-	-
Video Out	Mini-HDMI	-	-	Mini-HDMI	Mini-HDMI	-
Audio In	-	jack 3,5 mm	-	jack 3,5 mm	jack 3,5 mm	jack 3,5 mm
Audio Out	Mini-HDMI, GPIO	jack 3,5 mm	-	jack 3,5 mm	HDMI, jack 3,5 mm	HDMI
GPIO piny	40	40	44	12	40	32
Ostatní	I ² S	2G-GSM	A/D	RTC	I ² S, SPDIF	IR senzor, CVBS
Spotřeba	400 mA	700 mA	100 mA	1,2 A	800 mA	400 mA
Rozměr [mm]	65 x 30 x 5	68 x 42 x 9	56 x 35 x 5	60 x 40 x 12	127 x 79 x 21	50 x 26 x 3

Kapitola 4

Predikce dat

Slovo predikce vychází z činnosti předpovídání či odhadu budoucnosti, které je zpravidla založeno na analýze dat z minulosti. S predikcí se setkáváme v celé řadě oborů a širokém spektru aplikací:

- Meteorologie: předpověď počasí
- Ekonomie: finanční indexy, směnné kurzy
- Marketing: prodej zboží, poptávka
- Průmysl: energetická spotřeba, elektrické zatížení
- Hazardní hry: odhady sportovních výsledků
- Věda: robotika a mnohé další

4.1 Časová řada

Časová řada je chronologicky uspořádaná posloupnost hodnot, které jsou zpravidla od sebe stejně vzdáleny. Krom toho jestli je časová řada spojitá nebo diskrétní, ji lze klasifikovat ještě podle celé řady dalších hledisek:

- **Charakter dat**
 - Intervalové: závislost dat na délce sledovaného intervalu
 - Okamžikové: vztažení dat k určitému okamžiku

- **Periodicita**
 - Krátkodobé: periodicita kratší než jeden rok (měsíční, týdenní apod.)
 - Dlouhodobé: periodicita delší než jeden rok
- **Podle ukazatele**
 - Absolutní: zaznamenané hodnoty
 - Relativní: odvozené charakteristiky
- **Podle náhodnosti**
 - Deterministické: neobsahují žádný prvek náhody
 - Stochastické: obsahují prvky náhody (reálné jevy)
- **Podle časové vzdálenosti**
 - Ekvidistantní: konstantní časová vzdálenost mezi jednotlivými hodnotami
 - Neekvidistantní: různá časová vzdálenost mezi jednotlivými hodnotami
- **Stacionarita**
 - Stacionární: střední hodnota a rozptyl se nemění (ideálně vůbec)
 - Nestacionární: střední hodnota a rozptyl se v průběhu řady mění

Při klasické analýze a modelování časových řad se vychází ještě z předpokladu, že každá časová řada může obsahovat čtyři následující složky:

- **Trendová:** dlouhodobá tendence časové řady, která odráží dlouhodobý vývoj daného procesu.
- **Sezónní:** pravidelně opakující se odchylka od trendové složky. Odráží periodické změny způsobené střídáním ročních období, různými zvyky apod.
- **Cyklická:** udává periodické změny okolo trendu v důsledku dlouhodobého cyklického vývoje.
- **Náhodná:** nelze nijak popsat funkci času (nahodilá). Zbývá v časové řadě po odstranění předchozích složek.

4.2 Predikční metody

V této kapitole budou vypsány základní metody predikce dat a některé konkrétní s ohledem na využití v praktické části této práce.

4.2.1 Naivní model

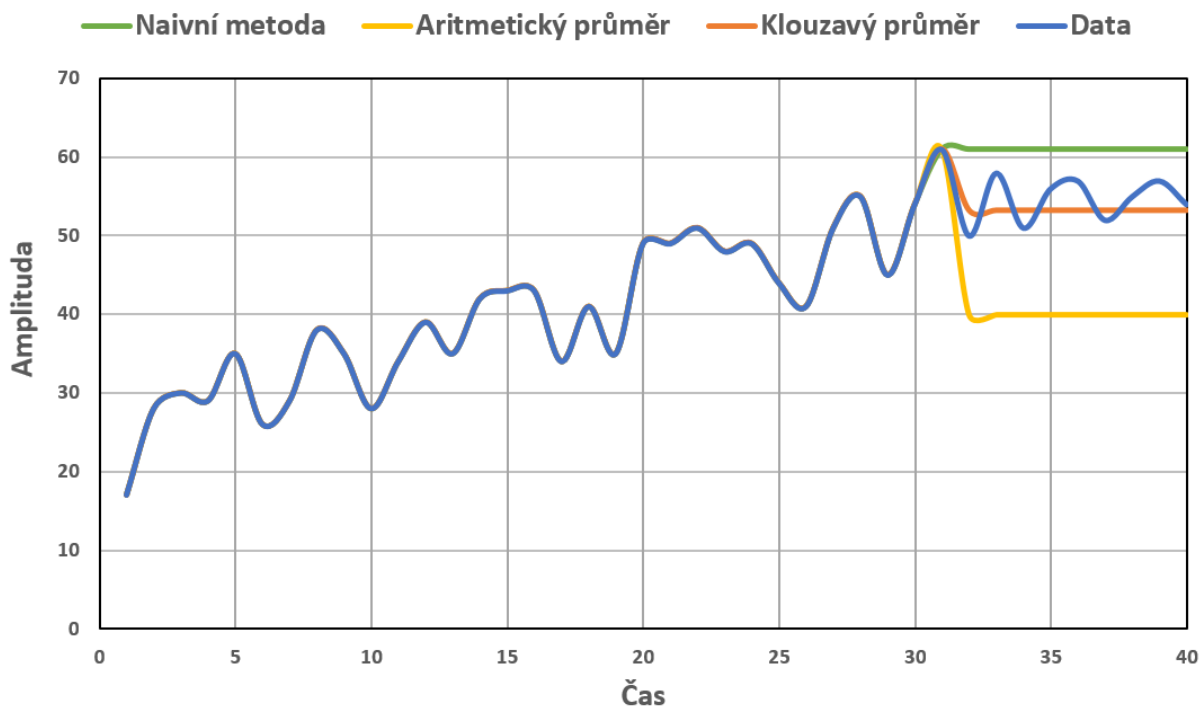
Jedním z nejjednodušších metod pro predikci hodnot, je jednoduché doplnění intervalu o poslední naměřenou hodnotu (viz rovnice 4.1).

$$\hat{y}_{t+1} = y_t \quad (4.1)$$

4.2.2 Aritmetický průměr

Další z velmi jednoduchých přístupů je doplnění intervalu o průměr předchozích hodnot časové řady.

$$\hat{y}_{t+1} = \frac{1}{x} \sum_{i=1}^x y_i \quad (4.2)$$



Obrázek 4.1: Predikce času - jednoduché metody

4.2.3 Klouzavý průměr

Určitým vylepšením aritmetického průměru je potom klouzavý průměr Moving Average (MA) (viz kapitola 4.2.4). Ten reaguje lépe na změny časové řady díky průměrování určitého počtu p posledních hodnot. Interval je potom doplněný o poslední vypočítaný průměr. Klouzavý průměr se ještě dá vylepšit o určité váhování hodnot, kde je každá hodnota před samotným výpočtem ještě korigována pomocí předem nastavených vah w (viz rovnice 4.4).

$$\hat{y}_{t+1} = \frac{1}{p} (y_{i-1} + y_{i-2} + \cdots + y_{i-p}) \quad (4.3)$$

$$\hat{y}_{t+1} = \frac{1}{p} (w_1 \cdot y_{i-1} + w_2 \cdot y_{i-2} + \cdots + w_p \cdot y_{i-p}) \quad (4.4)$$

4.2.4 ARIMA

Autoregresní integrovaný klouzavý průměr neboli Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA), je model schopný pracovat s nestacionárními časovými řadami a skládá se ze tří dílčích částí: Autoregressive (AR), Integrated (I) a MA, které jsou popsány níže [40]. Oproti modelu Autoregressive Moving Average (ARMA) navíc disponuje diferencováním řádu d , které slouží ke stacionarizaci časové řady.

AR

AR model neboli autoregresivní model je založen korelaci hodnot časové řady (viz rovnice 4.5). Střední hodnota AR procesu je nulová a stacionarita je zajištěna jestliže všechny koeficienty b leží vně jednotkové kružnice [41].

$$y_t = b_1 y_{t-1} + b_2 y_{t-2} + \cdots + b_p y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (4.5)$$

kde b jsou koeficienty autoregresivního procesu, ε_t je bílý šum a p řád modelu AR.

MA

MA neboli model klouzavých průměrů je stacionární proces (pro libovolnou volbu parametrů), jehož střední hodnota je nulová (viz rovnice 4.6). Proces je invertibilní pokud všechny kořeny polynomu leží vně jednotkové kruhu (v komplexní rovině) [42].

$$y_t = \varepsilon_t + w_1 \varepsilon_{t-1} + w_2 \varepsilon_{t-2} + \cdots + w_q \varepsilon_{t-q} \quad (4.6)$$

kde w jsou parametry modelu, ε_t je bílý šum a q řád modelu MA.

ARMA

Zkombinujeme-li předchozí dva procesy (AR a MA) a jejich vlastnosti, dostaneme smíšený proces nazývaný ARMA (viz rovnice 4.7). Cílem jeho modelování je najít co nejmenší řády obou procesů při uspokojivém výsledku modelování stacionárních časových řad [42]. Proces ARMA je postaven na předpokladu, že data jsou vysoce stacionární. Stacionarita řady se dá zjistit pomocí celé řady testů, jako je například Augmented Dickey-Fuller (ADF) neboli rozšířený Dickey-Fuller test.

$$y_t = b_1 y_{t-1} + b_2 y_{t-2} + \dots + b_p y_{t-p} + \varepsilon_t + w_1 \varepsilon_{t-1} + w_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + w_q \varepsilon_{t-q} \quad (4.7)$$

kde proměnné jsou shodné s předchozími rovnicemi procesů AR a MA.

Nastavení modelu

Nastavení konkrétního modelu je především věcí zkušenosti analytika. Avšak existuje několik doporučených postupů k určení parametrů modelu tak, aby výsledný proces co nejpřesněji odpovídal charakteru časové řady. Jeden z možných postupů je popsán Box-jenkinson metodikou, která definuje postup pro konstrukci modelu a určení jeho parametrů pomocí tří základních kroků:

1. **Identifikace modelu**
2. **Odhad parametrů modelu**
3. **Validace modelu**

Prvním krokem je zajištění stacionarity časové řady. Proto je nejprve vhodné provést její dekompozici a případně odstranit její časové složky například pomocí diferencování. Právě první řád (viz rovnice 4.8) diferencování slouží k potlačení lineárního trendu a druhý řád (viz rovnice 4.9) k potlačení trendu kvadratického [40].

$$\Delta y_t = y_t - y_{t-1} \quad (4.8)$$

$$\Delta^2 y_t = \Delta(y_t - y_{t-1}) = y_t - y_{t-1} - (y_{t-1} - y_{t-2}) \quad (4.9)$$

Další (spíše empirická) možnost je potom pomocí využití Autocorrelation Function (ACF), která jako vizuální nástroj může pomoci k určení řádu obou procesů. V případě

koeficientu q (AR modelu) se jedná o významnou korelaci signálu při jeho maximálním zpožděním. K určení koeficientu p (MA modelu) dochází potom obdobně, ale pomocí autokorelace s částečným zpožděním Partial Autocorrelation Function (PACF) [43].

Při analýze modelu časové řady můžeme zjistit, že pro danou situaci je vhodné využít víc než jeden typ modelu. Abychom mohli matematicky určit, který model je nejvhodnější, dají se například použít informační kritéria Akaike Information Criterion (AIC) (viz rovnice 4.10) a Bayesian Information Criterion (BIC) (viz rovnice 4.11). Ty jsou založeny na porovnání reziduí jednotlivých modelů prostřednictvím souhrnných statistik [44].

$$\text{AIC} = 2k - 2\ln(\hat{L}) \quad (4.10)$$

$$\text{BIC} = \ln(n)k - 2\ln(\hat{L}) \quad (4.11)$$

kde k je počet parametrů modelu, \hat{L} je hodnota věrohodnostní funkce příslušného modelu pro výběrová data a n počet pozorování.

Další metody

Pro úplnost bych ještě rád zmínil metody, které se zabývají predikcí časové řady s přítomným trendem. Mezi ty patří například exponenciální vyhlazený model, Holtsova metoda, Holt-Wintersova metoda [45] nebo Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA) [46].

4.2.5 Posuzování kvality predikce

Pro kontrolu zdali je náš model správný a predikce odpovídá změřené hodnotě, lze chybu v čase t spočítat následovně:

$$e_t = y_t - \hat{y}_t \quad (4.12)$$

Při posuzování kvality predikce musíme ovšem zahrnout všechny predikované hodnoty v dané časové řadě. K tomu slouží celá řada metrik, mezi které například patří metriky Sum of Squared Errors (SSE), Mean Squared Error (MSE), Mean Absolute Deviation (MAD) nebo Mean Absolute Percent Error (MAPE) [47]. Jednou z nejčastěji používaných metrik je potom MSE (viz rovnice 4.13) a MAPE (viz rovnice 4.14) [42][48].

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2 \quad [-] \quad (4.13)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|y_t - \hat{y}_t|}{y_t} \cdot 100 [\%] \quad (4.14)$$

4.3 Predikce ekvivalentní hladiny akustického tlaku

Vzhledem k dnešním hygienickým limitům povolených hladin hluku, se stává predikce LEQ důležitá nejen v dopravě a průmyslu, ale také jakýchkoliv prostor se zvýšenou hladinou hluku, kde se pohybují lidé po předem stanovenou dobu. V současnosti se nejčastěji setkáme s jejím nasazením právě v dřív zmíněných odvětvích dopravy a průmyslu, kde slouží pro průběžný odhad celkové LEQ a případnému snížení hluku za cílem dodržení předepsaných norem.

Příkladem může být predikce LEQ používaná pro monitorování u větrných mlýnů. Toho se dá docílit pomocí dostupných informací o rychlosti a směru větru, vzdálenosti od zdroje, a hlavně dostatečného množství naměřených statistických dat. Ty potom slouží výpočtům korelace mezi danými veličinami a celkovou ekvivalentní hladinou akustického tlaku. K samotné predikci se využívá celá řada enviromentálních modelů, jako je například ISO 9613-2, CONCAWE, NZS 6808:1998 nebo Nord2000 [49].

Obdobnou metodou dochází k predikci LEQ z dopravního hluku, kde jako vstupní parametry slouží například znalosti o geometrii silnice, hustoty dopravy, rychlosti vozidel nebo vzdálenosti silnice od snímacích zařízení. K výpočtům se používá celá řada modelů, jako například americký model Federal Highway Administration (FHWA), britský Calculation of Road Traffic Noise nebo japonský model ASJ RTN-Model 2008 [50]. Na základě těchto modelů pak vzniká celá řada dalších, které jsou uzpůsobeny podmínkám dané země a konkrétnímu geografickému uspořádání [51][52].

Jednou z dalších oblastí ohrožujících zdraví našeho sluchového aparátu je potom stavbnictví. Zde se nejen využívají znalosti o geometrii prostředí, která je během výstavby dynamická, ale také o právě používaných nástrojích (míchačka, bagr apod.) a jejich časového využití [53].

Tyto práce mají několik shodných rysů. První podobností je tvorba modelu na konkrétní aplikaci neboli využití dostupných vlastností o daném prostředí (např. charakter zdrojů hluku nebo změny v prostředí, které vedou ke zvýšení/snížení hladiny hluku). Druhým rysem je potom využití statistických dat získaných dlouhodobým měřením dané situace. K výpočtu predikce pak lze využít celá řada metod, například pomocí regresních algoritmů, metodami ARIMA či SARIMA nebo populárních neuronových sítí.

Kapitola 5

Návrh systému

V této kapitole bude podrobně popsána funkčnost celého systému pojmenovaného pod pracovním názvem SoundFox. Nejprve bude rozebrán samotný senzor, hardware a algoritmy nutné pro možnost snímání hladiny akustického tlaku. Dále budou popsány principy komunikace od jednotlivých senzorů až k samotnému řídicímu Personal Computer (PC), kde se koná práce s naměřenými hodnotami a běží predikční algoritmus. Sensorová a predikční část, ve které se jedná především o matematické výpočty, jsou napsány v programovacím jazyku Python verze 3.5. Nutno dodat, že tato verze již není kompatibilní s OS Windows XP a staršími distribucemi společnosti Windows⁴².



Obrázek 5.1: OS Raspbian⁴³ a programovací jazyk Python⁴²

5.1 Senzor

Jak již bylo řečeno dříve (viz kapitola 3.7), vybranou platformou pro praktickou část této práce je Raspberry Pi Zero W, která běží na OS Debian. Ten je jednou z nejstarších a nejvíce univerzálních. Díky volné dostupnosti tento operační systém využívá široké spektrum organizací a tisícovky jednotlivců po celém světě. Nejnovější vydání se nazývá Stretch a pro RPi existuje ve dvou verzích, Raspbian Desktop a Raspbian Lite⁴³. Nám pro účely senzoru postačí verze Raspbian Desktop, která je bez grafického rozhraní (pouze příkazový řádek). Tato skutečnost nám ušetří zhruba 1,3 GB na SD kartě.

⁴²<https://www.python.org/downloads/>

⁴³<https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>

5.1.1 Snímání dat

Primárním účelem senzoru je snímání hladiny akustického tlaku. Toho lze v případě RPi docílit pomocí využití GPIO zvukové karty nebo použití vstupních USB portů. Vzhledem k cenám zvukových karet není tato cesta příliš vhodná (viz kapitola 3.6). Byly tedy zakoupeny dva mikrofony s ohledem na co nejnižší cenu a nejvyšší možnou kvalitu (viz tabulka 5.1).

