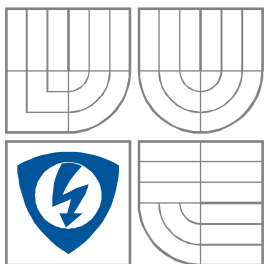


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# MĚŘENÍ OKAMŽITÉ HODNOTY INTENZITY DEŠTĚ AKUSTICKOU METODOU

MEASUREMENT OF THE RAIN RATE INSTANTANEOUS VALUE USING ACOUSTIC METHOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Daniel Kresta

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:** Daniel Kresta

**ID:** 146871

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

**Měření okamžité hodnoty intenzity deště akustickou metodou**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem záznamu a zpracování zvukového signálu. Provedte spektrální analýzu akustického signálu vyvolaného deštěm na vhodné kovové ploše. Charakterizujte akustický záznam deště ve spektrální oblasti a proveďte dělení typických situací podle intenzity deště. Navrhněte experimentální pracoviště.

Navržené pracoviště sestavte a experimentálně ověřte jeho možnosti a přesnost měření na dostatečném vzorku. Experimentálně získaná data musí být zpracována pomocí PC programu a připravena k porovnání s jinými meteorologickými veličinami. Naměřené výsledky několika různých atmosférických dešťových situací zpracujte a porovnejte s jejich měřením pomocí standardního srážkoměru.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HOLČÍK, L. Spektrální analýza hudební skladby. Diplomová práce. Brno: Fakulta informatiky Masarykovy university. 2009.

[2] PRCHAL, J. Signály a soustavy. Praha: SNTL. 1987.

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 30.5.2014

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá realizací měření intenzit srážek pomocí akustické metody. Je rozdělena na čtyři části. V první části práce jsou rozebrány teoretické poznatky aplikované v praktické části. Druhá část obsahuje návrh pracoviště pro dané měření. V třetí části jsou uvedené experimentální nahrávky a jejich analýza. Dále jsou zde zpracovány naměřené hodnoty a jejich využití v měřicím programu. Ve čtvrté závěrečné části jsou shrnuty výsledky práce, výhody a nevýhody použití akustického měřiče srážek.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Děšť, intenzita srážek, akustika, mikrofon, digitalizace, zpracování signálu, spektrum, Matlab

## **ABSTRACT**

This thesis deals with implementation of the rainfall rate measurement using an acoustic method. It is divided into four parts. In the first part of the thesis a necessary theoretical knowledge is analysed. The second part contains a design of a workplace used for the measurement. The third part presents and analyses important experimental recordings acquired in the workplace. Then all measured values are processed and applied in the measuring program. The last part summarizes results of the thesis, advantages and disadvantages of using the acoustic rainfall rate meter.

## **KEYWORDS**

Rain, rainfall rate, acoustics, microphone, digitizing, signal processing, spectrum, Matlab

KRESTA, D. *Měření okamžité hodnoty intenzity deště akustickou metodou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2014. 32 s., 5 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření okamžité hodnoty intenzity deště akustickou metodou jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne 30. května 2014

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Otakaru Wilfertovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 30. května 2014

.....  
podpis autora

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>vi</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>viii</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Teoretická část</b>	<b>2</b>
1.1 Dešťové srážky .....	2
1.1.1 Charakteristiky srážek .....	3
1.1.2 Vliv deště na rádiový a optický přenos .....	3
1.1.3 Měření dešťových srážek .....	5
1.1.4 Akustický senzor Raincap .....	6
1.2 Akustika.....	7
1.2.1 Zvuk.....	7
1.2.2 Základní akustické veličiny .....	8
1.2.3 Mikrofony .....	9
1.2.4 Elektrické charakteristiky mikrofonů .....	9
1.3 Signály a jejich zpracování .....	10
1.3.1 Periodický signál .....	10
1.3.2 Spektrum signálu .....	11
1.3.3 Spektrální hustota energie.....	11
1.3.4 Převod z analogových signálů na číslicové .....	12
1.3.5 Nežádoucí efekty digitalizace .....	13
<b>2 Měřicí pracoviště</b>	<b>15</b>
2.1 Kovová plocha .....	15
2.2 Mikrofon.....	15
2.3 Zesilovač a A/D převodník .....	16
2.4 Zpracování a nahrávání .....	17
<b>3 Měření</b>	<b>18</b>
3.1 Akustický signál vyvolaný deštěm.....	18
3.2 Akustický signál vyvolaný jednou dešťovou kapkou .....	19

3.3	Akustický signál vyvolaný uměle vytvořenými kapkami .....	20
3.4	Měření akustických signálů vyvolaných deštěm .....	21
3.4.1	Uměle generovaný déšť .....	22
3.4.2	Skutečný déšť .....	23
3.4.3	Celková závislost intenzity deště na výkonu signálu .....	24
3.5	Měřicí program intenzit srážek .....	25
3.5.1	Průměrování zaznamenaných dat.....	27
<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>28</b>
	<b>Literatura</b>	<b>29</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>31</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>33</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Závislost konečné rychlosti na průměru kapky podle vztahu 1.1 .....	2
Obr. 1.2:	Závislost útlumu $\alpha$ na intenzitě deště při různých frekvencích v rozmezí od 10 GHz do 150 GHz.....	4
Obr. 1.3:	Závislost útlumu $\alpha$ na frekvenci při intenzitě srážek $R$ rovné 1 mm/h .....	4
Obr. 1.4:	Jednoduchý srážkoměr (převzato z [8]) .....	5
Obr. 1.5:	Člunkový srážkoměr (převzato z [10]).....	5
Obr. 1.6:	Akustický srážkoměr pro měření srážek na moři (převzato z [12]).....	6
Obr. 1.7:	Meteorologická stanice WTX520 firmy Vaisala (převzato z [15]) .....	6
Obr. 1.8:	Schéma senzoru Raincap (převzato a upraveno z [13]) .....	7
Obr. 1.9:	Časová závislost akustického tlaku (převzato z [16]) .....	8
Obr. 1.10:	Kulová, kardioidní a hyperkardioidní směrová charakteristika mikrofonu (převzato z [18]).....	10
Obr. 1.11:	Vzorkování a kvantizace signálu; na ose $y$ je počet kvantizačních hladin a na ose $x$ je časový průběh (převzato z [21]) .....	12
Obr. 1.12:	Původní signál ve frekvenční oblasti (první), navzorkovaný signál, kde se projevuje aliasing (druhý) a navzorkovaný signál, kde je splněn vzorkovací teorém (převzato z [22]) .....	13
Obr. 1.13:	Vznik kvantizačního šumu při digitalizaci (převzato a upraveno z [23] ) ...	14
Obr. 2.1:	Blokové schéma měřicího pracoviště.....	15
Obr. 2.2:	Sestavené měřicí pracoviště.....	16
Obr. 3.1:	Časový průběh reálného deště .....	18
Obr. 3.2:	Spektrum reálného deště pro rozsah frekvencí od 100 Hz do 10 kHz .....	18
Obr. 3.3:	Spektrogram reálného deště získaný z programu Audacity – na vodorovné ose je čas nahrávky v sekundách a na svislé ose je frekvence v Hertzích ...	19
Obr. 3.4:	Časový průběh akustického signálu generovaného jednou dešťovou kapkou .....	19
Obr. 3.5:	Spektrum zvukového signálu při dopadu dešťové kapky (modré) a v klidovém stavu (červené).....	20
Obr. 3.6:	Časový průběh zvukového signálu uměle vytvořených kapek .....	20
Obr. 3.7:	Spektrum zvukového signálu uměle vytvořených kapek .....	21
Obr. 3.8:	Frekvenční charakteristika použitého filtru .....	21



Obr. 3.9: Závislost intenzity deště na výkonu akustického signálu při uměle vytvořeném dešti.....	23
Obr. 3.10: Závislost intenzity deště na výkonu akustického signálu při skutečném dešti .....	24
Obr. 3.11: Celková změřená závislost intenzity deště R na výkonu signálu P .....	25
Obr. 3.12: Program pro měření intenzity deště .....	25
Obr. 3.13: Průběhy intenzity deště s různou frekvencí záznamu .....	27

# SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1:	Přibližné hodnoty parametrů $a$ a $b$ pro frekvence 1 GHz – 1000 GHz (převzato z [7]).....	4
Tab. 3.1:	Změřené hodnoty výkonu signálu a intenzit uměle vytvořeného deště, kde $P$ je výkon signálu a $R$ je intenzita deště .....	22
Tab. 3.2:	Změřené hodnoty výkonu signálu a intenzit skutečného deště, kde $P$ je výkon signálu a $R$ je intenzita deště .....	23

# ÚVOD

Značným problémem v elektromagnetických komunikacích mohou být atmosférické srážky, konkrétně mlha a déšť. Tyto srážky způsobují rozptyl některých elektromagnetických vln a tím vzniká útlum na rádiovém nebo optickém spoji.

Aby bylo možné zjistit hodnotu tohoto útlumu, je potřeba znát kvantitativní parametry těchto srážek. Pro měření dešťových srážek se nejčastěji využívají srážkoměry nebo ombrografy. Tyto přístroje však většinou měří intenzity za určité delší časové intervaly, nejčastěji během hodiny, popřípadě i minuty. Pro lepší stanovení četnosti a charakteristiky je možno využít kontinuálního měření se stanovením parametrů srážek za velmi krátké časové období, tedy méně než minutu. Jednou z možností pro toto měření je využití právě akustického měření. Při dopadu dešťových srážek na určitý povrch totiž vzniká charakteristický zvuk, který je možno zaznamenat a zpracovat.

Cílem této práce je prozkoumat možnost zpracování tohoto zvukového signálu a využít jeho vlastností k získání dat o intenzitě srážek. Dále je potřeba navrhnout a sestavit experimentální pracoviště, které je možné k tomuto měření používat. Poté by mělo být toto pracoviště využito ke změření intenzit různých dešťových srážek a získaná data by měla být porovnána s údaji jiných měřičů těchto srážkových veličin.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Dešťové srážky

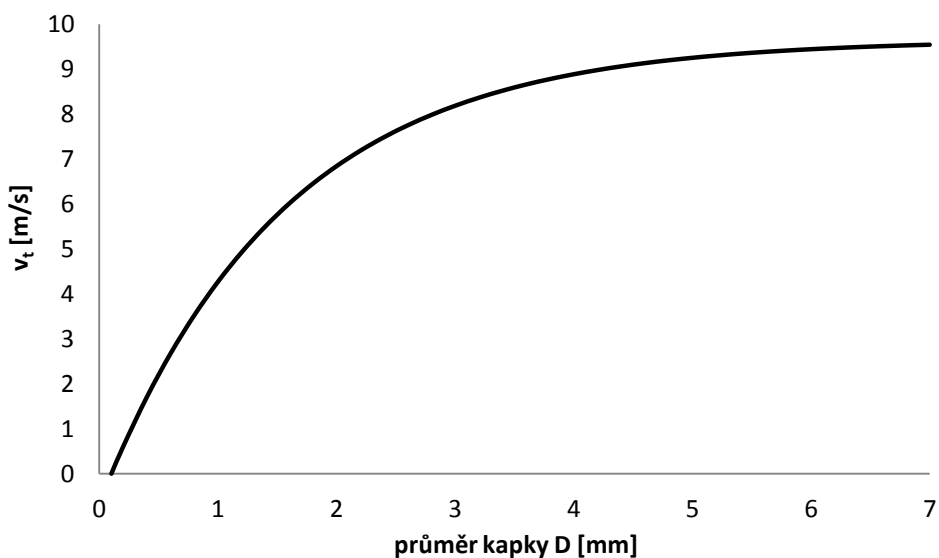
Srážky jsou výsledkem kondenzace a desublimace vodních par v ovzduší a na zemském povrchu. Srážky se podle místa vzniku dělí na vertikální (atmosférické), které tvoří mlha, mrholení, déšť, sníh nebo kroupy, a na horizontální (usazené), které vznikají na zemském povrchu: rosa, jinovatka nebo námraza. [1]

Nejčastějším, pro tuto práci nejdůležitějším, typem srážek je déšť. Jedná se o vertikální srážky tvořené kapkami o průměru od 0,5 mm do 6 mm. Větší kapky mají při pádu vlivem odporu vzduchu tendenci dělit se na menší. Při kondenzaci vodních par v atmosféře vznikají díky přítomnosti kondenzačních jader vodní kapky nebo ledové krystaly, které se díky vzestupným proudům udržují v určité výšce. Během kondenzace však kapky zvětšují svůj objem, až dosáhnou velikosti, kdy je tyto proudy neudrží a srážky začínají padat k zemskému povrchu. [2]

Díky gravitačním silám získává kapka zrychlení nezávislé na její hmotnosti. Při zrychlování se však začíná uplatňovat také odporová síla vzduchu, která na kapku působí z opačného směru. Když se tato odporová síla vyrovná s tíhovou silou, rychlost kapky se ustálí na tzv. konečné rychlosti. Tato rychlost je přímo úměrná velikosti dešťové kapky. Velikost konečné rychlosti je přibližně dána vztahem [3]

$$v_t = 9,65 - 10,3 \exp(-0,65D), \text{ [m/s]} \quad (1.1)$$

kde  $D$  je průměr kapky v milimetrech. [3]



Obr. 1.1: Závislost konečné rychlosti na průměru kapky podle vztahu 1.1

### 1.1.1 Charakteristiky srážek

Je to způsob vyjádření srážek tak, aby se s naměřenými hodnotami dalo dále pracovat a vyhodnocovat je.

**Objem srážek** je celkový objem vody srážek, které spadnou za určitý čas na určitou plochu. Udává se v  $\text{m}^3$ .

**Úhrn srážek** udává množství spadlých srážek za určité období na daném místě. Označuje se písmenem  $H$  a vyjadřuje se výškou vodního sloupce v mm (1 mm srážek odpovídá 1 litru vody na ploše  $1 \text{ m}^2$ ).

**Intenzita deště**  $R$  je úhrn srážek spadlých za určitou časovou jednotku, udává se v mm/min, popřípadě mm/h. Jedná se tedy o derivaci úhrnu srážek podle času definovanou vztahem [4]

$$R = \frac{\Delta H}{\Delta t}, \quad (1.2)$$

kde  $\Delta H$  je změna úhrnu srážek a  $\Delta t$  je délka časového intervalu. Intenzita deště se rozděluje na průměrnou a okamžitou. U průměrné intenzity deště je úhrn konstantní po celou dobu trvání, zatímco u okamžité intenzity se úhrn mění s časem. [1], [4]

Další charakteristikou je **distribuční funkce** intenzit srážek, definovaná jako [6]

$$F_{(x)} = P(X \leq x), \quad (1.3)$$

kde  $F_{(x)}$  je funkce, která reálnému číslu  $x$  přiřazuje pravděpodobnost, že náhodná veličina  $X$  bude mít hodnotu menší nebo rovnu číslu  $x$ . [5]

### 1.1.2 Vliv deště na rádiový a optický přenos

Elektromagnetické vlny s vlnovou délkou menší než 3 cm (tedy s frekvencí větší než 10 GHz) bývají ovlivňovány dešťovými srážkami. Jejich vlnová délka je totiž srovnatelná s velikostí kapek, které dosahují průměru až 6mm. Průchodem rádiových vln vodní kapkou dochází k útlumu, depolarizaci, rozptylu a odrazu vlny od dešťového jádra.

Útlum nosné vlny je způsoben absorpcí energie vlny vodní kapkou a rozptylem nežádoucími směry. Pro okamžitý měrný útlum  $\alpha$  platí vztah [6]

$$\alpha = 8,686 \cdot 10^3 \cdot \frac{2\pi}{k} \cdot \text{Im} \int f_{h,v}(D) \cdot N(D) dD, \text{ [dB/km]} \quad (1.4)$$

kde  $f_{h,v}$  je komplexní rozptylová funkce dešťové kapky,  $D$  je efektivní průměr kapky v mm a  $k$  je vlnové číslo,  $N(D)$  je rozdělovací funkce velikostí dešťových kapek (Drop size distribution).