Tabulka 5.1: Technické specifikace testovaných mikrofonů

Název	MI-305 Plug & Play	Gembird MIC-205
Cena	~ 120 Kč	~ 70 Kč
Frekvence od	100 Hz	50 Hz
Frekvence do	16 kHz	16 kHz
Citlivost	- 47 dBV/Pa \pm 4 dB	- 54 \pm 3 dB
Konektor	USB	jack 3,5 mm

Parametr citlivosti je zde velmi orientační vzhledem k nedostatku informací od jednotlivých prodejců. Naštěstí je pro nás tento údaj v zásadě nedůležitý, protože pracujeme již s digitalizovaným signálem. K mikrofonu Gembird MIC-205 byla ještě dokoupena USB zvuková karta Axagon ADA-10 Mini za 100 Kč, která umožňuje převod analogového signálu na digitální, a tudíž možnost použití konektoru jack 3,5 mm. Ta disponuje volitelnou vzorkovací frekvencí 44,1 kHz či 48 kHz a 16 bitovou hloubkou. Karta, podobně jako USB mikrofon, funguje bez jakékoliv instalace ovladačů, jsou to tedy zařízení typu Plug & Play.



Obrázek 5.2: Mikrofon MI-305 Plug & Play⁴⁴ a Gembird MIC-205⁴⁵

⁴⁴Převzato z: <https://shop.pimoroni.com/products/mini-usb-microphone>

⁴⁵Převzato z: <http://gembird.nl/item.aspx?id=7991>

Pro nahrávání pomocí USB zařízení (mikrofon či zvuková karta) je nutné využít některou z Python knihoven zaměřených na práci se zvukem. Mezi ty nejznámější patří Pyaudio⁴⁶, Alsaudio⁴⁷ a Sounddevice⁴⁸. V komunitě RPi je nejvíce doporučena knihovna Alsaudio a Pyaudio. Vzhledem k nevysvětlitelným problémům s knihovnou Alsaudio bylo nakonec rozhodnuto, že se pro budoucí práci bude používat knihovna Pyaudio.

```
# ***** KNIHOVNA PYAUDIO *****
# ----- PARAMETRIZACE -----
import pyaudio as py
import numpy as np
format = py.paInt16
pocet_kanalů = 1
vzorkovaci_frekvence = 48000
delka_ramce = 6000
delka_zaznamu = 10
typ_dat = 'int16'
n_ramcu = int(delka_zaznamu * vzorkovaci_frekvence / delka_ramce)
# ----- OTEVRENI STREAMU -----
audio = py.PyAudio()
stream = audio.open(format = FORMAT,
                    channels = CHANNELS,
                    rate = fs,
                    input = True,
                    frames_per_buffer = frame)
# ----- NAHRAVANI -----
for i in range(0, n_ramcu):
    data = stream.read(delka_ramce, exception_on_overflow=False)
    decoded = np.fromstring(data, typ_dat)
    frames.append(decoded)
# ----- ZAVRENI STREAMU -----
stream.stop_stream()
stream.close()
audio.terminate()
```

Pro správnou funkčnost této knihovny je potřeba nejprve nadefinovat několik parametrů. Pokud vynecháme identifikaci vstupního zařízení, kterou si RPi zvládne udělat samo (pokud do něj není zapojeno více zařízení stejného typu), musíme nadefinovat pouze vzorkovací frekvenci, počet kanálů, délku rámce a typ dat po dekódování (viz. kód výše). Nevýhodou této knihovny může být nutnost použití knihovny Numpy pro správné dekódování dat (nechceme-li pouze data ukládat ve formě .wav souboru).

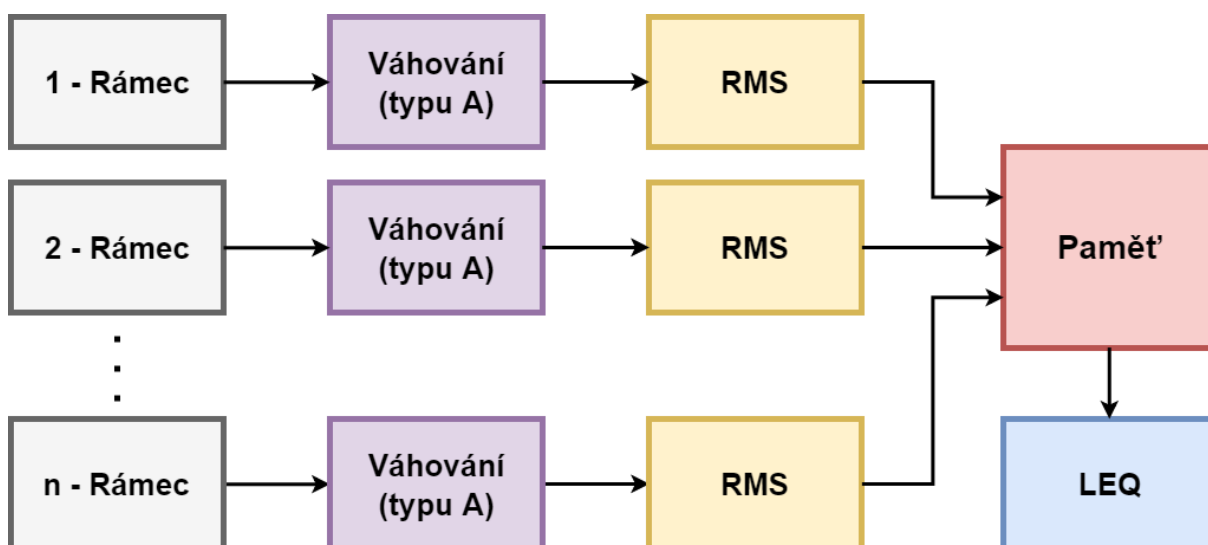
⁴⁶<https://people.csail.mit.edu/hubert/pyaudio/docs/>

⁴⁷<https://larsimmsch.github.io/pyalsaudio/>

⁴⁸<https://python-sounddevice.readthedocs.io/en/0.3.8/>

5.1.2 Zpracování dat

Pokud je senzor schopný snímat hladinu akustického tlaku ve formě zdigitalizovaných amplitud, zbývá nám pouze data před odesláním patřičně zpracovat. Ke zpracování dat dochází po rámcích, jejichž délka je zvolena na základě normou definované časové konstanty typu Fast (viz kapitola 1.3), kdy zvukoměr integruje po dobu 125 ms. To při námi zvolené vzorkovací frekvenci 48 kHz znamená zpracovávat data po 8000 vzorcích. Tento úsek dat v podobě jednoho rámce tedy pokračuje na další softwarové zpracování (viz obrázek 5.3).

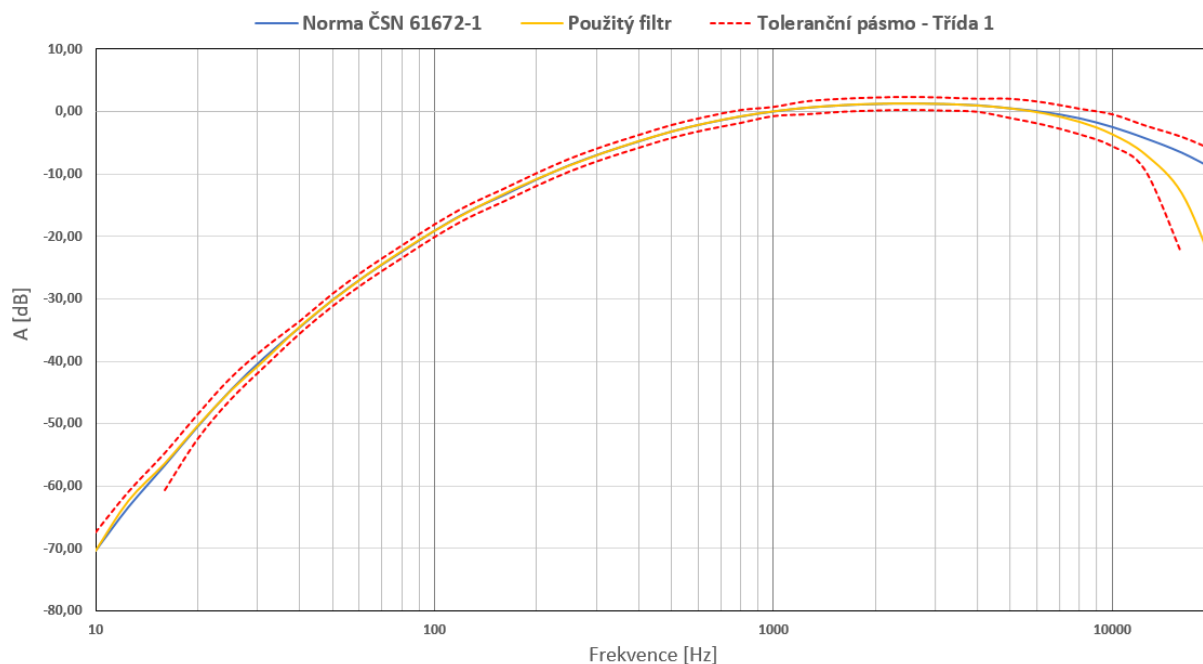


Obrázek 5.3: Schéma zpracování dat

Nejprve zde dochází k aplikaci váhování typu A, které je předepsané pro většinu typů měření (viz kapitola 1.1.2). Toto bylo realizováno pomocí číslicového filtru s nekonečnou impulzní odezvou neboli Infinite Impulse Response (IIR), jehož frekvenční charakteristika váhové funkce se musela vypočítat dle následujícího vztahu (viz rovnice 5.1). Ta je i s tolerančními pásmy definována pro zvukoměr třídy 1 v normě ČSN 61672-1 [4]. Z grafu (viz obrázek 5.4) je patrné, že vytvořený filtr spadá do tolerančního pásma i přes strmější spád na vyšších frekvencích (cca od 8000 Hz).

$$A(f) = 10 \cdot \log \left[\frac{f_4^2 \cdot f^4}{(f^2 + f_1^2) \cdot (f^2 + f_2^2) \cdot (f_2 + f_3^3) \cdot (f_2 + f_4^2)} \right]^2 [dB] - A_{1000} \quad (5.1)$$

kde $f_1 = 20.6$, $f_2 = 107.7$, $f_3 = 737.9$, $f_4 = 12200$ a normující konstanta A_{1000} reprezentuje elektrické zesílení (v dB) potřebné k zajištění kmitočtového vážení 0 dB při $f = 1000$ Hz.



Obrázek 5.4: Frekvenční charakteristika váhovacích filtru typu A

Po aplikaci váhování je každý rámeček přepočten na jednu hodnotu Root Mean Square (RMS) (viz vzorec 5.2), ze které je již možné vypočítat hladinu akustického tlaku. Vzhledem k následujícím výpočtům LEQ za určitý interval je zbytečné uchovávat přepočtené hodnoty na SPL, které by se musely před samotným výpočtem LEQ znovu odlogaritmovat.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N |X_n|^2} \quad (5.2)$$

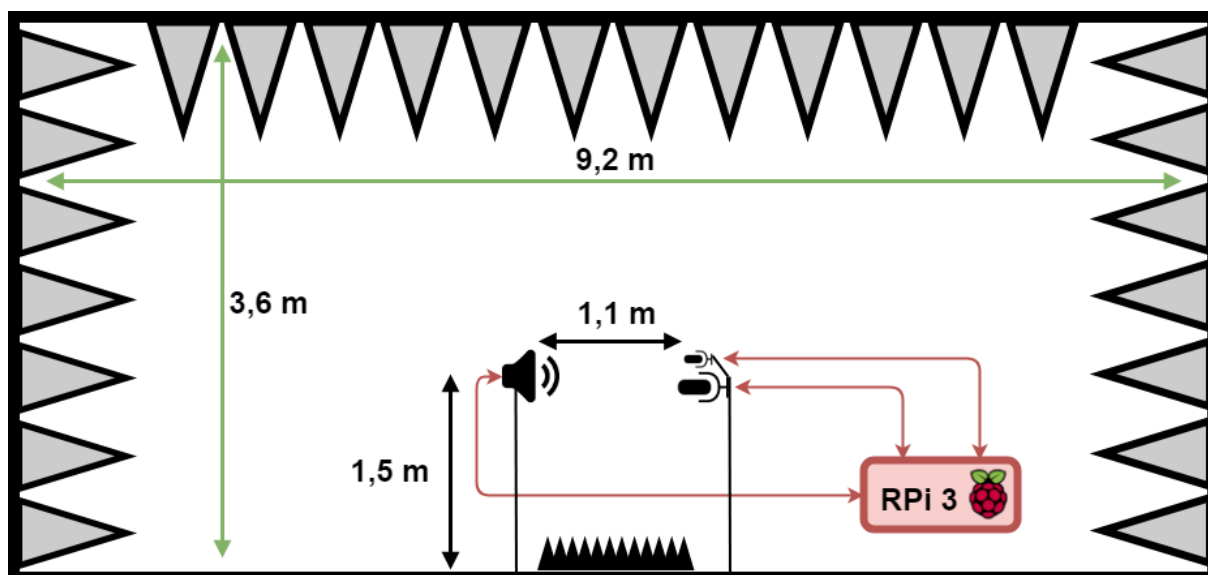
5.1.3 Kalibrace

Vzhledem k využití USB periférií jsou snímané hodnoty přepočítány pomocí zvukové karty na amplitudy, které neodpovídají skutečným hladinám akustického tlaku. Abychom mohli provádět řádná akustická měření a tento neduh odstranit, je potřeba nejprve senzor (měřicí mikrofon) zkalibrovat. Cílem kalibrace je změřit citlivost, jakožto poměr výstupního napětí mikrofonu a akustického tlaku, který toto napětí vybudil. Vzhledem k únavě materiálu a neustálým změnám podmínek prostředí by se kalibrace měla provádět pravidelně. S postupem času a neustále se vyvíjejícími technologiemi v oblasti mikrofonní techniky vzniklo hned několik kalibračních metod. Mezi ty nejznámější patří metoda reciprocity či pistofonu, dále pak tlaková, elektrostatická, substituční či porovnávací metoda [54].

Pro účely kalibrace levného senzoru pro měření hluku je nejčastěji využívána metoda pistofonu [39][55] či porovnávací metoda. V případě porovnávací metody se k buzení snímacích zařízení nejčastěji používá signál o sinusovém průběhu s frekvencí 1 kHz, například v rozsahu 35 až 115 dB [56] nebo 30 až 90 dB [57]. Dalším používaným signálem je bílý šum (v rozsahu 40 dB až 90 dB), který má konstantní spektrální výkonovou hustotu v uvažovaném frekvenčním rozsahu [58]. Nedostatkem těchto metod je neuvážení frekvenční závislosti mikrofonu, která v případě levných mikrofonů nebývá příliš plochá.

Metoda měření

V našem případě byla zvolena porovnávací metoda, která je založena na porovnávání něčeho známého s něčím neznámým, neboli srovnání naměřených hodnot ze senzoru s hodnotami z profesionálního referenčního zvukoměru [54].



Obrázek 5.5: Princip měření v polo-bezodrazové komoře

Měření proběhlo v polo-bezodrazové komoře s odrazivou podlahou, která byla mezi zdrojem signálu a snímacími prvky pokryta pohltivým materiálem (viz obrázek 5.5). Zdroj signálu a snímací prvky byly umístěny ve výšce 1,5 m a ve vzdálenosti 1,1 m od sebe. Vzdálenost mezi přístroji byla vypočítána na základě doporučení normy ČSN EN 61672-1 (viz rovnice 5.3) a umístění snímacích zařízení ve volném zvukovém poli (viz rovnice 5.4).

$$l = 3 \cdot d = 3 \cdot 0,355 = 1,07m \quad (5.3)$$

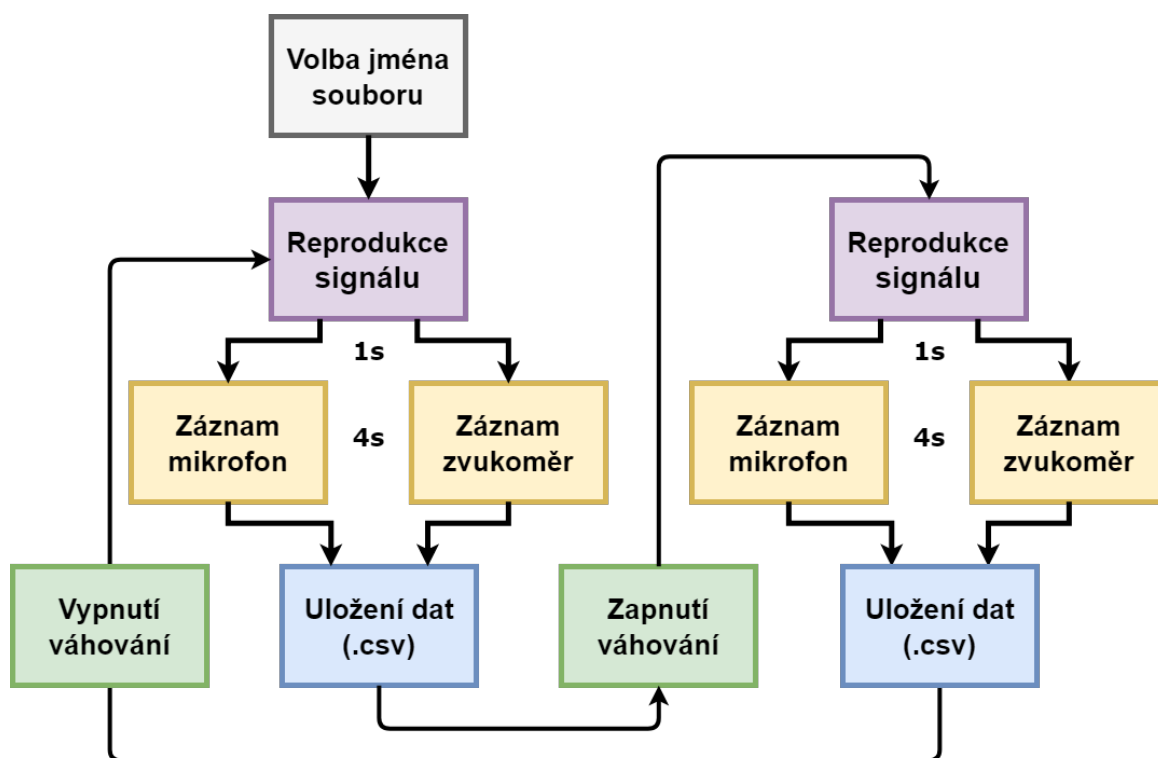
kde d je největší charakteristický rozměr reproduktoru (v našem případě průměr).