Hodnota okamžitého měrného útlumu  $\alpha$  se aproximuje vztahem [6]

$$\alpha = a \cdot R^b, \text{ [dB/km]} \quad (1.5)$$

kde  $R$  je intenzita deště v mm/h,  $a$  a  $b$  jsou konstanty závislé na frekvenci, polarizaci a

teplotě a jsou tabelovány. [6]

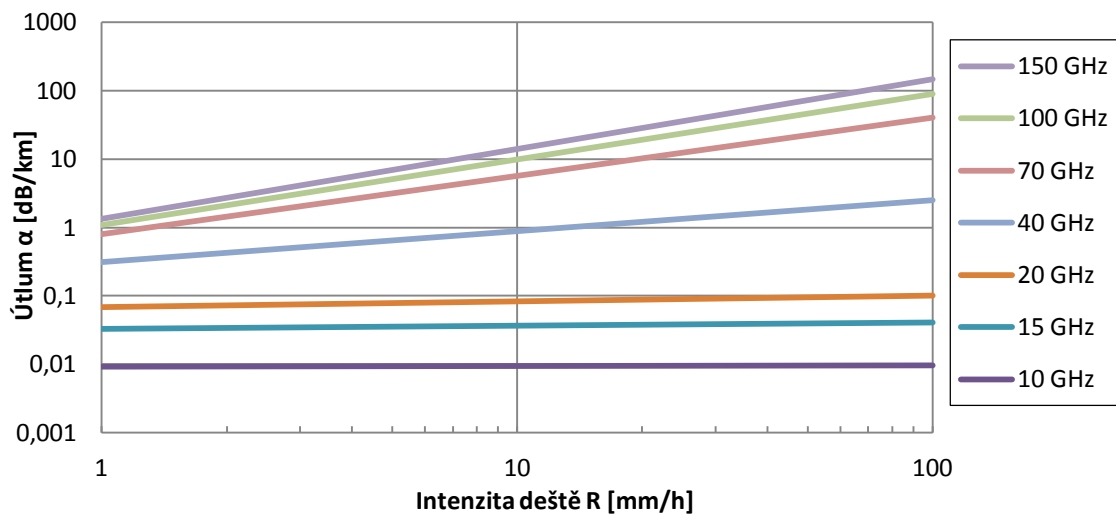
Tab. 1.1: Přibližné hodnoty parametrů  $a$  a  $b$  pro frekvence 1 GHz – 1000 GHz (převzato z [7])

f [Hz]	1	2	4	7	10	15
a	3,84E-05	1,53E-04	6,73E-04	2,82E-03	9,20E-03	3,28E-02
b	3,17E-05	1,15E-04	3,78E-04	2,04E-04	1,11E-02	4,59E-02

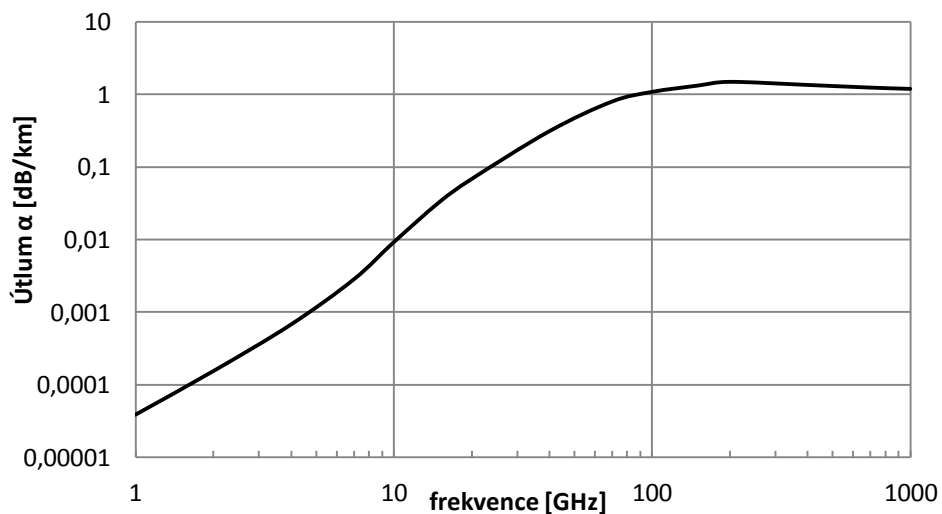
  

f [Hz]	20	40	70	100	150	200	400	700	1000
a	0,0683	0,3120	0,8020	1,0900	1,3300	1,5000	1,3600	1,2500	1,2000
b	0,0859	0,4520	0,8500	0,9580	1,0200	1,0200	0,9580	0,8860	0,8510

Při použití koeficientů  $a$  a  $b$  uvedených v tabulce 1.1 je závislost útlumu na intenzitě deště a frekvenci uvedena na obrázku 1.2 a 1.3.



Obr. 1.2: Závislost útlumu  $\alpha$  na intenzitě deště při různých frekvencích v rozmezí od 10 GHz do 150 GHz



Obr. 1.3: Závislost útlumu  $\alpha$  na frekvenci při intenzitě srážek  $R$  rovné 1 mm/h

### 1.1.3 Měření dešťových srážek

Pro měření objemu dešťových srážek se používají srážkoměry, kterými se zjišťuje hodnota srážkové výšky. Jednoduchý srážkoměr je na obrázku 1.4. Pro zjišťování úhrnu srážek a časových průběhů se používají ombrografy a totalizátory. Ombrografy se používají dvojího druhu: plovákové a překlopné.

U plovákových ombrografů dešťová voda stéká do komory, kde zvyšováním hladiny zvedá plovák. Zařízení v ombrometru průběžně zaznamenává polohu plováku. Když hladina v nádobě dosáhne maxima, komora se vyprázdní do sběrné nádoby a plovák klesne zpět na nulovou hladinu a pokračuje se v záznamu. [1]



Obr. 1.4: Jednoduchý srážkoměr (převzato z [8])

Dalším typem je překlopný ombrograf (častěji člunkový srážkoměr), kde jsou srážky zachytávány v jedné ze dvou nálevek s definovaným objemem. Jakmile nahromaděná voda dosáhne určitého objemu, nálevka se překlopí, vyprázdní se a voda ze srážek se začne hromadit do druhé nálevky. Při převrácení jedné z nálevek je zároveň zaznamenán čas. Nevýhodou tohoto přístroje jsou neznámé hodnoty změn intenzity deště v průběhu mezi překlopeními, známá je pouze průměrná hodnota. Člunkový srážkoměr je na obrázku 1.5. [9]



Obr. 1.5: Člunkový srážkoměr (převzato z [10])

Měření deště se také provádí získáním charakteristik srážek ze zvuku, který vzniká dopadem kapky na určitý povrch, nejčastěji vodu. Všechna akustická měření srážek vznikla z použití akustických srážkoměrů (ARG – Acoustic Rain Gauge), které se používají pro měření srážkových parametrů na moři, kde nejsou ostatní způsoby měření příliš vhodné. Na obr. 1.6 je akustický srážkoměr umístěný pod mořskou hladinou. ARG snímá zvuk dopadajících kapek na mořskou hladinu hydrofonem umístěným pod mořskou hladinou. Tento zvuk je tvořen dvěma částmi: nejdříve vzniká zvuk krátkého trvání, vznikající při samotném dopadu, následovaný zvukem vzduchových bublinek, které vznikají při dopadu kapky, a které produkují výraznější zvuk s frekvencí 10-20 kHz. Právě frekvence tohoto zvuku je závislá na velikosti dešťové kapky a spojuje tím vlastnosti zvukové vlny s velikostí dopadajících kapek. Nevýhodou akustických měření jsou ostatní zdroje zvuku, které mají vliv na měření a je třeba je odfiltrovat. [11]



Obr. 1.6: Akustický srážkoměr pro měření srážek na moři (převzato z [12])

#### 1.1.4 Akustický senzor Raincap

Akustické měření srážek využívá také senzor Raincap, vyvinutý ve finské firmě Vaisala, která se zabývá výrobou průmyslových a meteorologických měřičů. Tento senzor je použit v meteorologické stanici WXT510 a WXT520 (na obrázku 1.7) pro měření údajů o počasí.

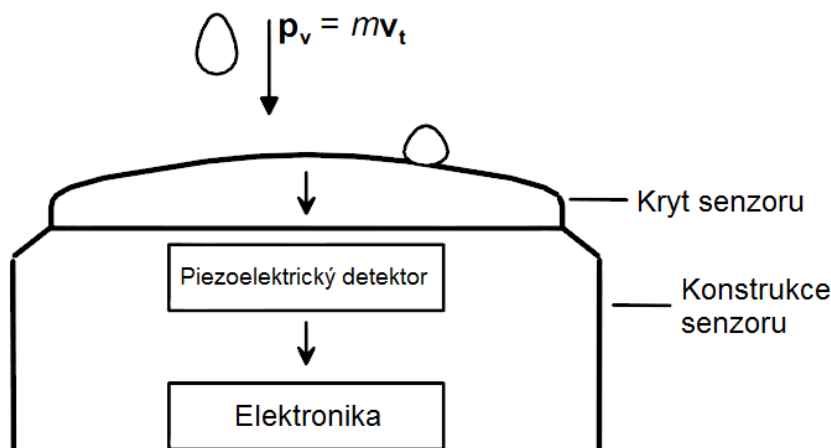


Obr. 1.7: Meteorologická stanice WXT520 firmy Vaisala (převzato z [15])



Srážkový senzor Raincap zaznamenává jednotlivé dopady dešťových kapek. Signály, které při dopadu vznikají, jsou úměrné objemu kapek, což je použito ke zjištění úhrnu srážek.

Schéma senzoru je na obrázku 1.8. Ocelový kryt je připevněn ke konstrukci a ze spodní strany je k němu připevněn piezoelektrický snímač. Napětí, které tento snímač vytváří při dopadu srážek je zpracováno mikroprocesorem, který vyhodnocuje získaný signál a vypočítává srážkové veličiny. [13], [14]



Obr. 1.8: Schéma senzoru Raincap (převzato a upraveno z [13])

## 1.2 Akustika

### 1.2.1 Zvuk

Zvuk je mechanické vlnění hmotného prostředí, které může vzniknout v libovolném pružném hmotném prostředí. Šíření zvuku probíhá v důsledku pružnosti prostředí, kdy se vlivem kmitání částic vytvářejí místa s relativním zhuštěním nebo zředěním částic tohoto prostředí, které postupují od zdroje kmitání díky předávání kinetické energie částic tohoto prostředí určitou rychlostí – rychlostí zvuku  $c$ . Při teplotě  $t = 20^\circ\text{C}$  a normálním atmosférickém tlaku  $p_{00} = 101,3 \text{ kPa}$  je rychlost zvuku přibližně  $343 \text{ m/s}$ . Změna hustoty prostředí vyvolaná kmitáním částic se nazývá zvuková vlna. Vlnoplocha je plocha, kam dospěje zvuková vlna za stejný čas, popř. se jedná o místa se stejnou fází kmitání částic.

Vlnová délka  $\lambda$  zvukové vlny je rovna vzdálenosti mezi sousedními vlnoplochami kmitajícími se stejnou fází kmitání, udává se v metrech a je rovna [16]

$$\lambda = \frac{c}{f} = 2\pi \frac{c}{\omega}, [\text{m}] \quad (1.6)$$

kde  $c$  je rychlost šíření zvukové vlny,  $f$  je frekvence zvukového vlnění a  $\omega$  je úhlová frekvence vlnění. Rozsah frekvencí, které je lidský sluch schopen vnímat je přibližně od  $20 \text{ Hz}$  do  $20 \text{ kHz}$ . [16]

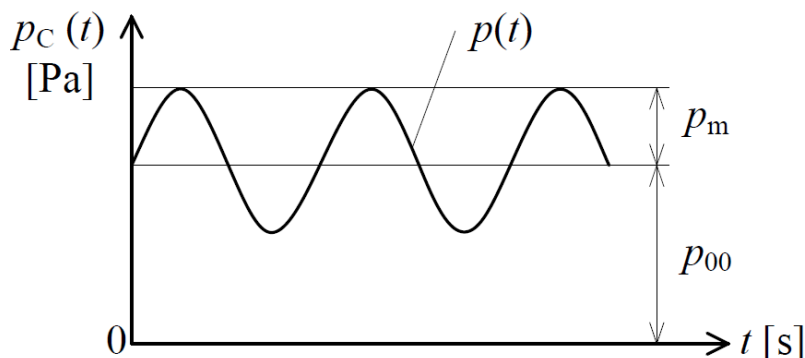
## 1.2.2 Základní akustické veličiny

Tlak je definován jako [16]

$$p(t) = \frac{F(t)}{S}, [\text{Pa}] \quad (1.7)$$

tedy síla  $F(t)$  působící na plochu o obsahu  $S$ , jeho jednotkou je Pascal (Pa)

**Akustický tlak**  $p$  je střídavá složka tlaku superponovaná na atmosférický tlak  $p_{00}$ . Jejich součtem tak vzniká celkový tlak  $p_c$ , který působí v daném bodě, jak je naznačeno na obrázku 1.9. Hodnota  $p_m$  je amplituda akustického tlaku  $p$ .



Obr. 1.9: Časová závislost akustického tlaku (převzato z [16])

Při střídajícím se směru rozdílů tlaků vzniká kmitavý pohyb částic kolem jejich rovnovážné polohy. Vzdálenost, o kterou se při kmitání částice vychylují z kmitavé polohy se nazývá **akustická výchylka**, která se mění s časem.

**Akustická rychlost** je rychlost kmitání částic kolem rovnovážné polohy, je rovna [16]

$$v = \frac{dy}{dt}, [\text{m/s}] \quad (1.8)$$

a jedná se o změnu akustické výchylky  $dy$  za čas  $dt$ .

**Akustický výkon** je skalární součin vektoru síly  $F$  a akustické rychlosti  $v$  [16]

$$P = Fv = pSv \cos \varphi, [\text{W}] \quad (1.9)$$

kde  $S$  je plocha, na kterou působí akustický tlak  $p$  a  $\varphi$  je úhel, který svírá vektor akustické rychlosti  $v$  s normálou k ploše  $S$ .

**Intenzita zvuku**  $I$  je střední hodnota zvukové energie, která projde za jednotku času jednotkovou plochou kolmou ke směru šíření zvukové vlny. Jednotkou intenzity je  $\text{W/m}^2$ .

Vzhledem k tomu, že lidské ucho vnímá hlasitost zvuku logaritmicky, pro vyjádření akustických veličin se často používají logaritmické hladiny. Základní veličinou pro popis časově proměnného zvukového pole je **hladina akustického**

**tlaku  $L$**  (SPL – Sound Pressure Level) [16]

$$L_p = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right), [\text{dB}] \quad (1.10)$$

kde  $p_0$  je vztažná hodnota pro 0 dB, která odpovídá prahu slyšení na frekvenci 1 kHz, což je  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa a  $p$  je efektivní hodnota akustického tlaku. [16]

### 1.2.3 Mikrofony

Mikrofon je elektroakustický převodník, který přeměňuje akustickou energii na elektrickou. Akustický signál, který se projevuje změnami akustického tlaku rozechvívá membránu, jejíž pohyb je snímán elektromechanickým měničem.

**Elektrodynamické mikrofony** jsou nejčastější typy mikrofonů. Můžou být s membránou nebo bez ní (páskový mikrofon). Membrána je spojena s kmitací cívkou, která se při změně akustického tlaku pohybuje v magnetickém poli permanentního magnetu, což na cívce indukuje napětí úměrné rychlosti změny akustického tlaku. V případě páskových mikrofonů je membrána s cívkou nahrazena zvlněnou hliníkovou fólií. Tento pásek je umístěn v magnetickém poli a je rozechvíván změnami akustického tlaku a indukuje se v něm elektrický signál.

**Elektromagnetické mikrofony** pracují na podobném principu jako elektrodynamické mikrofony, snímací cívka však není s membránou spojena a je pevná. Pohyb chvějky, která je spojena s membránou mění magnetický tok cívkou a tím je v ní indukován elektrický signál.

**Elektrostatické mikrofony** jsou složeny ze dvou od sebe izolovaných elektrod tvořících kondenzátor. Jedna elektroda je pevná a před ní je v malé vzdálenosti umístěna membrána z kovové nebo metalizované fólie. Na tento kondenzátor je připojeno stejnosměrné polarizované napětí. Při pohybu membrány vlivem změn akustického tlaku se mění vzdálenost elektrod a s tím také kapacita kondenzátoru. Při pomalém vyrovnávání náboje se bude měnit napětí na kondenzátoru.

**Elektretové mikrofony** pracují na stejném principu jako elektrostatické. Jediným rozdílem je, že jedna elektroda je opatřena vrstvou elektretu, což je materiál nesoucí permanentní náboj, a tak není potřeba polarizačního napětí.

**Piezoelektrické mikrofony** využívají piezoelektrického jevu, kdy na některých látkách (krystaly, keramické materiály nebo plastické hmoty) vzniká vlivem mechanického namáhání elektrický náboj. [17]

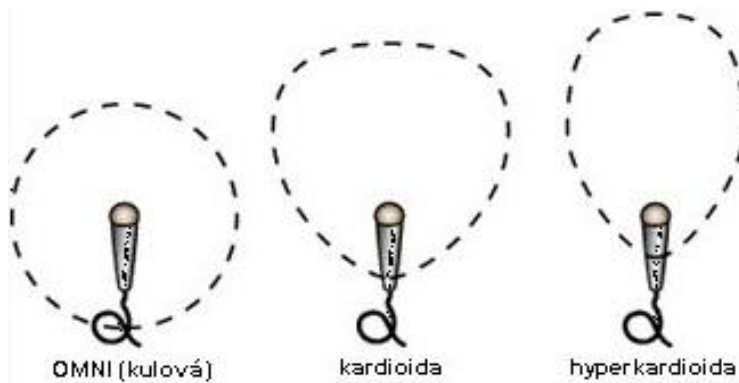
### 1.2.4 Elektrické charakteristiky mikrofonů

**Citlivost** mikrofonu je poměr mezi výstupním napětím mikrofonu a akustickým tlakem na něj působícím. Udává se ve V/Pa nebo mV/Pa, lze také vyjádřit hodnotou v dB vztaženou k referenční úrovni 1 V/Pa.