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{3,31}{4} = 0,83m \quad (5.4)$$

kde λ se vypočítá na základě rychlosti zvuku c (teplota místnosti = 18 °C) a nejnižšího generovaného kmitočtu f z následující rovnice:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{342,8}{100} = 3,31m \quad (5.5)$$

Jako zdroj byl použit všesměrový reproduktor Norsonic Nor276 s výkonovým zesilovačem Nor280, který byl do RPi připojen přes zvukovou kartu UAX220 ($f_{vz} = 48$ kHz). Jako měřicí signál posloužil široko-spektrální šum (bílý šum) a sinusové průběhy generované v 1/3 oktávách. Jako referenční přístroj byl použit profesionální zvukoměr Nor 140, jehož parametry byly popsány výše (viz tabulka 1.4).



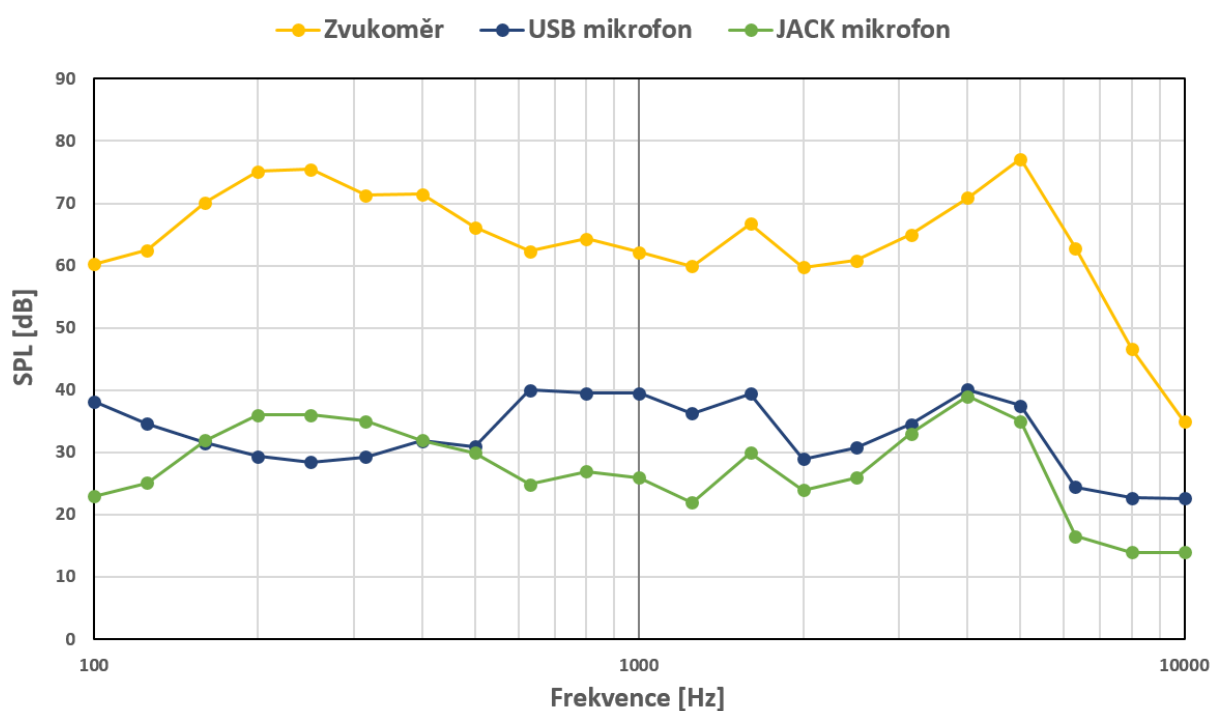
Obrázek 5.6: Algoritmus skriptu (*SoundFox_kalibrace.py*)

Za cílem urychlení a automatizace kalibračního měření byl vytvořen speciální skript (*SoundFox_kalibrace.py*), jehož funkčnost je naznačena na diagramu níže (viz obrázek 5.6). Jelikož RPi 3 disponuje čtyřmi USB porty, bylo možné k němu připojit a ovládat všechny tři akustické prvky (mikrofon, zvukoměr a reproduktor). Pokud je snímacím zařízením USB mikrofon, není zde potřeba žádné dodatečné nastavení. V případě použití USB zvukové karty a mikrofonu s jack 3,5 mm konektorem, je potřeba nejprve ověřit a přidělit v programu příslušná identifikační čísla jednotlivým zařízením.

Program nejprve spustí přehrávání budícího signálu a po jedné sekundě začne synchronně měřit pomocí mikrofonu a zvukoměru po nastavitelně dlouhou dobu. Nakonec jsou naměřená data uložena v .csv souboru a měření se opakuje se zapnutým váhováním. Takto se nejprve změří bílý šum a dále sinusový signál po 1/3 oktávách v rozsahu 50 Hz až 16 kHz.

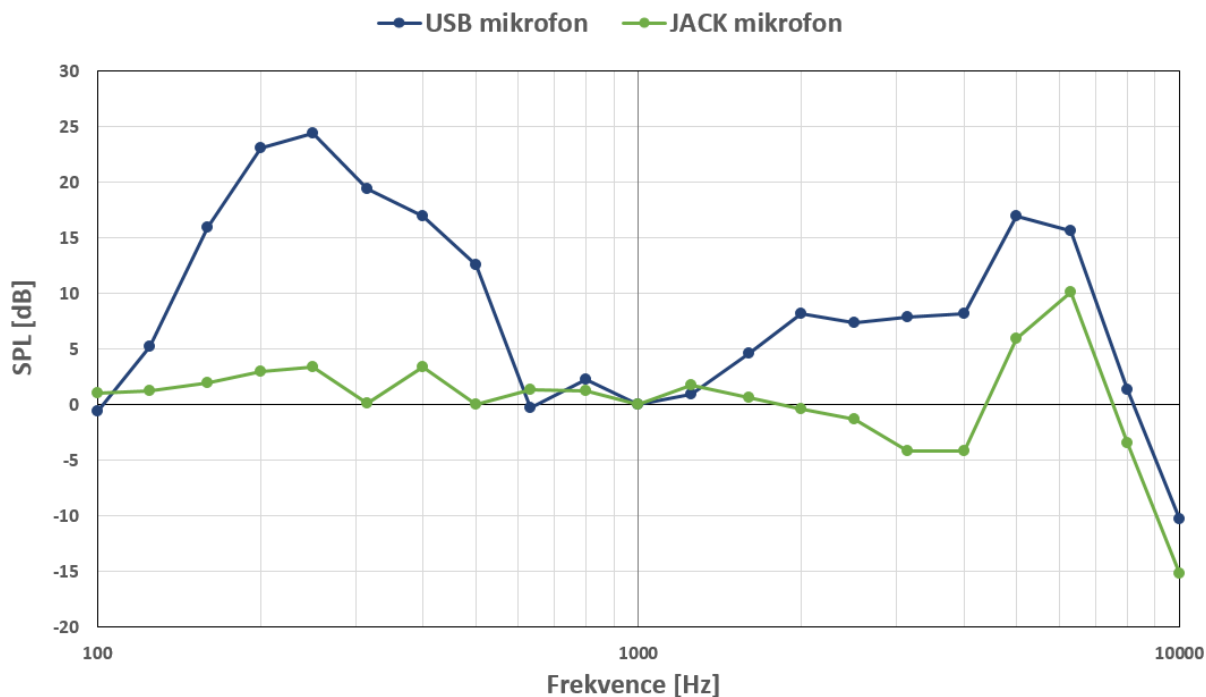
Frekvenční charakteristika

Nejprve byly změřeny frekvenční charakteristiky obou mikrofonů při nulovém úhlu (v hlavním směru příjmu) a akustické hladině cca 62 dB (na 1 kHz). Vzhledem k tomu, že naměřené hladiny pod 100 Hz a nad 10 kHz odpovídaly těmto krajním hodnotám, je zřejmé, že oba mikrofony měří pouze v tomto frekvenčním rozsahu (10 Hz až 10 kHz) a hodnoty mimo tento rozsah nebudou dále zohledňovány. Pro zjednodušení budeme mikrofony nazývat podle jejich typu připojení, tedy USB a JACK mikrofon.



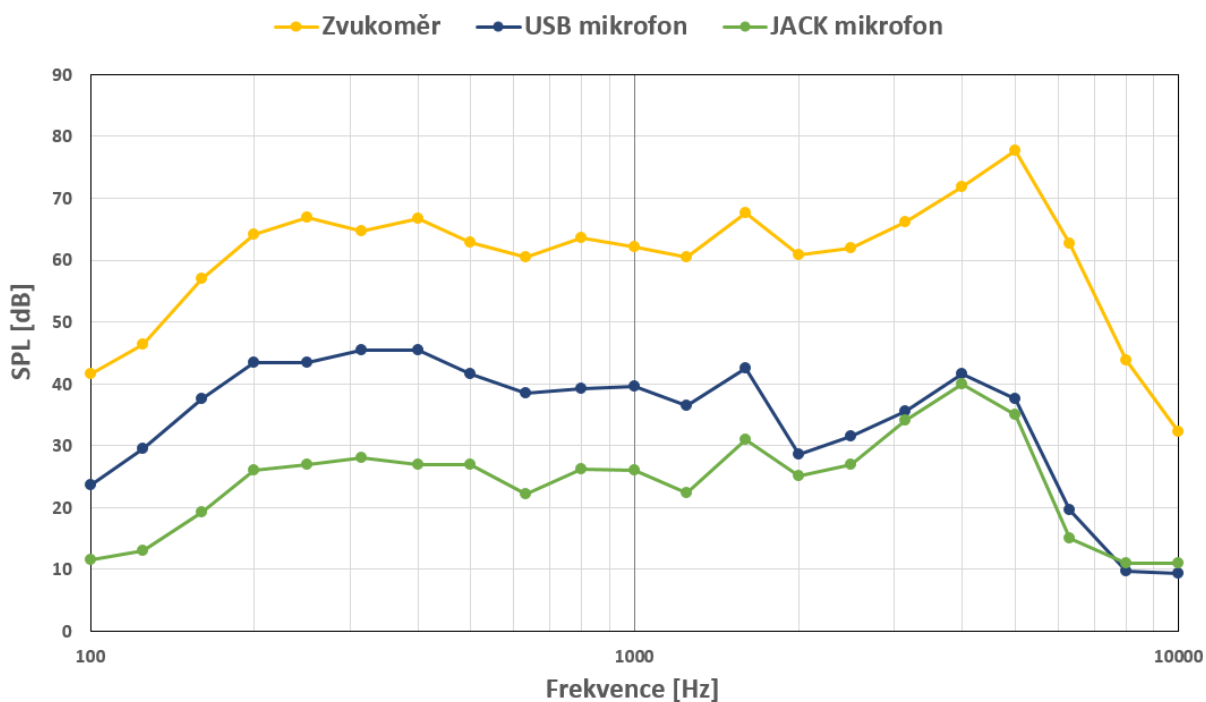
Obrázek 5.7: Porovnání frekvenčních charakteristik s vypnutým váhováním typu A

Z grafu (viz obrázek 5.7) je patrné, že mnohem lépe v porovnání s referenčním zvukoměrem obstál JACK mikrofon. To je pravděpodobně dáno funkcí na potlačení šumu a automatického zesilování v integrované zvukové kartě USB mikrofonu. Pokud bychom dorovnali frekvenční charakteristiky podle frekvence 1 kHz, tedy přičetli 36,1 dB u JACK mikrofonu a 22,6 dB u USB mikrofonu, budou rozdíly mezi frekvenční charakteristikou zvukoměru a snímacích zařízení vypadat následovně (viz obrázek 5.8).



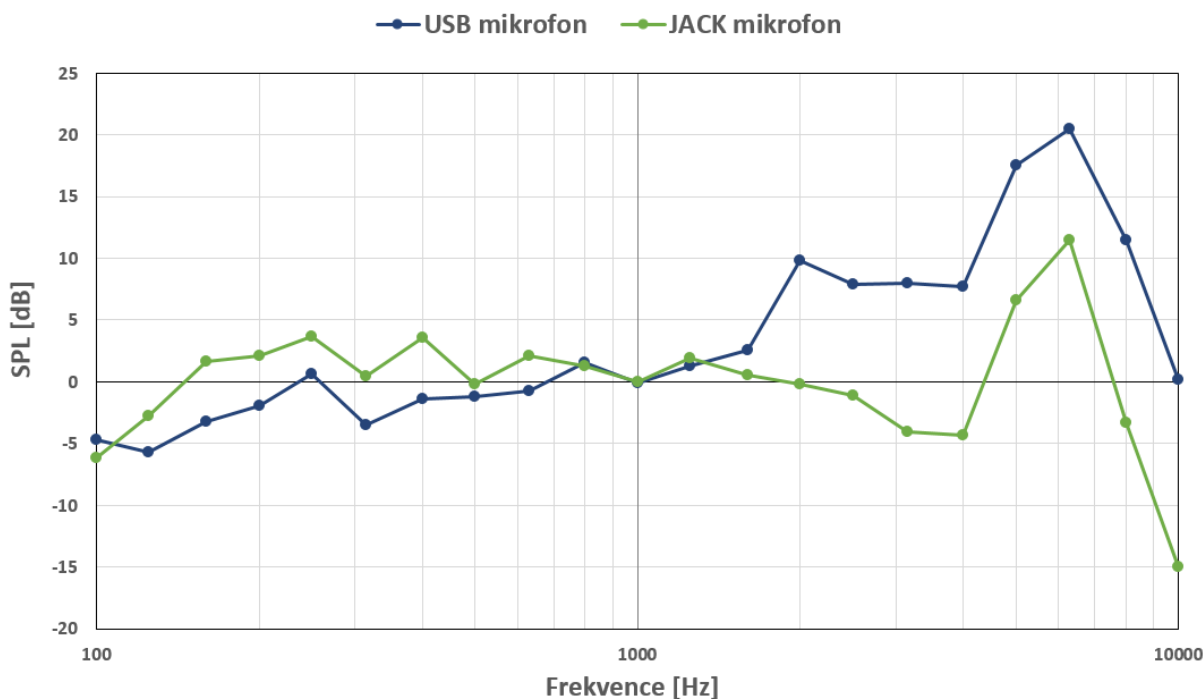
Obrázek 5.8: Porovnání rozdílů frekvenčních charakteristik snímacích zařízení ku referenčnímu zvukoměru s vypnutým váhovaním typu A

Výsledky měření po aplikaci váhování typu A u všech třech zařízení vypadají následovně (viz obrázek 5.9 a obrázek 5.10). Ostatní podmínky měření zůstávají stejné.



Obrázek 5.9: Porovnání frekvenčních charakteristik se zapnutým váhovaním typu A

Lze si povšimnout, že díky aplikovanému váhování typu A, které má tendenci velmi tlumit na nízkých kmitočtech (viz obrázek 5.4), se odstranily nežádoucí jevy integrované zvukové karty USB mikrofonu (viz obrázek 5.9). Podobně jako v předchozím případě je na následujícím obrázku naznačen rozdíl ve frekvenčních charakteristikách (viz obrázek 5.10). Zde je vidět zlepšení USB mikrofonu na nízkých kmitočtech. V případě JACK mikrofonu nedošlo v tomto případě k žádné významné změně.

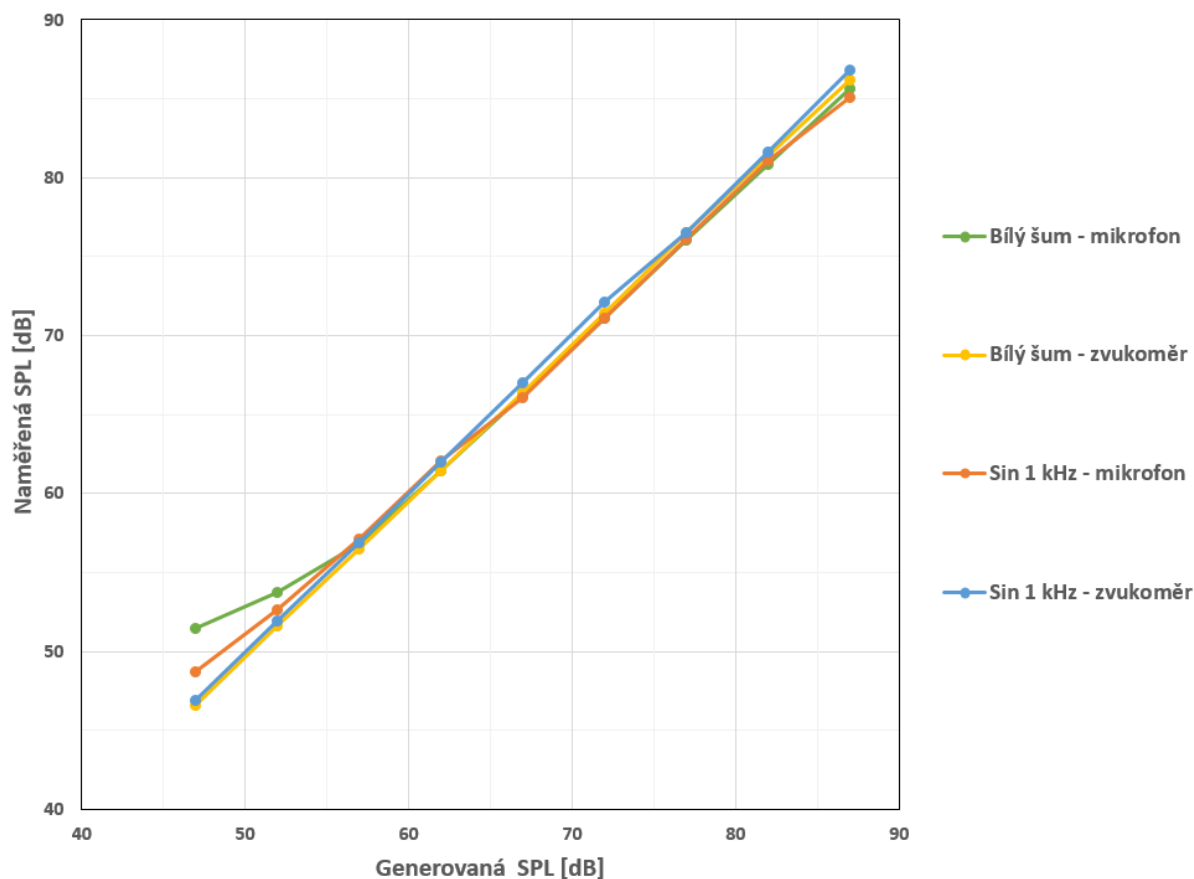


Obrázek 5.10: Porovnání rozdílů frekvenčních charakteristik snímacích zařízení ku referenčnímu zvukoměru se zapnutým váhováním typu A

Na základě tohoto měření byl pro budoucí účely této práce vybrán JACK mikrofon. To hlavně z důvodů stabilnějšího chování (bez nežádoucích funkcí) a kvalitnější frekvenční charakteristiky. Další měření byla tedy provedena pouze pro tento typ mikrofonu.