**Výstupní impedance** je impedance změřená na výstupních svorkách mikrofonu. Její hodnota je důležitá pro přizpůsobení mikrofonu k zesilovači, měla by být 5-10-krát menší než vstupní impedance zesilovače.

**Frekvenční charakteristika** vyjadřuje závislost výstupního napětí mikrofonu na frekvenci při stálém akustickém tlaku. Frekvenční charakteristika by měla mít malé zvlnění v celém slyšitelném pásmu.

**Směrová charakteristika** vyjadřuje závislost výstupního napětí mikrofonu na úhlu, který svírá osa mikrofonu s osou akustického zdroje. Všeměrové mikrofony mají směrovou charakteristiku kulovou, směrové pak ledvinovou (kardioidní), superledvinovou nebo osmičkovou. Tvary některých nejpoužívanějších charakteristik jsou na obr. 1.10.



Obr. 1.10: Kulová, kardioidní a hyperkardioidní směrová charakteristika mikrofonu (převzato z [18])

**Odstup šumového napětí** je poměr mezi výstupním napětím mikrofonu vyvolaným hladinou zvuku o velikosti 94 dB a napětím na jeho výstupu při umístění v dokonale tichém prostředí. [17]

## 1.3 Signály a jejich zpracování

Signál je veličina, nejčastěji fyzikální, nesoucí informaci.

### 1.3.1 Periodický signál

Definice periodického signálu je shodná s definicí periodické funkce. Funkce  $s(t)$  je periodická, existuje-li kladné číslo  $T_p$  takové, že pro všechna reálná  $t$  platí [19]

$$s(t + T_p) = s(t). \quad (1.11)$$

Nejmenší hodnota  $T_p$  se nazývá základní perioda, označuje se  $T_1$ . Každý periodický signál má nekonečné množství period, které jsou celistvé násobky základní periody. Frekvence základní harmonické složky je dána vztahem [19]

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1}. \text{ [rad/s]} \quad (1.12)$$

### 1.3.2 Spektrum signálu

Spektrum signálu je jeho vyjádření jako funkce frekvence.

Každý periodický signál lze vyjádřit jako součet stejnosměrné složky a nekonečné řady jednoduchých harmonických složek, jejichž frekvence jsou dány celistvým násobkem základní frekvence  $F_0$ . Stejnosměrná složka je popsána koeficientem  $c_0$ ,  $k$ -tá harmonická složka ( $k \geq 1$ ) má amplitudu  $|2c_k|$  a počáteční fázi  $\arg c_k$ . Spektrum periodických signálů je diskrétní s a vzdálenost mezi sousedními spektrálními čarami je rovna  $F_0$ . [19], [20]

U aperiodických signálů je ve spektru namísto koeficientů Fourierovy řady zavedena spektrální funkce  $S(\omega)$ , která představuje Fourierův obraz signálu  $s(t)$ . Vztah pro spektrální funkci je [19]

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp(-j\omega t) dt, \quad (1.13)$$

kde  $\omega$  je úhlová frekvence.

Diskrétní Fourierova řada (DFŘ) přiřazuje periodické posloupnosti  $s(n)$  s periodou  $N$  obraz  $S(k)$  [19]

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} kn\right), \quad (1.14)$$

kde  $k$  je pořadové číslo spektrální složky a jemu příslušná frekvence je rovna [19]

$$\omega_k = \frac{2\pi}{N} k, \text{ [rad/s]} \quad (1.15)$$

V případě, kdy je časový průběh signálu dán konečnou diskretní posloupností hodnot, je možné pro výpočet spektra využít diskretní Fourierovu transformaci (DFT). Tato transformace umožňuje z daných vzorků časového průběhu vypočítat vzorky spektra a naopak. Vztah pro výpočet obrazu DFT posloupnosti  $s(n)$  je [19]

$$S(k) = R_N(k) \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} kn\right), \quad (1.16)$$

kde  $N$  je délka posloupnosti.

Účinnou metodou pro výpočet koeficientů DFT je rychlá Fourierova transformace (FFT), která umožňuje analýzu spektra v reálném čase. [19], [20]

### 1.3.3 Spektrální hustota energie

Energie signálu je dána vztahem [19]

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt, \quad (1.17)$$

kde  $s(t)$  může být časově proměnné elektrické napětí  $u(t)$  nebo proud  $i(t)$ , pak  $s^2(t)$  představuje výkon na jednotkovém odporu  $1 \Omega$ .

Tato energie může být také vyjádřena pomocí spektrální funkce signálu a to pomocí Parsevalova teorému pro neperiodické signály [19]

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t)dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega, \quad (1.18)$$

kde  $S(\omega)$  je spektrální funkce. [19]

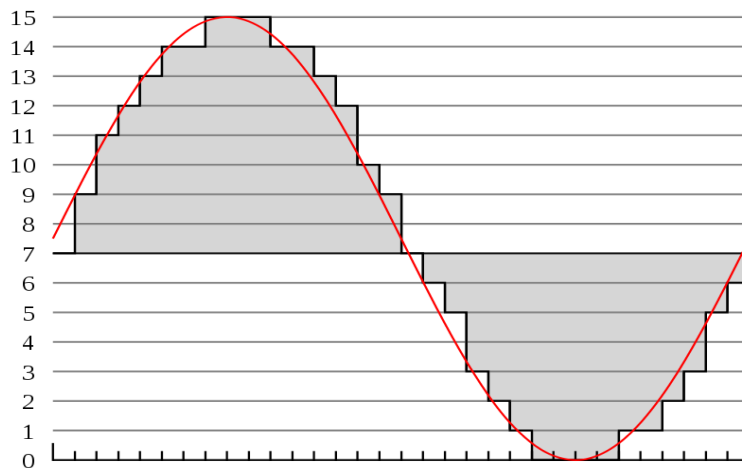
### 1.3.4 Převod z analogových signálů na číslicové

Při tomto převodu je cílem získat z analogového signálu jeho číselnou reprezentaci. Toho lze docílit následujícím způsobem:

Nejdříve je potřeba analogový signál, který je spojitý, převést na signál diskretní. Tomuto postupu se říká vzorkování. Ze spojitého signálu jsou v periodických okamžicích (vzorkovací perioda  $T_{vz}$ ) odebírány diskretní hodnoty. Aby však signál po obnově zpět na analogový signál odpovídal původnímu, musí splňovat vzorkovací (někdy též Nyquistův či Shannon-Kotělnikův) teorém. Ten říká, že pokud je vzorkován signál, jehož spektrum je shora omezeno mezní frekvencí  $f_m$ , pak lze vyjádřit posloupností vzorků odebíraných ze spojitého průběhu s periodou [19]

$$T < \frac{1}{2f_m}. [s] \quad (1.19)$$

Aby bylo možné vzorky vyjádřit konečným počtem číslic, musí být použito kvantování. Celkový napěťový rozsah vzorků se rozdělí na konečný počet kvantizačních stupňů. Počet kvantizačních hladin se často volí  $2^N$ , kde  $N$  je celé číslo.