Amplitudová závislost

Další zkoumanou charakteristikou mikrofonu byla jeho amplitudová závislost (viz obrázek 5.11). Ta byla změřena v rozsahu od 47 do 87 dB pro bílý šum a sinusový signál o frekvenci 1 kHz. Tento rozsah byl zvolen na základě typických hodnot akustických hladin v pracovním prostředí. Pro sinusový signál byla použita stejná korekční hodnota jako v předchozím případě (36,1 dB). Pro bílý šum byla zvolena hodnota 38,6 dB jakožto rozdíl mezi mikrofonem a zvukoměrem pro generovaný bílý šum o hladině 62 dB.

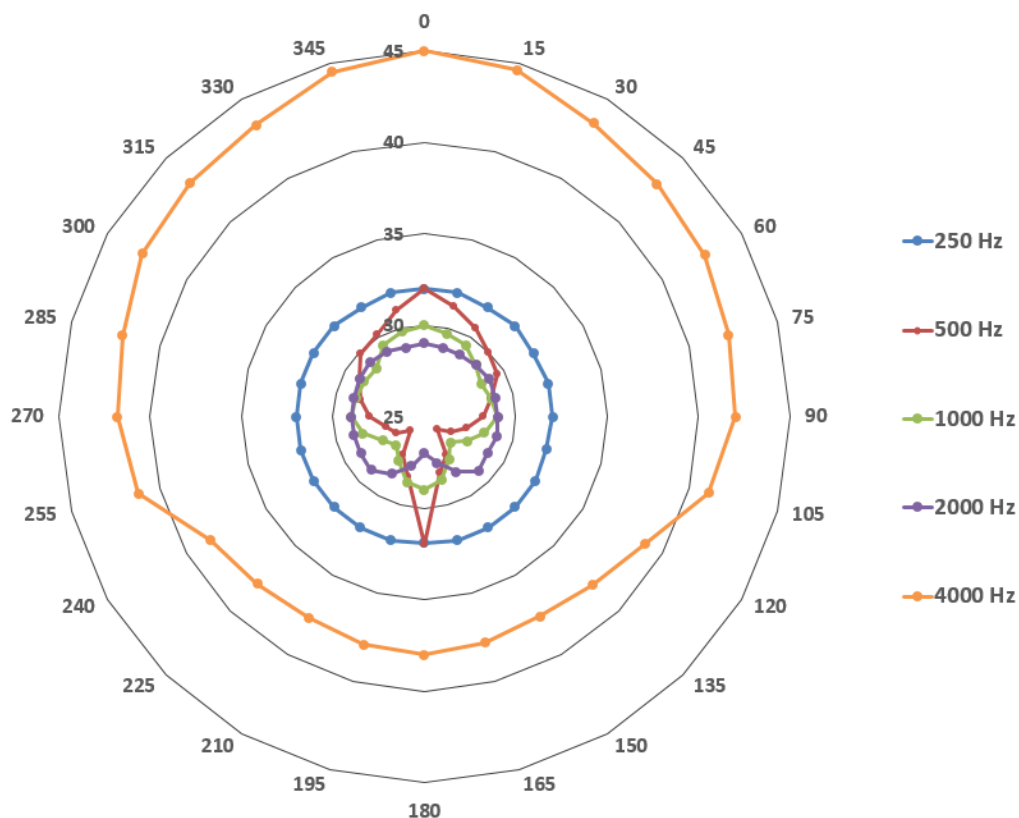


Obrázek 5.11: Amplitudová závislost mikrofonu vůči zvukoměru pro bílý šum a sinus o frekvenci 1 kHz

Z grafu (viz obrázek 5.11) lze vyčíst, že v daném rozsahu je mikrofon poměrně lineární. Bohužel u nižších hladin dochází k mírnému zkreslení, které činí necelých 5 dB pro bílý šum a necelé 2 dB pro sinusový signál. Nutno podotknout, že amplitudová závislost se měla prověřit pro větší rozsah hodnot, nejlépe od 35 dB do 100 dB. Námi naměřené výsledky jsou nedostatečné pro detailnější určení dynamického rozsahu mikrofonu.

Směrová charakteristika

Nakonec byla změřena směrová charakteristika mikrofonu. Měření proběhlo pro střední kmitočty 1/3 oktávových pásem v rozsahu 100 Hz až 10 kHz s krokem 15 °C. Aby netrvalo měření příliš dlouho, byl zvolen čas měření pouhé 4 sekundy. Vzhledem k ideálním podmínkám v komoře to na výsledku nic nezměnilo, protože hladina akustického tlaku byla po celý čas naprosto stabilní.



Obrázek 5.12: Směrová charakteristika USB mikrofonu

Na polárním grafu (viz obrázek 5.12) je zobrazeno 5 frekvenčních charakteristik pro oktávová pásma se středními kmitočty v 250, 500, 1000, 2000 a 4000 Hz. Pod 250 Hz a nad 4000 Hz byly výsledky velmi podobné s hraničními hodnotami. Výsledky mohly být ovlivněny těsnou blízkostí zvukoměru a mikrofonu, která byla necelých 15 cm (viz obrázek 5.13).



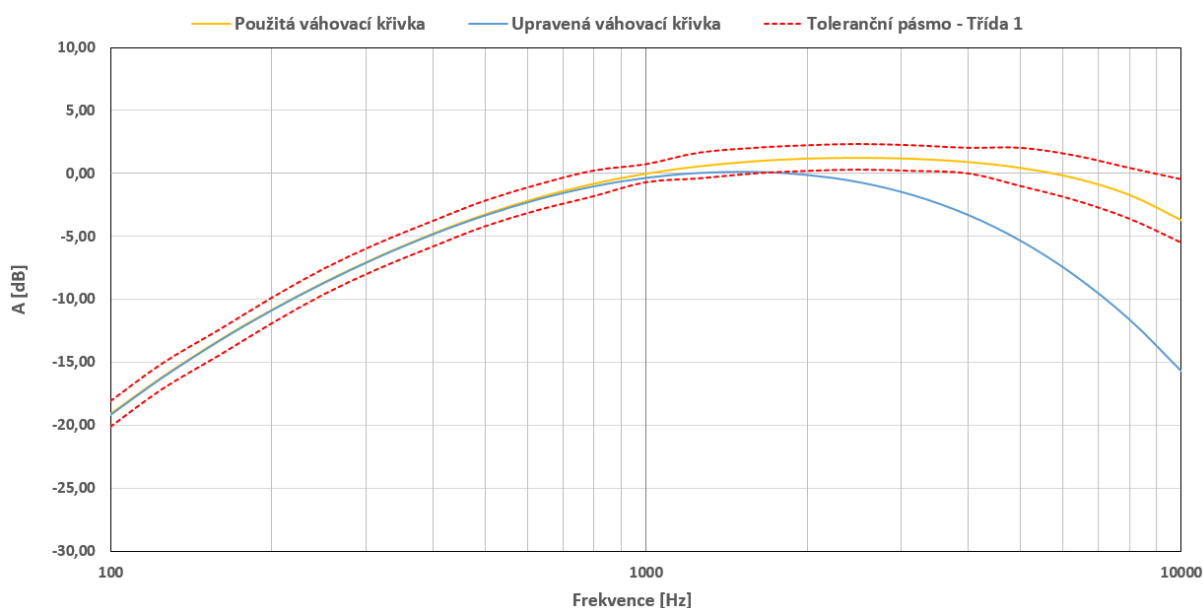
Obrázek 5.13: Umístění zvukoměru a mikrofonu při měření mikrofonních charakteristik

Korekce mikrofonních vlastností

Z provedeného měření vyplývá několik závěrů. Prvním je nutnost doplnění výpočet SPL o kalibrační konstantu (viz rovnice 5.6), která byla zvolena jako průměr odchylek snímacího zařízení od referenčního zvukoměru na frekvenci 1 kHz z daných měření v rozsahu 47 až 87 dB.

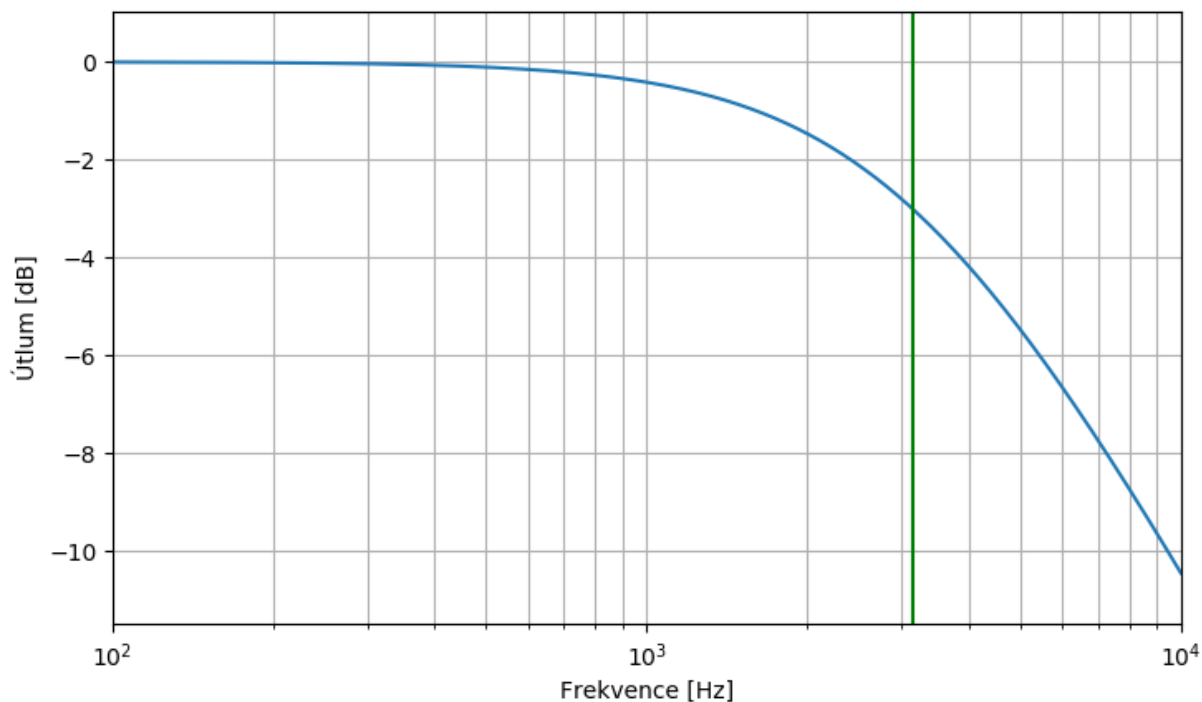
$$\text{SPL} = 10 \cdot \log_{10} (RMS) + 36,1 \text{ [dB]} \quad (5.6)$$

Druhým pozorovaným jevem je vychýlená frekvenční charakteristika od kmitočtu 2500 Hz (viz obrázek 5.16). Tento nedostatek je možné částečně odstranit dvěma způsoby. Prvním je možnost úprava samotné A-váhovací křivky pomocí změny hodnot normou definovaných kmitočtů (viz rovnice 5.1), kdy dojde ke zvýšení útlumu na vyšších frekvencích (viz obrázek 5.14). V tomto případě byla změněna frekvence f_4 z 12200 na 4550 Hz. Upravená frekvenční charakteristika je znázorněná níže (viz obrázek 5.16)



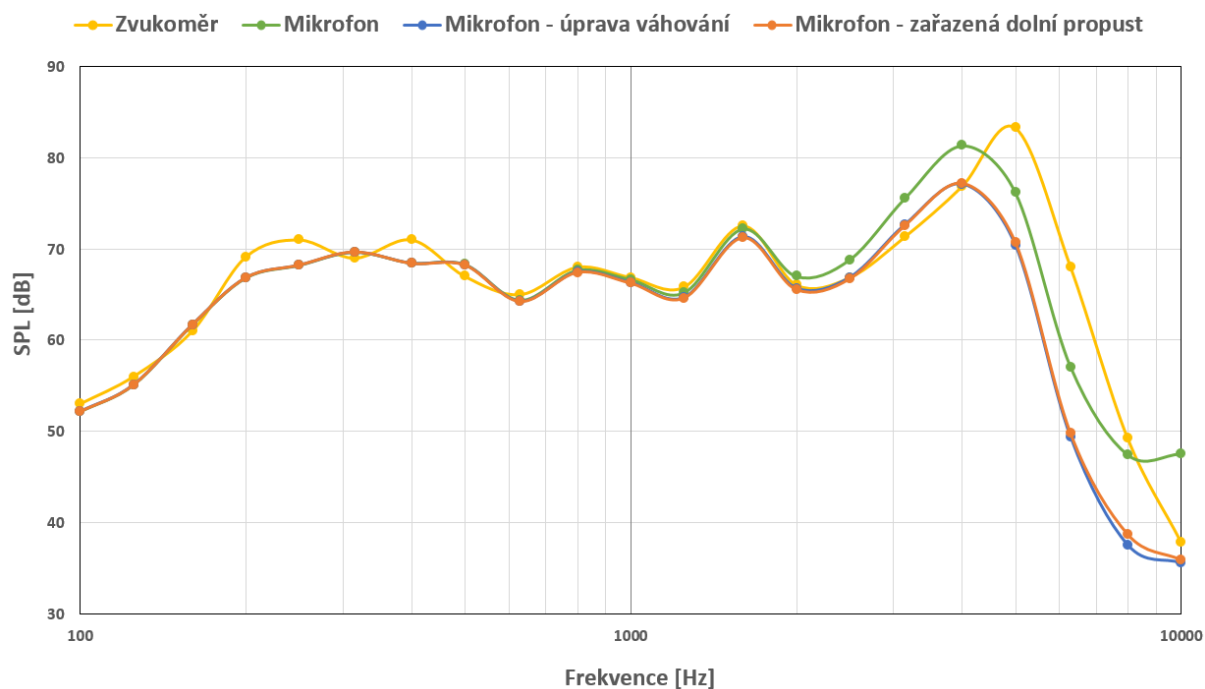
Obrázek 5.14: Frekvenční charakteristika použité a upravené váhovací křivky

Druhou možností je za samotné váhování zařadit ještě druhý filtr typu dolní propusti. Tím docílíme srovnání frekvenční charakteristiky až po kmitočt 4000 Hz, ale zároveň způsobíme značný útlum u kmitočtů nad tuto hodnotu (viz obrázek 5.16). Dolní propust byla realizována pomocí filtru s konečnou impulsovou odezvou neboli Finite Impulse Response (FIR) prvního řádu s mezním kmitočtem (pokles o 3 dB) $f_0 = 3150$ Hz (viz obrázek 5.15).



Obrázek 5.15: Frekvenční charakteristika dolní propusti

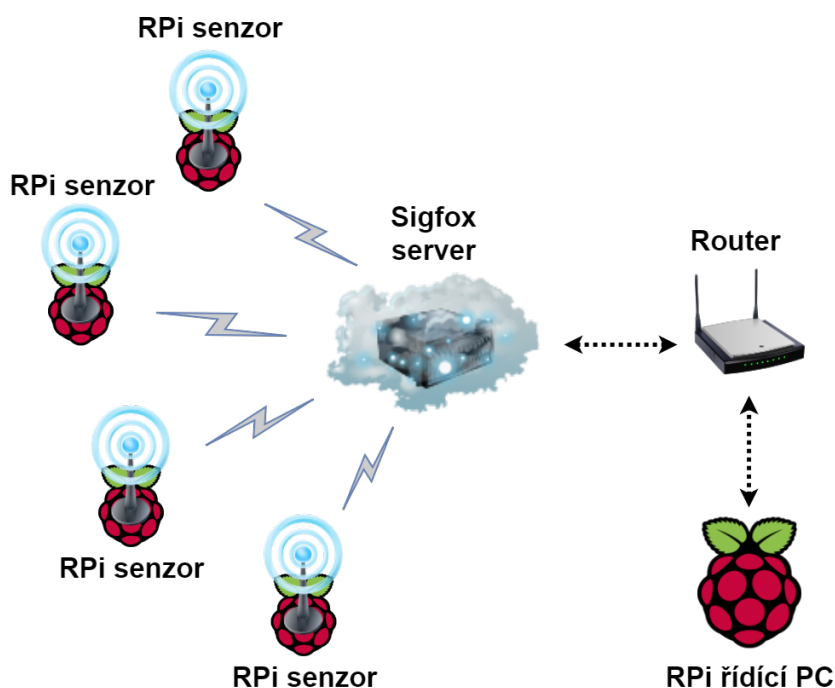
V případě správně nastavených parametrů f_4 u váhování a f_0 u dolní propusti vedou obě metody k prakticky stejnému výsledku (viz obrázek 5.16). Vzhledem k tomu, že zařazení dolní propusti nemá žádný vliv na výpočetní výkon senzoru a v případě výměny mikrofonu není potřeba měnit parametry váhování, byla pro dorovnání frekvenční charakteristiky mikrofonu zvolena tato metoda.



Obrázek 5.16: Porovnání frekvenčních charakteristik s aplikovanými úpravami

5.2 Komunikace

Cílem komunikace našeho systému je přenos vypočítaných hodnot ekvivalentní hladiny akustického tlaku směrem od senzorů k řídicímu PC. K tomuto účelu lze využít celou řadu bezdrátových technologií (viz kapitola 2). Vzhledem k požadované univerzálnosti senzoru, co se týče dosahu připojení a možnosti použití po celé České republice, bylo vybíráno z jedné z LPWAN technologií Sigfox či LoRa. Nakonec byla vybrána technologie Sigfox. Ta se z finančního hlediska jeví jako nejlevnější varianta, kde ke každému zakoupenému modulu je přidělena licence na rok nebo dva podle typu zařízení. Dále oproti technologii LoRa poskytuje lepší pokrytí v městských podmínkách a v případě expanze do zahraničí zde neplatí roaming (viz kapitola 2.2.5). Jedním z omezení by mohla být limitace odeslaných zpráv za den. To pro osmi hodinovou směnu v případě uplinku (140 zpráv) znamená možnost odeslání hodnoty zhruba každé 3 minuty a 15 sekund. V případě downlink máme k dispozici pouze čtyři zprávy. Tyto zprávy se dají použít k rebootu senzoru v případě problémového chování či ovládnutí samotného měření.