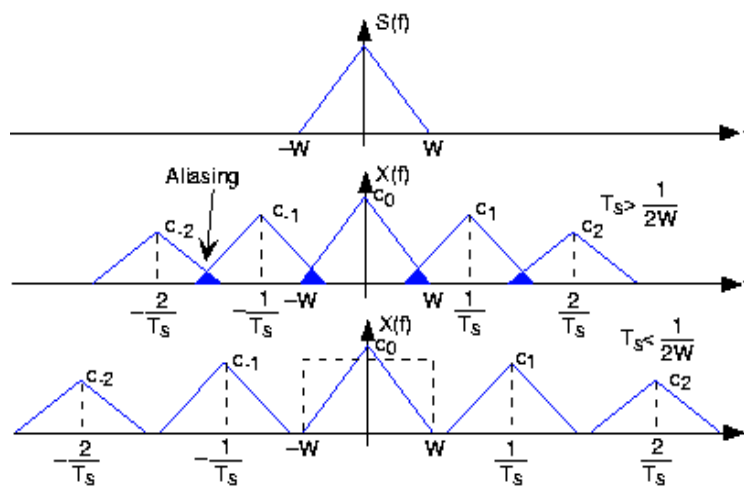
Obr. 1.11: Vzorkování a kvantizace signálu; na ose y je počet kvantizačních hladin a na ose x je časový průběh (převzato z [21])

Digitalizace signálu je znázorněna na obrázku 1.11, kde jednotlivé minimální hodnoty na ose  $x$  představují vzorkovací periodu  $T_{vz}$  a signál je rozdělen na 16 kvantizačních hladin, což je  $2^4$ , jedná se tedy o 4bitové kvantování. [19], [20]

### 1.3.5 Nežádoucí efekty digitalizace

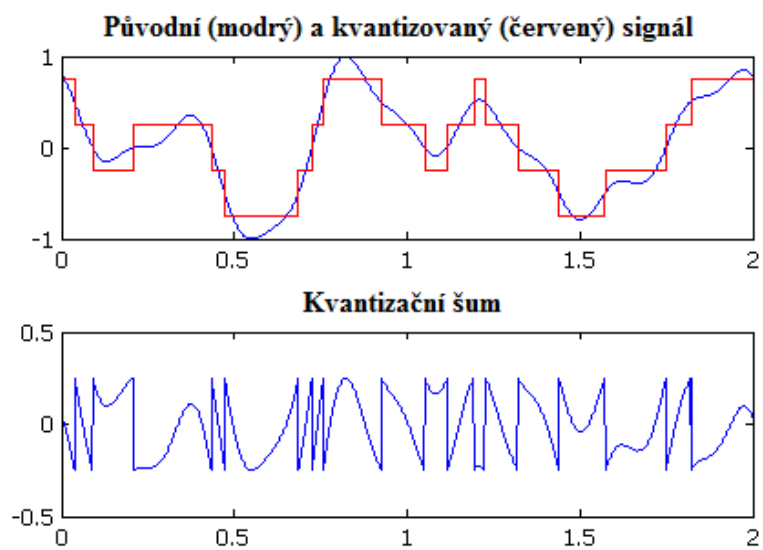
Při převodu analogového signálu na číslicový dochází částečné degradaci signálu, proto je třeba díky znalosti digitalizace tyto efekty minimalizovat.

Při vzorkování dochází k periodizaci spektra původního signálu. Pokud však není dodržen vzorkovací teorém, a spektrum signálu přesahuje polovinu vzorkovací frekvence, dochází k tzv. aliasingu, kdy se jednotlivé spektrální složky překrývají a ovlivňují, k čemuž došlo v druhém spektru na obrázku 1.12. Pro zabránění vzniku aliasingu se používá anti-aliasingový filtr, jehož mezní frekvence odpovídá polovině frekvence vzorkovací.



Obr. 1.12: Původní signál ve frekvenční oblasti (první), navzorkovaný signál, kde se projevuje aliasing (druhý) a navzorkovaný signál, kde je splněn vzorkovací teorém (převzato z [22])

Při kvantování vzniká kvantizační šum, který vzniká vlivem chybovosti kvantování a je definován jako rozdíl mezi skutečným a kvantovaným signálem. Příklad kvantizačního šumu je na obrázku 1.8. Snížení degradace lze docílit zvýšením počtu kvantizačních hladin. [19], [20]

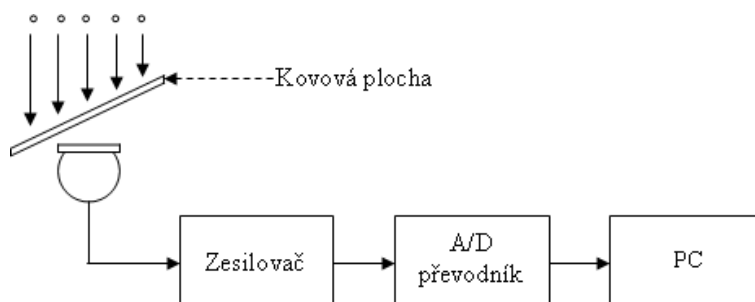


Obr. 1.13: Vznik kvantizačního šumu při digitalizaci (převzato a upraveno z [23] )



## 2 MĚŘICÍ PRACOVISTĚ

Účelem měřicího pracoviště je záznam akustického signálu deště a jeho následné zpracování v číslicové podobě v počítači. Na obr. 2.1 je znázorněno blokové schéma navrženého pracoviště.



Obr. 2.1: Blokové schéma měřicího pracoviště

### 2.1 Kovová plocha

Pro měření bylo vybíráno z několika desek různých materiálů a tloušťek. Nejdůležitější vlastností je, aby deska po dopadu kapky vydávala co největší zvuk a sama jej netlumila. Také by neměla ovlivňovat měření na vlastní rezonanční frekvenci. Z testování bylo patrné, že tenčí desky jsou pro toto měření vhodnější. Nakonec byla zvolena hliníková plocha o tloušťce 0,8mm s rozměry 25cm x 25cm, obsah její plochy je tedy 1/16 metru čtverečního.

Vlastní rezonanční frekvence  $f_c$  může být vyjádřena vztahem [24]

$$f_c = \frac{c^2}{1,8h} \sqrt{\frac{\rho_m}{E}} = \frac{c^2}{1,8c_L h}, \quad (2.1)$$

kde  $c$  je rychlost zvuku ve vzduchu,  $h$  je tloušťka materiálu,  $\rho_m$  je hustota materiálu,  $E$  je Youngův Modul a  $c_L$  je rychlost zvuku v materiálu.

V tomto případě je frekvence  $f_c$

$$f_c = \frac{343^2}{1,8 \cdot 6400 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}} = 12,766 \text{ kHz}, \quad (2.2)$$

po dosazení rychlosti zvuku v hliníkovém materiálu 6400 m/s, rychlosti zvuku ve vzduchu 343 m/s a tloušťky hliníkové desky 0,8 mm. Vlastní rezonanční frekvence je tedy mimo měřený rozsah frekvencí. [24]

### 2.2 Mikrofon

Mikrofon pro akustické měření by měl splňovat tyto požadavky: cenová dostupnost, kvalitní frekvenční charakteristika přibližně v rozsahu 50 Hz až 10kHz a nízký šum.

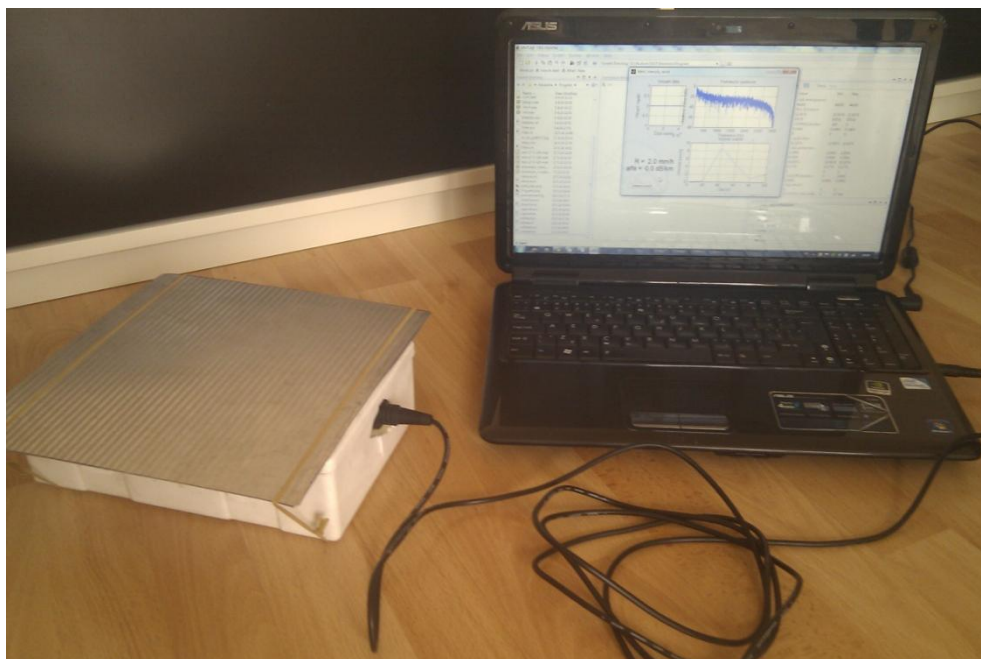
Pro toto měření byl použit elektrodynamický mikrofon KN-MIC10 od firmy KONIG Electronic. Výrobce udávané parametry jsou:

- Směrová charakteristika: všesměrová
- Frekvenční rozsah: 100 Hz – 10 kHz
- Citlivost: 72dB (+/- 3dB), což odpovídá 0,2512 mV/Pa
- Výstupní impedance: 600  $\Omega$  (+/- 30%) na 1 kHz

Druhým používaným byl dynamický mikrofon Vivanco DM10 s parametry:

- Směrová charakteristika: všesměrová
- Frekvenční rozsah: 50 Hz – 12 kHz
- Citlivost: 75dB, což odpovídá 0,1778 mV/Pa
- Výstupní impedance: 500  $\Omega$

Mikrofon byl uložen do kvádrové krabice s chybějící horní stěnou, místo které je ke krabici připevněna kovová plocha, jak je vidět na obrázku 2.2. Krabice byla částečně vyplněna molitanem pro lepší tlumení nežádoucích zvuků, takže i všesměrový mikrofon snímá pouze zvuk dopadu dešťových kapek. Zároveň je mikrofon chráněn proti vniknutí vody.