Obrázek 5.17: Obecné schéma komunikace

Jak bylo řečeno v předchozí kapitole (viz kapitola 2.2.1), vyslaný signál z modulu je nejprve zachycen přijímacími stanicemi a poté přeměrován na server společnosti Sigfox. Zde je možné si zachycené hodnoty prohlížet (viz obrázek 5.18), vyexportovat a stáhnout ve formě Comma-separated Values (CSV) či přeměrovat někam dál pomocí přednastaveného Callbacku. V našem případě by se jednalo o přeměrování na řídicí počítač v podobě RPi připojeného ke konkrétnímu routeru na určité Internet protocol (IP) adrese (viz obrázek 5.17).

Time	Data / Decoding	Location	Link quality	Callbacks
2018-05-10 09:32:02	0242			
2018-05-10 09:28:02	024b			
2018-05-10 09:24:01	0257			
2018-05-10 09:20:02	0252			
2018-05-10 09:16:02	021c			
2018-05-10 09:12:02	02a2			

Obrázek 5.18: Ukázka Sigfox databáze

Abychom předešli složitému zařizování veřejné IP adresy a zabezpečování samotného routeru, za kterým se nachází náš řídicí PC. Využili jsme poněkud bezpečnější variantu internetového mostu v podobě služeb webhostingu (konkrétně u společnosti Wedos). Tyto služby nám umožňují pronajmout si zabezpečený server na rok za necelých 300 Kč. Pronajatý server disponuje MySQL databází, která se hodí zejména jako vedlejší úložiště dat a dále PHP skriptováním, které slouží k tvorbě internetových stránek.

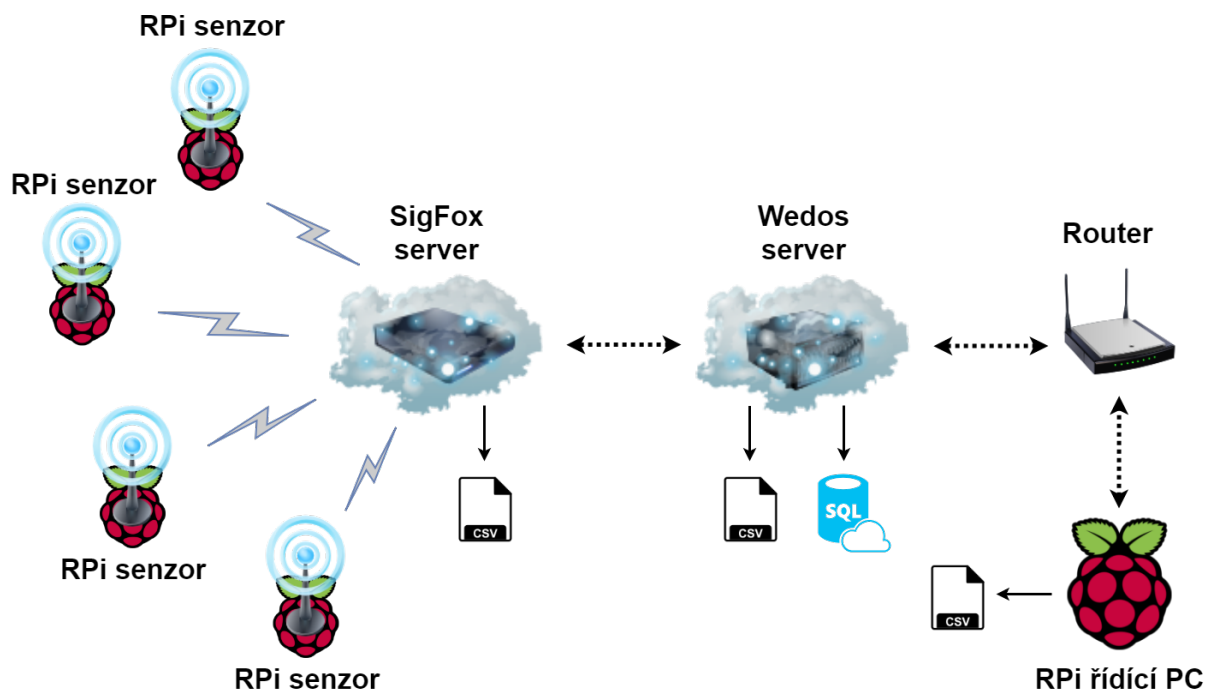
		Device	Date	Time	Data	SNR	SeqNum		
<input type="checkbox"/>				369F86	2018-05-10	08:48:02	53.6	47.65	1205
<input type="checkbox"/>				369F86	2018-05-10	08:52:01	56.5	31.07	1206
<input type="checkbox"/>				369F86	2018-05-10	08:56:02	56.5	6.4	1207
<input type="checkbox"/>				369F86	2018-05-10	09:00:02	55.9	30.54	1208
<input type="checkbox"/>				369F86	2018-05-10	09:04:02	67.3	31.67	1209
<input type="checkbox"/>				369F86	2018-05-10	09:08:02	67.8	14.73	1210
<input type="checkbox"/>				369F86	2018-05-10	09:12:02	67.4	20.76	1211

Obrázek 5.19: Ukázka MySQL databáze

Přijaté hodnoty ze senzorů jsou automaticky přeměrovány pomocí callbacku ze Sigfox cloudového úložiště na pronajatý server (viz obrázek 5.20). Zde dojde díky krátkému PHP skriptu k uložení dat do MySQL databáze a CSV souboru na File Transfer Protocol (FTP) server. Tato data jsou potom jednoduše přístupná pro řídicí počítač (stahování z FTP), který je připojený k libovolnému routeru pomocí WiFi nebo Ethernetového kabelu. Data jsou zde v paměti řídicího počítače ve formě CSV tabulkové databáze. Případně lze využít jednu z možností ukládání do interní MySQL databáze pomocí Python nástrojů jako je například SQLAlchemy⁴⁹ nebo SQLAlchemy⁵⁰.

⁴⁹<https://www.sqlalchemy.org/>

⁵⁰<http://www.sqlobject.org/>



Obrázek 5.20: Schéma komunikace SoundFox

5.3 Predikční algoritmus

Tato kapitola bude obsahovat popis predikčního algoritmu LEQ, který má za cíl co nej-
přesněji průběžně odhadovat výslednou hodnotu LEQ na konci předem definovaného in-
tervalu.

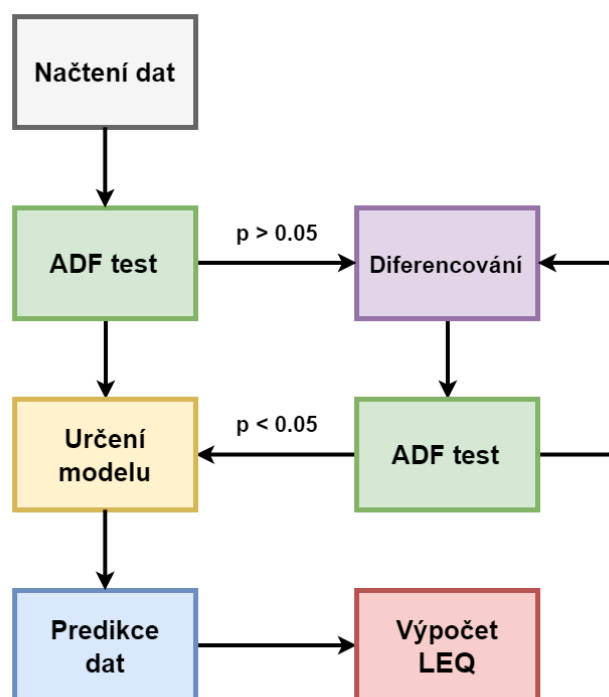
5.3.1 Adaptivní ARIMA

K predikci časových hodnot LEQ byl zvolen model ARIMA (viz kapitola 4.2.4). Ten byl realizován pomocí knihovny Statsmodels⁵¹, která obsahuje celou řadu dalších statistických modelů inspirovaných realizacemi v programovacím jazyku R⁵². Na rozdíl od jazyku R ovšem stále obsahuje celou řadu chyb a nedostatků, které vedou k omezenosti jejího využití. Z tohoto důvodu byly některé funkce naprogramovány zvlášť, protože místy docházelo k řadě neidentifikovatelných chyb. Funkčnost celého programu je naznačena na následujícím diagramu (viz obrázek 5.21).

Po načtení aktuálních dat je časová řada podrobena ADF testu, který odhalí její stacionaritu. V případě nestacionární časové řady ($p > 0.05$) dochází k diferencování prvního řádu a řada je znovu podrobena testu. Dojde-li opět ke stejnému výsledku, nastává diferencování druhého řádu a časová řada dále pokračuje jako vstupní parametr do funkce pro určení modelu ARIMA.

⁵¹<http://www.statsmodels.org/dev/index.html>

⁵²<https://www.r-project.org/about.html>



Obrázek 5.21: Diagram predikčního algoritmu ARIMA

Vzhledem k proměnné délce a tudíž i charakteru dat, by bylo velmi obtížné určit jeden univerzální model (p, d, q) . Proto v této fázi programu dochází k validaci všech možných kombinací koeficientů p a q v rozsahu od 1 do 5 (viz tabulka 5.2). V případě níže znázorněné tabulky byl zvolen model ARIMA(4,0,4). Vyhodnocení modelu se provádí na základě informačního kritéria AIC, kde nižší hodnota na výstupu znamená, že model lépe popisuje charakter časové řady.

Tabulka 5.2: Volba modelu na základě informačního kritéria AIC

p / q	1	2	3	4	5
1	400,36	402,78	413,11	405,46	415,65
2	404,82	407,13	400,48	406,78	405,34
3	406,03	399,84	401,65	411,74	409,87
4	406,64	416,24	425,97	399,69	401,67
5	409,27	411,43	422,53	423,83	425,98

Model je následně po jeho zvolení použit pro predikci dat neboli doplnění intervalu o chybějící hodnoty. Následuje výpočet LEQ na konci intervalu pomocí aktuálně naměřených a predikovaných dat. Vzhledem k nedostatečnému množství vstupní informace pro model ARIMA, je první hodina (15 hodnot) počítána pomocí klasického průměrování.

Kapitola 6

Testování systému

Tato kapitola obsahuje popis testování celého systému od snímání hladiny akustického tlaku, přes komunikaci pomocí technologie Sigfox, až ke zpracování dat predikčním algoritmem postaveném na základě modelu ARIMA.

6.1 SoundFox

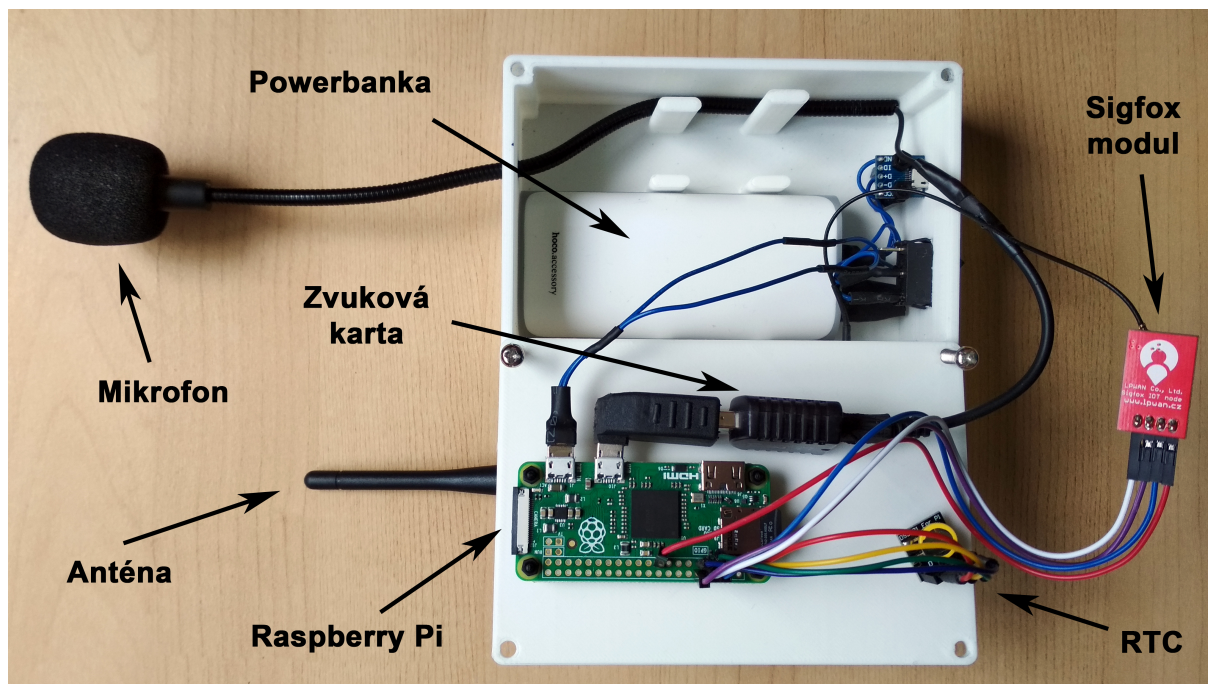
Senzor postavený na základě platformy RPi Zero W obsahuje mimo snímací a komunikační část ještě externí hodiny RTC a záložní zdroj v podobě powerbanky o kapacitě 5200 mAh. Ta je v případě výpadku schopná napájet celý systém na cca 40 hodin vzhledem ke spotřebě zařízení necelých 160 mA v aktivním stavu (8 hodin denně) a 110 mA ve stavu nečinnosti (16 hodin denně).

Tabulka 6.1: Finanční náklady SoundFox senzoru

Položka	Cena [Kč]
Raspberry Pi Zero W	250
Gembird MIC-205	70
Axagon ADA-10 Mini	100
SigFox LPWAN node	530
Powerbanka HOCO B21	200
RTC DS3231	30
Ostatní	20
Celkem	1200

Celková cena zařízení se pohybuje okolo 1200 Kč (viz tabulka 6.1), kde největší finanční zátěží je modul pro komunikaci pomocí technologie Sigfox. V případě, že se systém nachází v místech s dostupnou technologií WiFi a nedochází zde k častým výpadkům proudu, je možné senzor zredukovat o komunikační modul Sigfox a powerbanku. To by vedlo ke snížení finančních nákladů na necelých 500 Kč za kus.

K potřebám měření byly všechny komponenty senzoru umístěny do ochranné krabičky (viz obrázek 6.2), která byla navržena v softwaru SolidWorks⁵³ a vytištěna na 3D tiskárně TEVO Tarantula. Model krabičky se skládá ze dvou částí a obsahuje předem vytvořené otvory pro zapínací tlačítko, napájecí kabel, mikrofonní kabel a anténní úchyt. Model ve formátu .stl a jeho detailní schéma jsou přílohou této práce.



Obrázek 6.1: Uspořádání komponent uvnitř krabičky

Na vnější straně krabičky se nachází tlačítko pro zapnutí a vypnutí senzoru. Po úspěšném nabootování začne senzor automaticky nahrávat SPL a z nich počítat LEQ na konci nastaveného intervalu, který je v našem případě čtyři minuty. Po každém výpočtu LEQ se hodnota převede z dekadické do hexadecimální podoby a odešle pomocí Sigfox modulu směrem k řídicímu počítači.

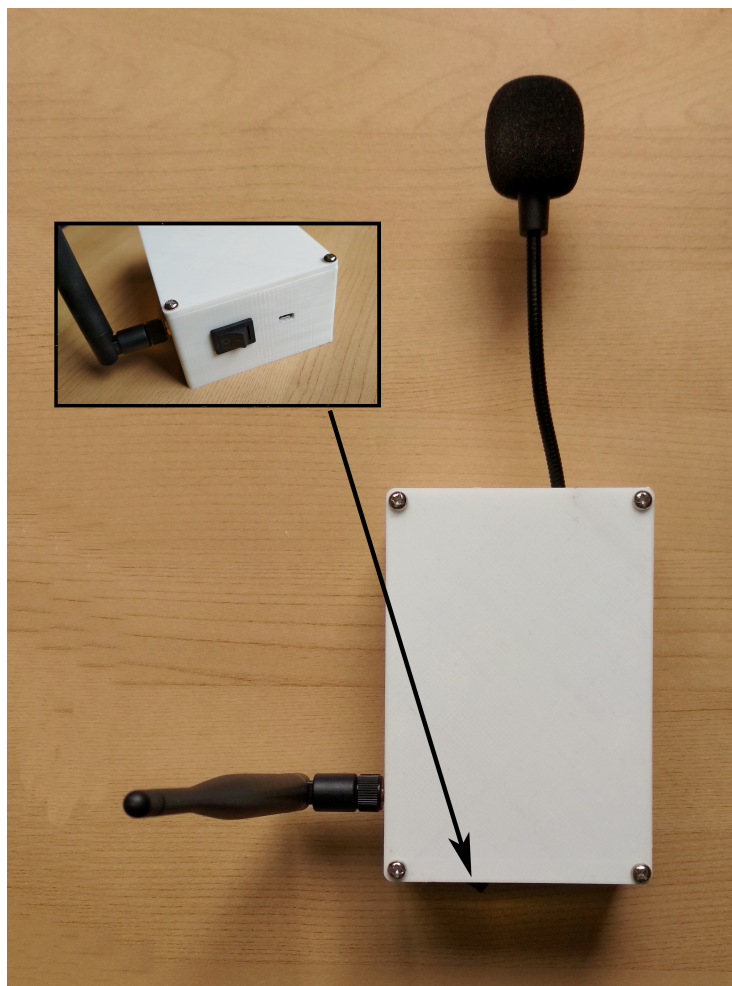
V případě problému je možné se na RPi připojit pomocí technologie WiFi a vytvořeného hotspotu na chytrém telefonu. RPi má nastavené přihlašování na SSID: SF-X, kde X je číslo daného senzoru a heslo: SoundFox. Dále je nutné si zjistit IP adresu připojeného senzoru (například pomocí aplikace IP scanner). Daná IP adresa je potom použita pro připojení prostřednictvím nějaké Secure Shell (SSH) aplikace. Pokud bychom chtěli provádět změny pouze pomocí příkazového řádku, můžeme použít například aplikaci JuiceSSH⁵⁴. K získání dalších informací o systému, jako je například taktovací frekvence, teplota nebo volná paměť, můžeme využít aplikaci RaspManager⁵⁵.

⁵³<https://www.solidworks.com/>

⁵⁴<https://juicessh.com/>

⁵⁵<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.cea.raspmanager>

Naměřená data jsou dále odeslána na server, kde dojde k jejich dešifrování (konverze z hexadecimální hodnoty do dekadické) a uložena do databáze. Z této databáze si potom řídicí počítač v podobě RPi 3, pravidelně data stahuje pomocí Python knihovny `ftplib`⁵⁶. Po načtení dat dochází k jejich zpracování a výpočtu predikované hodnoty LEQ.



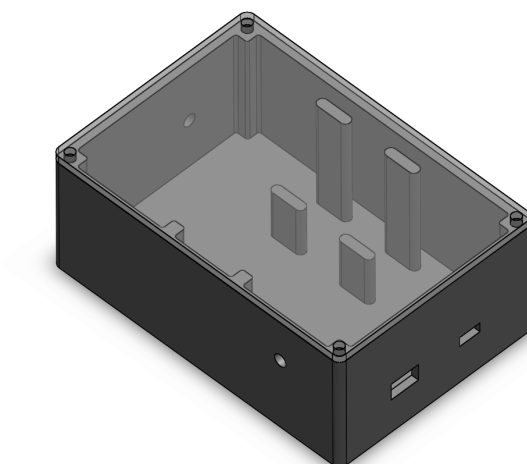
Obrázek 6.2: Uspořádání komponent uvnitř krabičky

Data jsou nakonec vykreslena pomocí knihovny `Plotly`⁵⁷, která umožňuje grafické zpracování dat v několika programovacích jazycích včetně jazyku Python. V její základní neplicené verzi je možné vykreslit pouze 2500 grafů denně, což limituje náš počet senzorů na 12 při výše definované velikosti intervalu. Vzhledem k poněkud nepřehlednému vykreslování na oficiálních stránkách `Plotly`, je grafický výstup přesměrován na webové stránky našeho serveru⁵⁸ (viz obrázek 6.4). Zde je v reálném čase zobrazena aktuální hodnota LEQ a dále predikce LEQ celého intervalu.

⁵⁶<https://docs.python.org/3/library/ftplib.html>

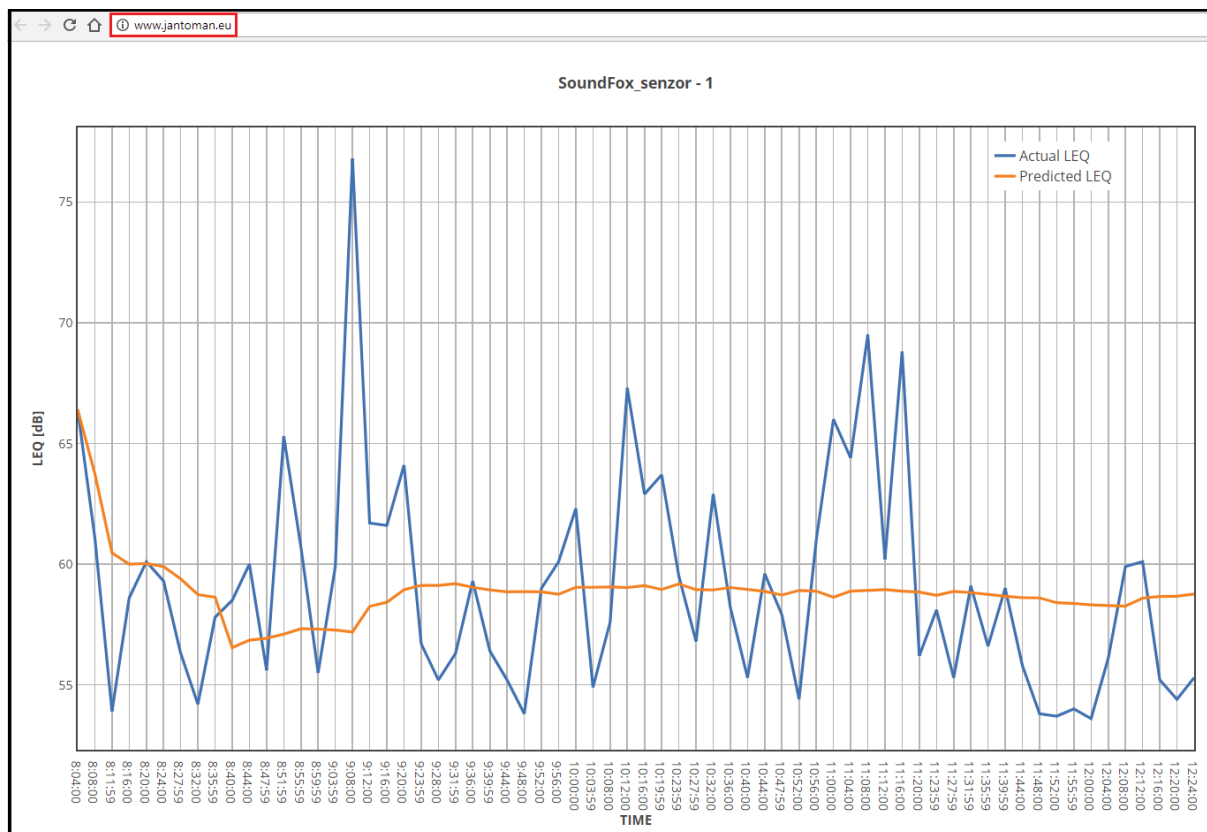
⁵⁷<https://plot.ly/>

⁵⁸www.jantoman.eu



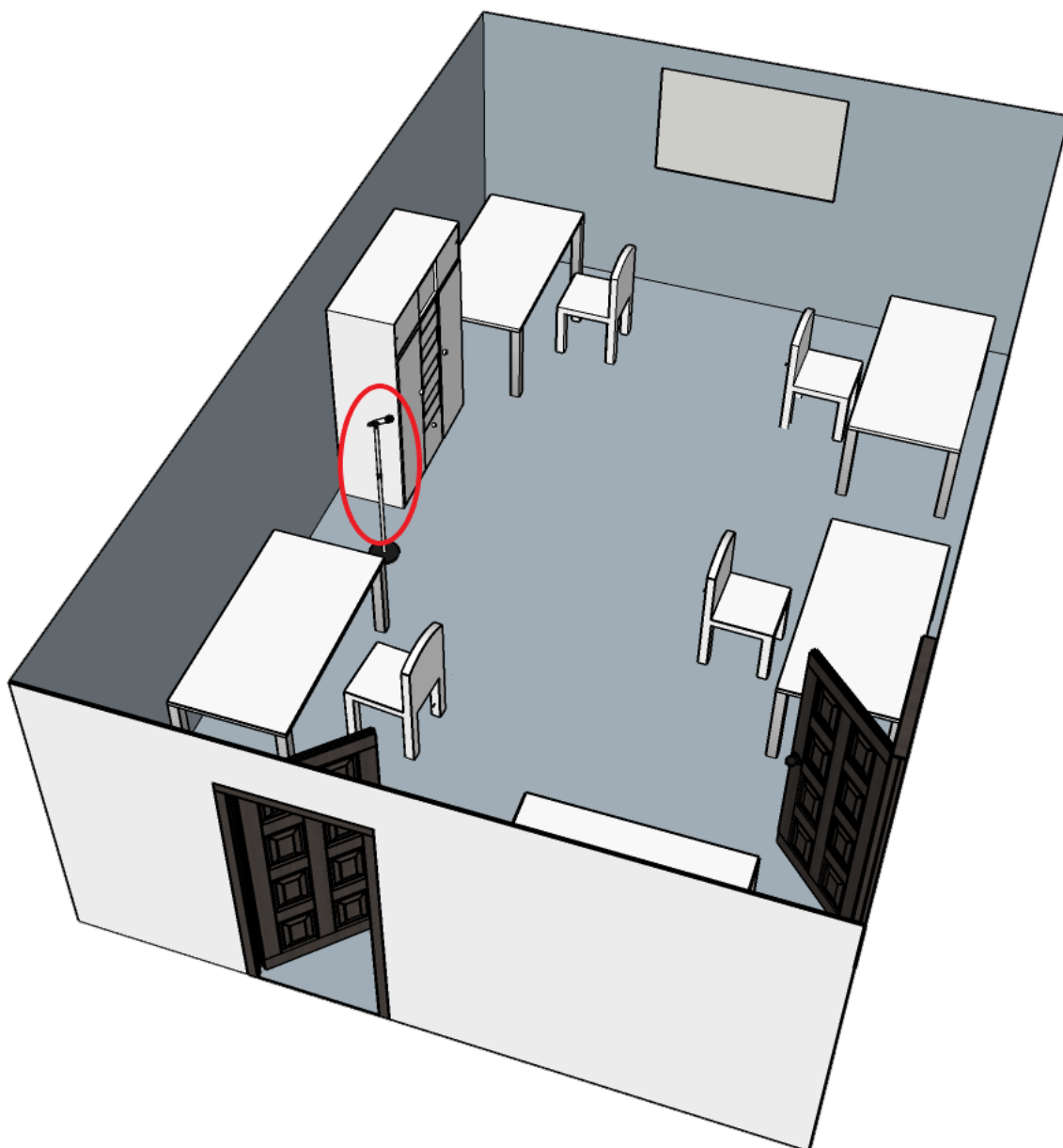
Obrázek 6.3: 3D model ochranného krytování senzoru

Systém byl nasazen v kancelářských prostorách, kde aktivně pracovali čtyři zaměstnanci. Náplň jejich práce se sestávala z telefonních hovorů, práce s počítačem a aktivní komunikace mezi ostatními kolegy. Kancelář byla průchozí a na severní straně bylo neustále otevřené okno do ulice. Hladina hluku v kanceláři byla ovlivněna několika faktory, jako je samotná prací zaměstnanců, frekventované průchody ostatních kolegů místností a ruchem z ulice (ruch z dopravy, kolemjdoucí apod.).



Obrázek 6.4: Online zobrazování dat pomocí knihovny Plotly

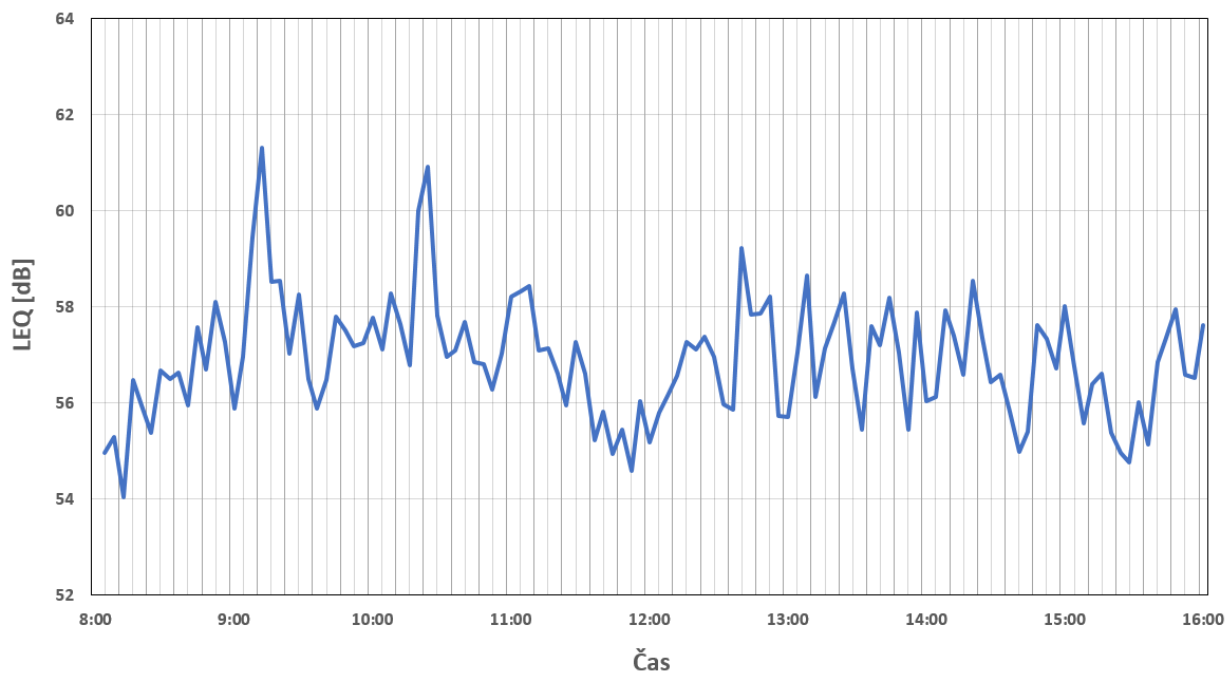
Senzor byl připevněn ke stativu a umístěn zhruba 1 m od zdi a 2 m vysoko (viz obrázek 6.5) v souladem s metodickým postupem HEM-300-26.4.01-16344 [59]. Aby se zredukoval vliv otřesů od podlahy na měření, byl senzor podložen akustickou pěnou. V kanceláři se měřilo po dobu dvou týdnů od 7.5. do 18.5. v pracovní době od 8:00 do 16:00. Z naměřených dat byl nakonec odstraněn státní svátek 8.5 a oba dny víkendu.



Obrázek 6.5: Umístění senzoru v místě měření

6.2 Charakter naměřených dat

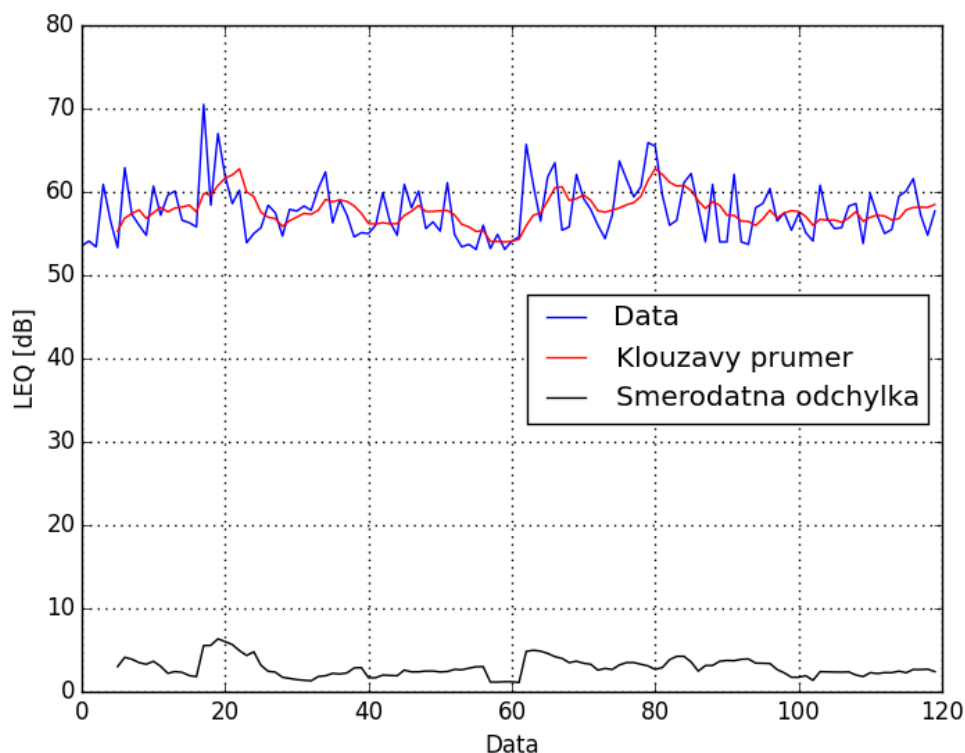
Nejprve muselo dojít k řádné analýze dat a zjištění jejich charakteru. Jednou ze zkoumaných vlastností byla stacionarita dat, která je důležitá pro modelování pomocí ARIMA procesu. Prvotní a nejjednodušší možností analýzy je grafické zobrazení dat a jejich charakteristik v čase. Abychom odhalili pravidelnosti v jednotlivých dnech, byl nejprve vytvořen průměrný den z jednotlivých měření (viz obrázek 6.6).



Obrázek 6.6: Průměrná LEQ napříč všemi dny

Z průměrného dne (viz obrázek 6.6) lze vypořadovat, že aktivita v kanceláři je dopoledne (cca do 11:00) místy vyšší, následuje útlum způsobený dobou oběda a nakonec je zde poměrně konstantní hladina hluku (s mírně sestupnou tendencí) až do konce směny. Právě informace o těchto pravidelných událostech mohou velmi pomoci při tvorbě predikčního algoritmu a zpřesnění jeho odhadu.

Další zkoumanou vlastností byla stacionarita dat. Náhodně byl vybrán jeden z naměřených dnů (14.5.) a vykreslen jeho klouzavý průměr a směrodatná odchylka v čase se zpožděním šesti vzorků (viz obrázek 6.7). Z těchto grafických charakteristik lze vypořadovat, že data jsou poměrně stacionární, a tak nebude nutné provádět jejich časté předzpracování za cílem stacionarizace dat (např. pomocí logaritmování nebo diferencování).