Obr. 2.2: Sestavené měřicí pracoviště

## 2.3 Zesilovač a A/D převodník

Protože signál na výstupu mikrofonu má malou úroveň, je pro jeho zesílení zapotřebí předzesilovače. Dále musí být tento analogový signál převeden do digitální podoby pro další zpracování v počítači. Tyto dvě úlohy zajišťuje integrovaná nebo externí zvuková karta u počítače.

Zvukové karty většinou poskytují volbu vzorkovací frekvence a kvantizace.

Vzhledem k tomu, že nahrávané akustické signály mají frekvence ve slyšitelném pásmu, tedy do 20 kHz a mikrofon je schopen spolehlivě pracovat do 10 kHz, byla vzhledem k vzorkovacímu teorému zvolena vzorkovací frekvence 44,1 kHz a 32bitová kvantizace.

## **2.4 Zpracování a nahrávání**

Pro získání zvukového signálu z mikrofonu do PC byl použit program Audacity verze 2.0.5. Tento freeware program umožňuje nastavení parametrů nahrávání a libovolně dlouhý záznam. U nahraného souboru je možné zobrazit napěťový průběh, a také spektrogram. Soubor je také možné exportovat například do zvukového souboru ve formátu wav. [25]

Dále byl nahraný soubor zpracováván ve výpočetním programu Matlab (verze 7.8.0.347 R2009a), který mimo jiné umožňuje práci s wav soubory, u kterých je možno například vypočítat a zobrazit frekvenční spektrum. Většina časových a frekvenčních průběhů v této práci je vytvořená právě v tomto programu. Také program pro zpracování zvukového signálu deště, který přepočítává na intenzitu, je vytvořen pomocí programu Matlab. [26]

Další funkci programu Matlab a jeho součásti Data Acquisition Toolbox je možnost okamžitého zpracování analogového vstupu počítače, tedy například ze zvukové karty. Tuto funkci však podporuje pouze 32-bitová verze programu. [27]

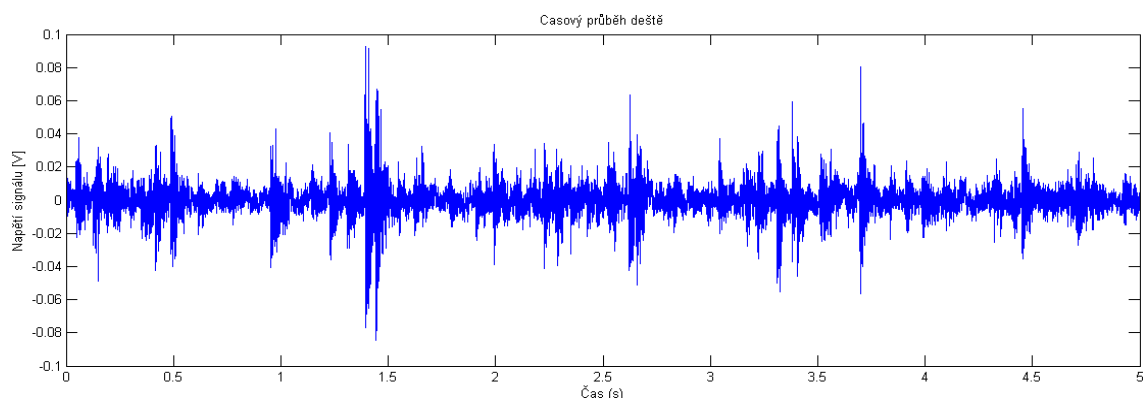
### 3 MĚŘENÍ

Pro experimentální měření bylo sestaveno pracoviště, kde byl použit počítač ASUS K50ID pro nahrávání a zpracování akustických signálů z mikrofonů uvedených v kapitole 2.2.

V době od listopadu do prosince roku 2013 a od března do května roku 2014 bylo na měřicím pracovišti získáno několik nahrávek při různých intenzitách dešťů.

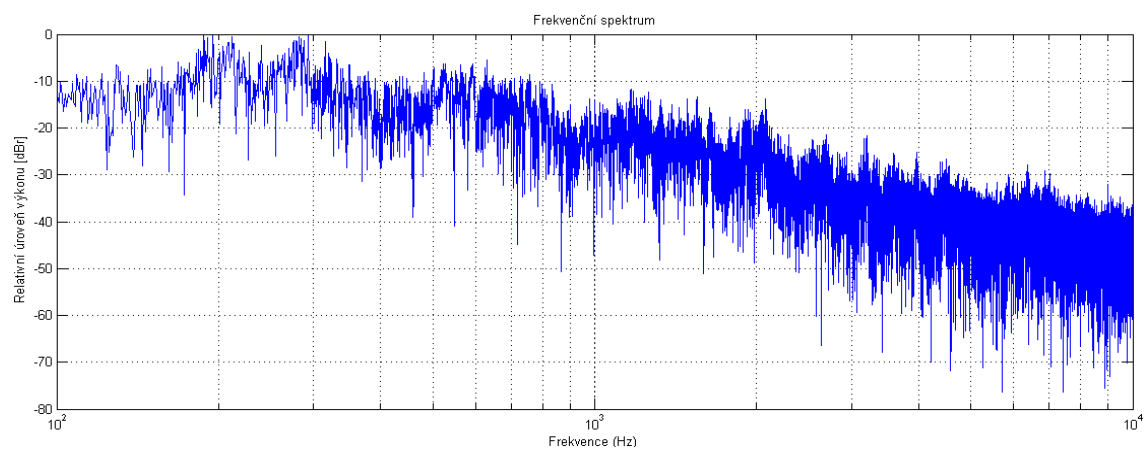
#### 3.1 Akustický signál vyvolaný deštěm

Typický časový průběh získaného signálu je na obrázku 3.1. Jedná se o pětisekundovou nahrávku deště s intenzitou přibližně 0,2 mm/min. Zde je vidět, že skokové hodnoty signálu vznikají vlivem zvuku dopadu jednotlivých kapek na hliníkovou desku.



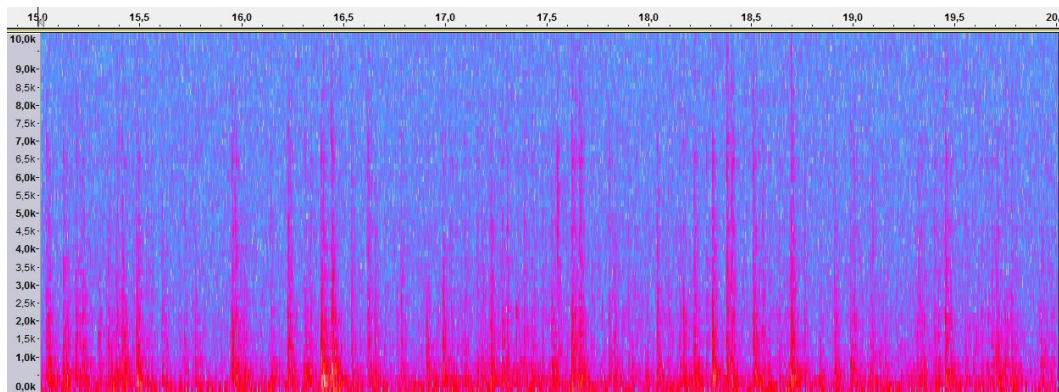
Obr. 3.1: Časový průběh reálného deště

Spektrum tohoto dešťového signálu je na obr. 3.2. Hodnoty spektra jsou relativní, tedy vztaženy k maximální hodnotě. Toto spektrum bylo vytvořeno pomocí funkce FFT programu Matlab, tedy Rychlé Fourierovy transformace. Ze spektra je vidět, že maximální hodnoty ve spektru jsou v oblasti mezi 200 Hz a 300 Hz, poté spektrum s frekvencí postupně klesá.