Obrázek 6.7: Klouzavý průměr a směrodatná odchylka v čase - 14.5.2018

Korektnějším ověřením stacionarity dat je za pomoci dříve zmíněného ADF testu (viz obrázek 6.8). Ten je již implementovaný v rámci knihovny statsmodels, a tak je zapotřebí pouze správná volba jeho parametry⁵⁹.

```

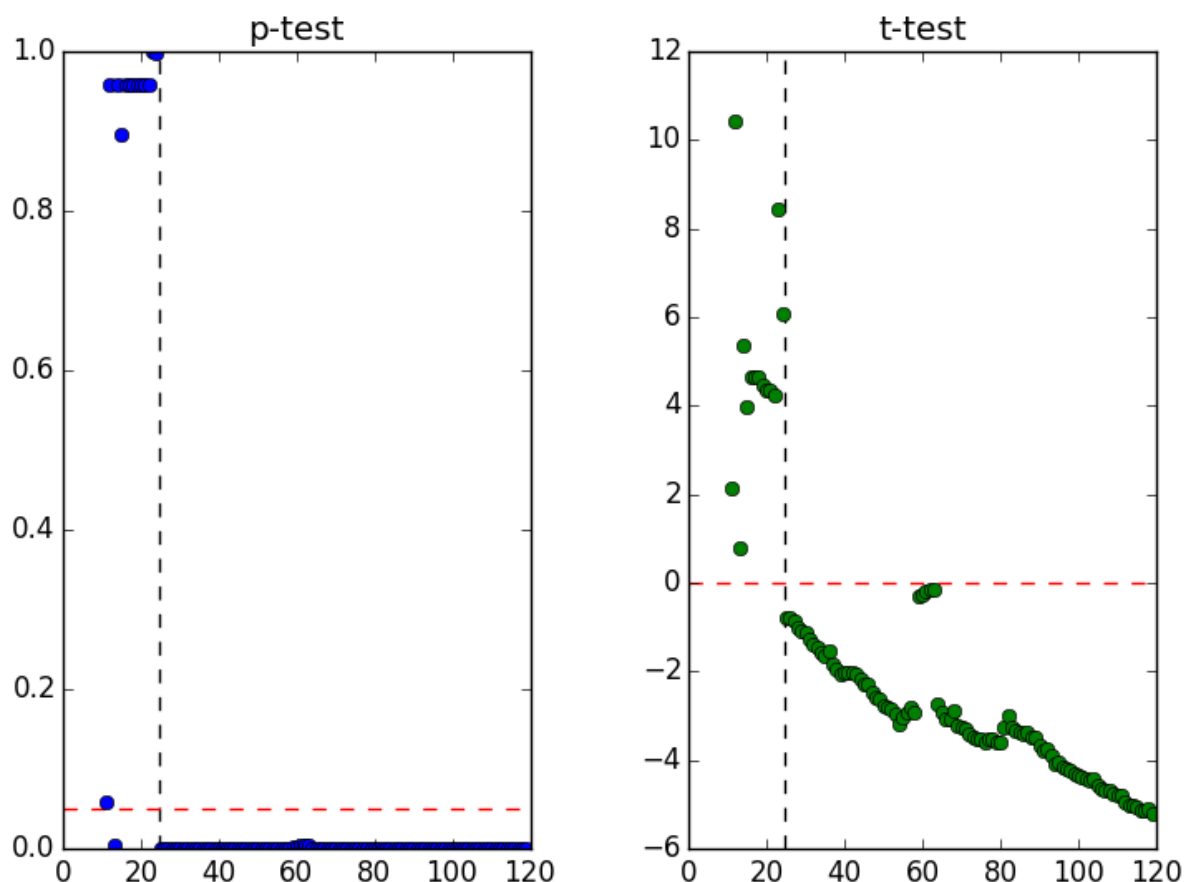
Dickey-Fuller test:
Test Statistic          -8.779437e+00
p-value                 2.398884e-14
#Lags Used              0.000000e+00
Number of Observations Used 1.190000e+02
Critical Value (5%)     -2.886151e+00
Critical Value (1%)     -3.486535e+00
Critical Value (10%)    -2.579896e+00

```

Obrázek 6.8: Ukázka výsledku ADF testu

Test byl aplikován v každém kroku na časovou řadu ze dne 14.5. a průběžný výsledek stacionarity dat byl vykreslen (viz obrázek 6.9). Levý graf znázorňuje výsledek stacionarity na základě p hodnoty, kdy $p < 0,05$ znamená stacionaritu dat. V pravém grafu je určena stacionarita na základě nižší hodnoty statistického testu, nežli je jeho kritická hodnota při 1% úrovni (s konstantou a bez trendu). Červená čerchovaná čára znamená rozhodovací úroveň. Černá čerchovaná čára potom znázorňuje hranici, od které jsou data stacionární.

⁵⁹<http://www.statsmodels.org/dev/generated/statsmodels.tsa.stattools.adfuller.html>



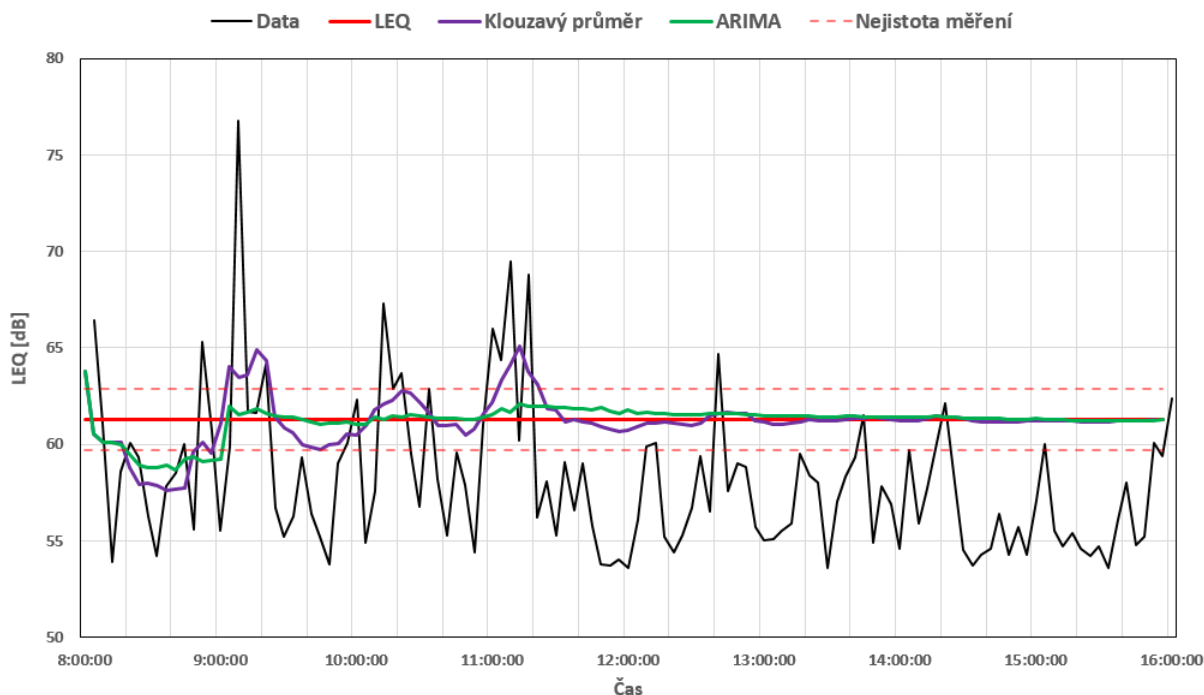
Obrázek 6.9: Zobrazení stacionarity dat v čase na základě ADF testu - 14.5.2018

Z výsledků je patrné, že data nemají stacionární charakter pouze na začátku intervalu a zhruba od 30. hodnoty (10:00) jsou již velmi stacionární. K diferencování časové řady tedy bude docházet pouze v malém měřítku na začátku intervalu.

6.3 Vyhodnocení predikčního algoritmu

První možností využití vytvořeného adaptivního ARIMA algoritmu je na bázi denního prediktoru. Ten funguje tak, že řídicí počítač po každém získání nové LEQ vezme aktuální naměřenou časovou řadu a tu podrobí predikčnímu algoritmu. Je tedy nutné vypočítat všechny testy a zvolit správný model, který je následně využit k predikci. Tato operace je poněkud výpočetně náročnější a pro delší časové řady může trvat lehce přes dvě minuty. Tento čas je akceptovatelný díky časové prodlevě čtyři minut mezi jednotlivými hodnotami LEQ. Přesto by bylo vhodnější použít jako řídicí počítač výkonnější Raspberry 3 nebo zredukovat počet testovaných modelů na $p = 4$, $q = 4$.

Graficky znázorněné výsledky predikce pro jeden den jsou na následujícím grafu (viz obrázek 6.10), kde je srovnána predikce pomocí adaptivního algoritmu ARIMA a dále pomocí klasického klouzavého průměru se zpožděním pěti vzorků. Červená čára znázorňuje výslednou LEQ celého intervalu. Čerchované pásmo kolem této hodnoty potom zobrazuje nejistotu měření $U_{AB} = 1,6$ dB pro měření hluku v pracovním prostředí [59]. Výsledek predikce by měl v ideálním případě maximálně konvergovat k výsledné LEQ a nepřesáhnout hranice jejího pásma.



Obrázek 6.10: Znázornění průběžné predikce koncové LEQ - 15.5.2018

Z grafu je patrné, že model ARIMA začne vykazovat velmi přesnou predikci zhruba od 10:00, kdy přepne z klasického průměrování na adaptivní algoritmus ARIMA. Klouzavý průměr zde vykazuje známky opožděné reakce dané krátkodobou analýzou minulosti. Přesto je od 11:00 velmi srovnatelný s výsledky algoritmu ARIMA. Uspokojivý výsledek obou algoritmů je dán převážně stacionárním charakterem dat a absencí mimořádných událostí v druhé polovině měřeného úseku.

Chyba predikce byla ještě vyjádřena pomocí metriky MSE a MAPE. Nejlepší a nejhorší výsledek se nachází v následující tabulce (viz tabulka 6.2), kde vyšší hodnota znamená horší odhad predikce. Metrika MAPE zde lépe popisuje chybu predikce neboť, vyjadřuje její hodnotu v procentech, a tak si lze udělat lepší představu o účinnosti algoritmu.

Pokud bychom vykreslily chybu predikce MSE a MAPE v závislosti na čase, tudíž v jednotlivých bodech měření. Nevzniklo by nám nic jiného než pouze převrácená hodnota průběžné predikce (viz obrázek 6.10).

Tabulka 6.2: Výsledky predikce pro jednotlivé dny

Datum	MSE	MAPE
15.5	0,63	0,75%
17.5	6,2	2,6%

Druhou možností použití algoritmu je k predikci napříč naměřenými dny (statistická data). Celý proces predikce v tomto případě proběhne vždy na konci dne, kdy z již z naměřených dat z minulosti vznikne následující den. Ten je potom využit k doplnění intervalu a predikci LEQ v každém bodě měření. Výhodou tohoto přístupu je, že již na začátku dne známe celý jeho průběh a koncovou hodnotu LEQ. Pokud máme dostatek naměřených dat, tak je vhodné predikci rozdělit na jednotlivé dny a mít tak model pro každý den v týdnu. To se hodí zejména pro prostředí s flexibilní délkou směny nebo pracovními činnostmi závislými na dnech v týdnu. Pravidelnosti mohou být zachyceny nejen v jednotlivých dnech týdnu, ale také v dlouhodobějším měřítku, kde na hladinu hluku může mít vliv například roční období nebo prázdninový cyklus. Tyto pravidelnosti velmi závisí na daném prostředí a jeho podmínkách, avšak po jejich odhalení může dojít k velkému zpřesnění samotné predikce.

Závěr

V této diplomové práci jsem se zabýval systémem pro měření hluku a predikci ekvivalentní hladiny akustického tlaku pomocí sítě cenově dostupných zkalibrovaných bezdrátových senzorů. Cílem práce bylo navrhnout a experimentálně ověřit funkčnost celého systému počínaje snímáním ekvivalentní hladiny akustického tlaku, přes bezdrátový přenos dat a konče predikčním algoritmem, jež je schopný vyhodnocovat ekvivalentní hladinu akustického tlaku na konci stanoveného intervalu.

V teoretické části práce jsem se nejprve zaměřil na problematiku měření hluku. Byly zde popsány hygienické limity hladiny hluku, které by měly být dodržovány napříč Evropou v zájmu ochrany lidského zdraví. Dále byly shrnuty současné metody měření hluku pomocí zvukoměru a monitorovacích stanic. Provedena byla také analýza a srovnání nynějších bezdrátových technologií, které se dají využít v oblasti IoT. Jednalo se o technologie pro bezdrátové sítě krátkého dosahu a dále sítě LPWAN působící na území České republiky, které byly prozkoumány podrobněji. V neposlední řadě byla provedena detailní analýza dostupných vestavěných platforem a jejich způsobů snímání a zpracování zvuku. Výstupem této části je výběr osmi platforem, které se jeví jako vhodné pro účely IoT. Nakonec byly v rámci teoretické části práce podány základy ohledně analýzy časových řad a nejčastěji používaných modelů za účelem jejich predikce. Na základě těchto teoretických podkladů byl navrhnout a sestaven systém skládající se ze tří hlavních částí. Algoritmy celého systému byly až na serverový skript (PHP jazyk) napsány v programovacím jazyku Python s využitím celé řady knihoven (PyAudio, Statsmodels, PySerial, pandas atd.).

První částí bylo samotné snímání hluku a výpočet ekvivalentní hladiny akustického tlaku pomocí senzoru založeném na jednodeskovém počítači Raspberry Pi Zero W. Snímání bylo realizováno za pomoci využití USB zvukové karty a k ní připojeného jack 3,5 mm mikrofonu. Za účelem kalibrace mikrofonu byly změřeny jeho mikrofonní charakteristiky v polo-bezodrazové komoře. Výstupem tohoto měření byla amplitudová kalibrace mikrofonu a úprava jeho frekvenční charakteristiky. Přestože se konstrukce senzoru ukázala jako vhodné řešení dané úlohy, bylo by žádoucí provést několik dalších vylepšení, která by vedla ke zvýšení přesnosti jeho měření. Příkladem může být velká citlivost elektretového mikrofonu na otřesy okolí. Tento neduh by se dal například vyřešit vyplněním krabičky

některým z izolačních materiálů nebo vytvořením plovoucí konstrukce všech komponent, která by zabráňovala přenosům chvění z krabičky na mikrofon. Dalším vylepšení senzoru by mohl být systém automatického přepínání mezi zdroji napájení v případě výpadku proudu. Současné řešení bohužel vede k rychlému opotřebení baterií v powerbance, a tak je otázkou, jaká bude její celková životnost.

Druhou úlohou systému je komunikace mezi senzory a řídicím počítačem. Ta je realizována pomocí LPWAN technologie Sigfox a jednoduchého přeměrovávání naměřených hodnot na pronajatý server. Tento druh komunikace se pro navrhovaný systém prokázal jako naprosto dostačující. Vylepšením by však mohlo být využití poskytnutých čtyř zpráv směrem k senzoru. Ty by mohly například sloužit k dálkovému spouštění senzorů, které jsou momentálně předem nadefinované na pevnou dobu snímání (8:00 - 16:00).

Poslední částí systému je zpracování dat řídicím počítačem Raspberry Pi 2 a průběžné predikce ekvivalentní hladiny akustického tlaku za pomoci využití adaptivního modelu ARIMA. Původní myšlenkou byla snaha o vytvoření univerzálního predikčního systému, který by byl naprosto nezávislý na prostředí, ve kterém se nachází. Vytvořit takový systém je bohužel velmi obtížné, a proto byl algoritmus navržen na použití ve dvou různých formách. První možností jeho využití je na bázi denního prediktoru jakožto algoritmu počítajícího konečnou hodnotu ekvivalentní hladiny akustického tlaku na základě změřených hodnot ze stejného dne. V tomto případě není třeba do algoritmu vkládat jiná vstupní data nežli ta aktuálně naměřená. Nevýhodou tohoto systému je, že počítaná predikce je založená pouze na minulých hodnotách stejného dne, a tak je jeho reakce na neočekávaně události podstatně pomalejší. Dále nebere v úvahu typický průběh hladiny hluku konkrétního dne z minulosti, a tak nedokáže odhadnout, zdali budoucnost přinese zlepšení nebo zhoršení vůči aktuálnímu stavu. Druhou, poměrně tradiční možností, je použití navrženého algoritmu na základě využití statistických dat získaných dlouhodobým měřením, které by v ideálním případě mělo trvat alespoň dva měsíce. Vzhledem k nedostatečnému množství vstupních dat a k faktu, že jejich umělé vygenerování je velmi náročné, nebyla tato možnost otestována. To převážně z důvodů jejich silné časové závislosti a různých souvislostí mezi jednotlivými dny. V případě, že by však takováto data byla k dispozici, bylo by velmi vhodné využít jeden z modernějších přístupů (například ve formě neuronových sítí).

Sestavený systém pro měření hluku a predikci ekvivalentní hladiny akustického tlaku popsany v této diplomové práci nachází široké využití v praxi. Jako příklad může být zmíněno jeho využití pro velkoplošné monitorování dopravy a její regulace na základě hladin hluku. Systém by se také dal využít v jakýchkoliv pracovních podmínkách, kde by byl provozovatel například donucen vypnout část běžících strojů nebo úplně ukončit pracovní dobu z důvodu hrozícího překročení ekvivalentní hladiny akustického tlaku.

Seznam tabulek

1.1	Hodnoty korekčních filtrů	4
1.2	Hluk na pracovišti	5
1.3	Shrnutí technických požadavků na zvukoměrné zařízení dle ČSN EN IEC 61672-1	7
1.4	Porovnání parametrů tří NMT od hlavních výrobců	9
2.1	Souhrn bezdrátových sítí krátkého dosahu	13
2.2	Kity pro prototypování k síti SigFox	18
2.3	Srovnání LPWAN technologií působících na území České republiky	25
3.1	Srovnání produktů BeagleBoard	27
3.2	Srovnání modelů RPi	29
3.3	Srovnání Arduino produktů určených pro IoT	32
3.4	Produkty značky Pycom	33
3.5	Srovnání platforem vhodných pro IoT účely	39
5.1	Technické specifikace testovaných mikrofónů	48
5.2	Volba modelu na základě informačního kritéria AIC	64
6.1	Finanční náklady SoundFox senzoru	65
6.2	Výsledky predikce pro jednotlivé dny	74

Seznam obrázků

1.1	Blokové schéma zvukoměru	6
1.2	Ukázky tří zvukoměrných zařízení - Norsnic 140, Svantek 971 a Brüel & Kjaer 2250-S	7
1.3	Ukázky tří NMT - Nor 1530, Svantek 258 a Brüel & Kjaer 3639 - E, G	8
2.1	IoT komunikační protokoly	11
2.2	Výbrané topologie sítí	12
2.3	Základní charakteristiky LPWAN technologií	14
2.4	Sigfox UNB technologie	15
2.5	Architektura technologie Sigfox	16
2.6	Pokrytí technologií Sigfox	17
2.7	LPWAN Sigfox node breakout	18
2.8	Model technologie Lora	19
2.9	Architektura technologie LoRa	20
2.10	Adaptivní datový tok technologie LoRa	21
2.11	Pokrytí technologií LoRa	22
2.12	Módy technologie NB-IoT	23
3.1	Příklady výrobců vestavěných platforem	26
3.2	BeagleBone Black a BeagleBone GPS/LTE Cape	28
3.3	Raspberry Pi 3	30
3.4	Arduino GSM Shield a Arduino Wireless Shield	31
3.5	Arduino YÚN a Arduino MKR Fox 1200	32
3.6	SiPy a Pysense	33
3.7	ESP8266 a Omega 2 Plus	34
3.8	Orange Pi Zero Plus 2 a Orange Pi 2G-IoT	35
3.9	Cirus Logic Audio Card a Wolfson Audio Card	37
3.10	Elektretový mikrofón MAX4466 a A/D převodník MCP3008	37
4.1	Predikce času - jednoduché metody	42

5.1	OS Raspbian a programovací jazyk Python	47
5.2	Mikrofon MI-305 Plug & Play a Gembird MIC-205	48
5.3	Schéma zpracování dat	50
5.4	Frekvenční charakteristika váhovacích filtru typu A	51
5.5	Princip měření v polo-bezodrazové komoře	52
5.6	Algoritmus skriptu <i>SoundFox_kalibrace.py</i>	53
5.7	Porovnání frekvenčních charakteristik s vypnutým váhováním typu A	54
5.8	Porovnání rozdílu frekvenčních charakteristik snímacích zařízení ku referenčnímu zvukoměru s vypnutým váhováním typu A	55
5.9	Porovnání frekvenčních charakteristik se zapnutým váhováním typu A	55
5.10	Porovnání rozdílu frekvenčních charakteristik snímacích zařízení ku referenčnímu zvukoměru se zapnutým váhováním typu A	56
5.11	Amplitudová závislost mikrofonu vůči zvukoměru pro bílý šum a sinus o frekvenci 1 kHz	57
5.12	Směrová charakteristika USB mikrofonu	58
5.13	Umístění zvukoměru a mikrofonu při měření mikrofonních charakteristik	58
5.14	Frekvenční charakteristika použité a upravené váhovací křivky	59
5.15	Frekvenční charakteristika dolní propusti	60
5.16	Porovnání frekvenčních charakteristik s aplikovanými úpravami	60
5.17	Obecné schéma komunikace	61
5.18	Ukázka Sigfox databáze	62
5.19	Ukázka MySQL databáze	62
5.20	Schéma komunikace SoundFox	63
5.21	Diagram predikčního algoritmu ARIMA	64
6.1	Uspořádání komponent uvnitř krabičky	66
6.2	Uspořádání komponent uvnitř krabičky	67
6.3	3D model ochranného krytování senzoru	68
6.4	Online zobrazování dat pomocí knihovny Plotly	68
6.5	Umístění senzoru v místě měření	69
6.6	Průměrná LEQ napříč všemi dny	70
6.7	Klouzavý průměr a směrodatná odchylka v čase - 14.5.2018	71
6.8	Ukázka výsledku ADF testu	71
6.9	Zobrazení stacionarity dat v čase na základě ADF testu - 14.5.2018	72
6.10	Znázornění průběžné predikce koncové LEQ - 15.5.2018	73

Příloha A - Struktura datového nosiče

Součástí přílohy je datový disk, který obsahuje především implementace napsané v programovacím jazyku Python. Dále disk obsahuje samotnou práci ve formě PDF a naměřená data použitá pro testování predikčních algoritmů.

/DIP

/Toman_DP_2018.pdf

/Implementace

/SoundFox_senzor.py

/SoundFox_server.py

/Predikce.py

/Plot.py

/SoundFox_kalibrace.py

/SoundFox_bridge.php

/Data

/Namerena_data.csv

/Namerena_data.xlsx

/Senzor_box

/Box_downer.stl

/Box_roof.stl

/Box_measurements.pdf

Příloha B - Implementace

SoundFox_senzor.py

Skript umístěný na SD kartě senzoru. Zajišťuje snímání hladiny akustického tlaku, filtraci (váhování a dolní propust), odesílání dat a ukládání dat do vnitřní paměti ve formě .csv souboru.

SoundFox_server.py

Skript umístěný v paměti řídicího počítače. Jeho úkolem je pravidelné stahování naměřených dat ze serveru a ovládání následujících dvou skriptů (Predikce.py a Plot.py).

Predikce.py

Součást programu SoundFox_server.py pro výpočet predikce LEQ.

Plot.py

Součást programu SoundFox_server.py pro vykreslování dat online.

SoundFox_kalibrace.py

Program sloužící pro zjednodušení měření mikrofonních charakteristik a jejich kalibrace. Automaticky přehrává libovolný signál pomocí zapojeného reprodukcčního zařízení a synchronně měří pomocí zařízení snímacích. Nakonec ukládá data ve formě .csv souboru.

SoundFox_bridge.php

Skript (napsaný v programovacím jazyce PHP) umístěný na mezi-serveru, který automaticky přijímá data ze SigFox cloudového úložiště a ukládá je do .csv souboru a MySQL databáze.

Literatura

- [1] JIŘÍČEK, Ondřej, *Úvod do akustiky*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2002, s. 54–63.
- [2] Zákony pro lidi [online]. [vid. 22.08.2017].
Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-258>.
- [3] Zákony pro lidi [online]. [vid. 22.08.2017].
Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2011-272>.
- [4] ČSN EN IEC 61672-1 Elektroakustika – Zvukoměry - Část 1: Technické požadavky. 2003.
- [5] NINIKRISHNA, T., Sutapa SARKAR, Richa TENGSHI, Mahesh K. JHA, Laxmi SHARMA, V. K. DALIYA a Sudhir K. ROUSTRAY. Software defined IoT: Issues and challenges. In: *2017 International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)* [online]. IEEE, 2017, s. 723-726.
- [6] RATASUK, Rapeepat, Nitin MANGALVEDHE a Amitava GHOSH. Overview of LTE enhancements for cellular IoT. In: *2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)* [online]. IEEE, 2015, s. 2293-2297.
- [7] AKPAKWU, Godfrey Anuga, Bruno J. SILVA, Gerhard P. HANCKE a Adnan M. ABU-MAHFOUZ. A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges. *IEEE Access* [online]. 2018, s. 3619-3647.
- [8] AL-SARAWI, Shadi, Mohammed ANBAR, Kamal ALIEYAN a Mahmood ALZUBAIDI. Internet of Things (IoT) communication protocols: Review. In: *2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT)* [online]. IEEE, 2017, s. 685-690.
- [9] ANDRADE, Nelson, Gabriel GUIMARAES, Helga DORNELAS, Pedro TOLEDO, Hamilton KLIMACH a Sergio BAMPI. Low Power IEEE 802.11ah Receiver System-Level Design Aiming for IoT Applications. In: *30th Symposium on Integrated Circuits and Systems Design (SBCCI)* [online]. IEEE, 2017, s. 11-16.
- [10] SAMIE, Farzad, Lars BAUER a Jorg HENKEL. Low Power IEEE 802.11ah Receiver System-Level Design Aiming for IoT Applications. In: *2016 International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS)* [online]. IEEE, 2016, s. 1-10.
- [11] DRAGOMIR, Dan, Laura GHEORGHE, Sergiu COSTEA a Alexandru RADOVICI. A Survey on Secure Communication Protocols for IoT Systems. In: *2016 International Workshop on Secure Internet of Things (SIoT)* [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 47-62.
- [12] QIU, Yue a Maode MA. Secure Group Mobility Support for 6LoWPAN Networks. *IEEE Internet of Things Journal* [online]. 2018, s. 1131-1141.

- [13] TOSCANO, Emanuele a Lucia LO BELLO. Comparative assessments of IEEE 802.15.4/ZigBee and 6LoWPAN for low-power industrial WSNs in realistic scenarios. In: *2012 9th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems* [online]. IEEE, 2012, s. 115-124.
- [14] YASSEIN, Muneer Bani, Wail MARDINI a Ashwaq KHALIL. Smart homes automation using Z-wave protocol. In: *2016 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)* [online]. IEEE, 2016, s. 1-6.
- [15] ALSHEHRI, Abdallah A., Carlos H. MARTINS a Ian F. AKYILDIZ. Wireless Fra-cBot (Sensor) Nodes: Performance evaluation of inductively coupled near field communication (NFC). In: *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)* [online]. IEEE, 2018, s. 1-6.
- [16] MARKSTEINER, Stefan, Victor Juan Exposito JIMENEZ, Heribert VALIANT a Herwig ZEINER. An overview of wireless IoT protocol security in the smart home domain. In: *2017 Internet of Things Business Models, Users, and Networks* [online]. IEEE, 2017, s. 1-8.
- [17] MEKKI, Kais, Eddy BAJIC, Frederic CHAXEL a Fernand MEYER. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express* [online]. 2018, s. 1-6.
- [18] XU, Jun, Junmei YAO, Lu WANG, Zhong MING, Kaishun WU a Lei CHEN. Narrowband Internet of Things: Evolutions, Technologies and Open Issues. In: *IEEE Internet of Things Journal* [online]. IEEE, 2017, s. 1-13.
- [19] SigFox [online]. [vid. 16.03.2018]. Dostupné z: <https://www.sigfox.com/>.
- [20] POURSAFAR, Noushin, Md Eshrat E ALAHI a Subhas MUKHOPADHYAY. Long-range wireless technologies for IoT applications: A review. In: *2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST)* [online]. IEEE, 2017, s. 1-6.
- [21] PHUNG, Kieu-Ha, Hieu TRAN, Quan NGUYEN, Truong Thu HUONG a Thanh-Long NGUYEN. Analysis and assessment of LoRaWAN. In: *2018 2nd International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom)* [online]. IEEE, 2018, s. 241-246.
- [22] BARDYN, Jean-Paul, Thierry MELLY, Olivier SELLER a Nicolas SORNIN. IoT: The era of LPWAN is starting now. In: *ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference* [online]. IEEE, 2016, s. 25-30.
- [23] Ericsson [online]. [vid. 16.03.2018]. Dostupné z: <https://www.ericsson.com/en/ericsson-technology-review/archive/2016/nb-iot-a-sustainable-technology-for-connecting-billions-of-devices>.
- [24] RAZA, Usman, Parag KULKARNI a Mahesh SOORIYABANDARA. Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* [online]. 2017, **19**(2), s. 855-873.
- [25] DE CARVALHO SILVA, Jonathan, Joel RODRIGUES, Antonio M. ALBERTI, Petar ŠOLIĆ a Andre L. L. AQUINO. LoRaWAN — A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities. In: *2017 2nd International Multi-disciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)* [online]. IEEE, 2017, s. 1-6.

- [26] ADELANTADO, Ferran, Xavier VILAJOSANA, Pere TUSET-PEIRO, Borja MARTINEZ, Joan MELIA-SEGUI a Thomas WATTEYNE. Understanding the Limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine* [online]. 2017, **55**(9), s. 34-40.
- [27] TADAYONI, Reza, Anders HENTEN a Morten FALCH. Internet of Things — The battle of standards. In: *2017 Internet of Things Business Models, Users, and Networks* [online]. IEEE, 2017, 2017, s. 1-7.
- [28] VEJLGAARD, Benny, Mads LAURIDSEN, Huan NGUYEN, Istvan Z. KOVACS, Preben MOGENSEN a Mads SORENSEN. Coverage and Capacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT. In: *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)* [online]. IEEE, 2017, s. 1-5.
- [29] GLORIA, Andre, Francisco CERCAS a Nuno SOUTO. Comparison of communication protocols for low cost Internet of Things devices. In: *2017 South Eastern European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)* [online]. IEEE, 2017, s. 1-6.
- [30] SINGH, Kiran Jot a Divneet Singh KAPOOR. Create Your Own Internet of Things: A survey of IoT platforms. *IEEE Consumer Electronics Magazine* [online]. 2017, **6**(2), s. 57-68.
- [31] NAYYAR, Anand a Vikram PURI. A Review of Beaglebone Smart Board's-A Linux/Android Powered Low Cost Development Platform Based on ARM Technology. In: *2015 9th International Conference on Future Generation Communication and Networking (FGCN)* [online]. IEEE, 2015, s. 55-63.
- [32] RAO, A. Ravishankar, Daniel CLARKE, Manthan BHDIYADRA a Siddharth PHADKE. Development of an embedded system course to teach the Internet-of-Things. In: *2018 IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC)* [online]. IEEE, 2018, s. 154-160.
- [33] VUJOVIC, Vladimir a Mirjana MAKSIMOVIC. Raspberry Pi as a Wireless Sensor node: Performances and constraints. In: *2014 37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)* [online]. IEEE, 2014, s. 1013-1018.
- [34] SCHMIDT, Maik. *Raspberry Pi: a quick-start guide. Second edition*. Dallas, Texas: The Pragmatic Bookshelf, 2014. ISBN 978-1-93778-580-2.
- [35] BEKAROO, Girish a Aditya SANTOKHEE. Power consumption of the Raspberry Pi: A comparative analysis. In: *2016 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (EmergiTech)* [online]. IEEE, 2016, s. 361-366.
- [36] IBRAHIM, Saeed, Nawwaf AL HARMI, Ebrahim AL NAQBI, Farkhund IQBAL, Djedjiga MOUHEB a Omar ALFANDI. Remote Data Acquisition Using Raspberry Pi3. In: *2018 9th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)* [online]. IEEE, 2018, s. 1-5.
- [37] SINGH, Kiran Jot a Divneet Singh KAPOOR. *Create Your Own Internet of Things: A survey of IoT platforms. IEEE Consumer Electronics Magazine* [online]. 2017, s. 57-68.

- [38] SHYAMALA, D., D. SWATHI, J. Laxmi PRASANNA a A. AJITHA. IoT platform for condition monitoring of industrial motors. In: *2017 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)* [online]. IEEE, 2017, s. 260-265.
- [39] SEGURA-GARCIA, Jaume, Santiago FELICI-CASTELL, Maximo COBOS, Juan J. PEREZ-SOLANO a Juan M. NAVARRO. Low-Cost Alternatives for Urban Noise Nuisance Monitoring Using Wireless Sensor Networks. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2015, **15**(2), 836-844.
- [40] JERONIMO-MARTINEZ, Luis Enrique, Raul E. MENENDEZ-MORA a Holman BOLIVAR. Forecasting acute respiratory infection cases in Southern Bogota: EARS vs. ARIMA and SARIMA. In: *2017 Congreso Internacional de Innovacion y Tendencias en Ingenieria (CONITI)* [online]. IEEE, 2017, s. 1-6.
- [41] HENG, Tiancheng, Shuhong GONG a Houbao SHI. The ARIMA prediction model of rain-induced dynamic attenuation characteristics. In: *ISAPE2012* [online]. IEEE, 2012, s. 587-590.
- [42] QONITA, Adiba, Annas Gading PERTIWI a Triyanna WIDIYANINGTYAS. Prediction of rupiah against US dollar by using ARIMA. In: *2017 4th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)* [online]. IEEE, 2017, s. 1-5.
- [43] DATASCIENCE [online]. [vid. 15.05.2018].
Dostupné z: <https://www.datascience.com/blog/introduction-to-forecasting-with-arma-in-r-learn-data-science-tutorials>.
- [44] ARLT, Josef a Markéta ARLTOVÁ. Finanční časové řady: vlastnosti, metody modelování, příklady a aplikace. Vydavatelství Grada, Praha, 2003, s. 104-106.
- [45] DA-MING SHI, JUN-BIN GAO a R. TILANI. Univariate time series forecasting with fuzzy CMAC. In: *Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No.04EX826)* [online]. IEEE, 2004, s. 4166-4170.
- [46] YANG, Yanming, Haiyan ZHENG a Ruili ZHANG. Prediction and analysis of aircraft failure rate based on SARIMA model. In: *2017 2nd IEEE International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCIA)* [online]. IEEE, 2017, s. 567-571.
- [47] BOKOVÁ, Kateřina. Predikce časových řad. Praha, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Matematicko-fyzikální fakulta. Vedoucí práce Mgr. Martin Pilát, Ph.D.
- [48] REN, Xuejian a Xiang CHEN. Discovery and Dynamic Prediction of User's Interest Based on ARIMA. In: *2017 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)* [online]. IEEE, 2017, s. 1-8.
- [49] EVANS, Tom a Jonathan COOPER. Comparison of predicted and measured wind farm noise levels and implications for assessments of new wind farms. *Acoustics Australia*. 2012, s. 1-9.
- [50] SUTHANAYA, Putu Alit. Modelling Road Traffic Noise for Collector Road (Case Study of Denpasar City). *Procedia Engineering* [online]. 2015, **125**, 467-473.

- [51] BARBOZA, Michael J., P.E. DEE, Sharon Paul CARPENTER a Leslie E. ROCHE. Prediction of Traffic Noise: A Screening Technique. *Journal of the Air & Waste Management Association* [online]. 2012, **45**(9), s. 703-708.
- [52] GOLMOHAMMADI J., M. ABBASPOR a H. MAHJUB. A Compact model for predicting road traffic noise. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering (IJEHSE)* [online]. 2009, **6**(3), s. 181-186.
- [53] ZHANG, Hong a Yun PEI. Simulation-Based Prediction of Equivalent Continuous Noises during Construction Processes. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. 2016, **13**(8), 818, s. 1-13.
- [54] JIROVEC, Jakub. Možnosti a parametry MEMS mikrofonů. Plzeň, 2015. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.
- [55] BLASCO, Natalia, Maria de DIEGO, Román BELDA, Ismael de FEZ, Pau ARCE, Francisco J. MARTINÉZ-ZALDÍVAR, Alberto GONZÁLEZ, Juan C. GUERRI. Distributed Sensor Network for Noise Monitoring in Industrial Environment with Raspberry Pi. In: *The Sixth International Conference on Intelligent Systems and Applications (includes InManEnt)* [online]. 2017, s. 51-55.
- [56] MARINOV, Marin, Dimitar NIKOLOV, Borislav GANEV a Georgi NIKOLOV. Environmental noise monitoring and mapping. In: *2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* [online]. IEEE, 2017, s. 1-7.
- [57] HAKALA, Ismo, Ilkka KIVELA, Jukka IHALAINEN, Jari LUOMALA a Chao GAO. Design of Low-Cost Noise Measurement Sensor Network: Sensor Function Design. In: *2010 First International Conference on Sensor Device Technologies and Applications* [online]. IEEE, 2010, s. 172-179.
- [58] NORIEGA-LINARES, Juan a Juan NAVARRO RUIZ. On the Application of the Raspberry Pi as an Advanced Acoustic Sensor Network for Noise Monitoring. *Electronics* [online]. 2016, **5**(4), 74, s. 1-14.
- [59] HEM-300-26.4.01-16344 – Metodický návod pro měření hluku v pracovním prostředí a vibrací [online]. [vid. 18.5.2018].
Dostupné z: <http://www.akustickecentrum.cz/legislativa/metodicky-navod-pracovni-a-mimopracovni-prostredi.pdf>.