Obr. 3.2: Spektrum reálného deště pro rozsah frekvencí od 100 Hz do 10 kHz

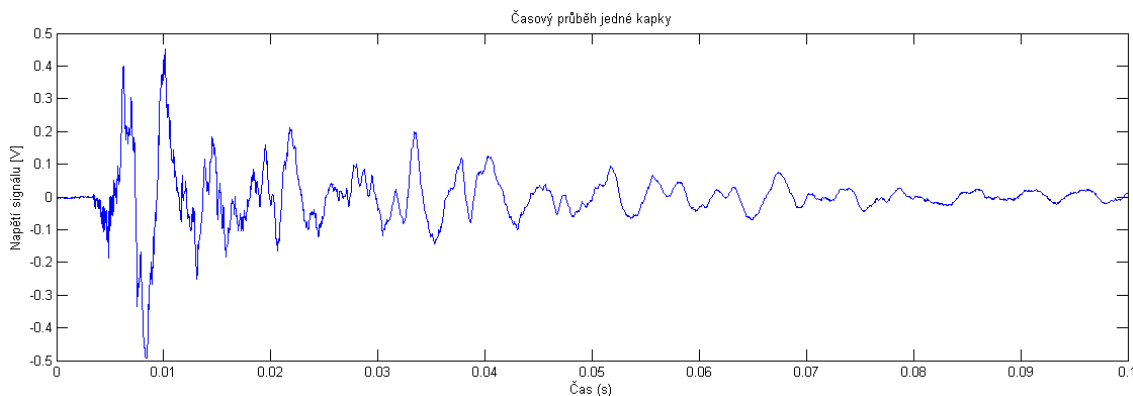
Na obrázku 3.2 je však zobrazeno spektrum patnáctisekundové nahrávky a odpovídá tedy spíše o celkovém spektru během deště. O krátkodobých událostech, tedy dopadech kapek, lépe vypovídá například spektrogram, který je pro tuto nahrávku zobrazen na obr. 3.3. Modrá barva odpovídá nejnižším hodnotám spektra, červené až bílé části naopak hodnotám nejvyšším. Pro přehlednost je časová oblast zkrácena na 5 s. Ze spektrogramu je vidět, že akustický projev dopadu kapky je jakýsi impuls s projevem v široké části spektra.



Obr. 3.3: Spektrogram reálného deště získaný z programu Audacity – na vodorovné ose je čas nahrávky v sekundách a na svislé ose je frekvence v Hertzích

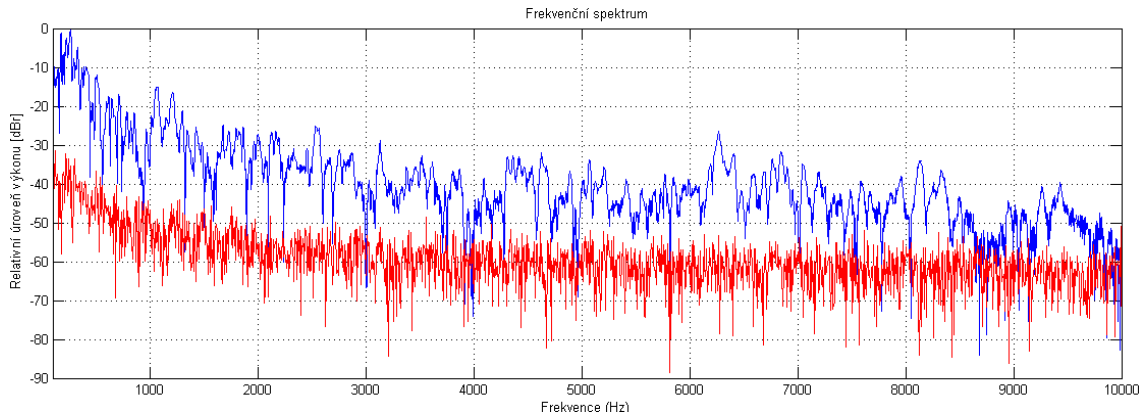
## 3.2 Akustický signál vyvolaný jednou dešťovou kapkou

Pro lepší orientaci je tedy lepší možností zabývat se jednotlivými impulsy, tedy projevem kapky. Na obrázku 3.4 je časový průběh signálu, který vzniká po dopadu jedné kapky.



Obr. 3.4: Časový průběh akustického signálu generovaného jednou dešťovou kapkou

Na dalším obrázku (3.5) je porovnání dvou spekter krátkodobých částí nahrávky. Křivka znázorněná modrou čarou znázorňuje spektrální výkon signálu, kde se vyskytuje zvuk dopadu jedné kapky. Druhé spektrum, znázorněné červenou barvou křivky, je pro signál, kde není přítomen zvuk dopadu kapky. Je zde tedy pouze okolní šum, jedná se tedy o jakýsi klidový stav.



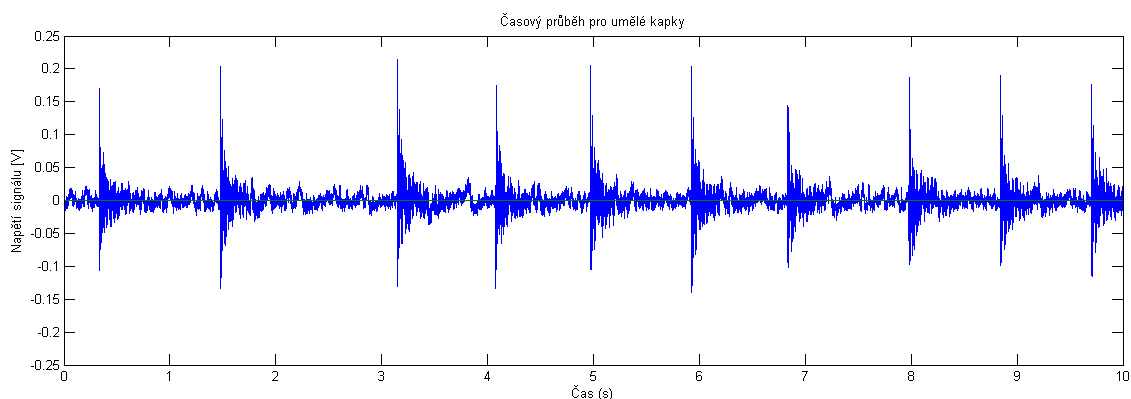
Obr. 3.5: Spektrum zvukového signálu při dopadu dešťové kapky (modré) a v klidovém stavu (červené)

Při srovnání je vidět, že při dopadu dešťové kapky se spektrální výkon zvětší v celém spektru o 15 dB až 30 dB. Tento jev tedy není charakteristický v určité oblasti spektra, ale v celé jeho šířce s největším rozdílem na nižších frekvencích.

### 3.3 Akustický signál vyvolaný uměle vytvořenými kapkami

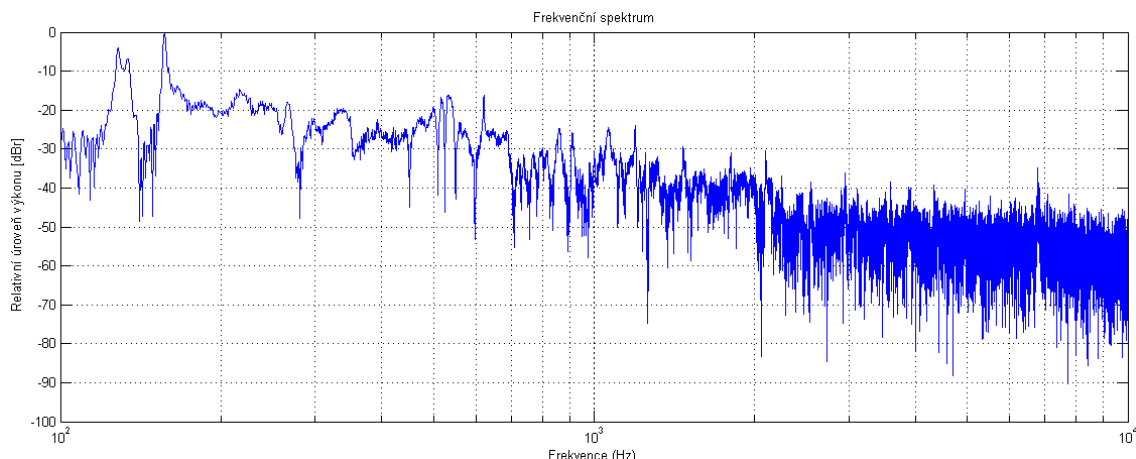
Dále byly pořízeny nahrávky uměle vytvořených kapek. Byla použita injekční stříkačka naplněná vodou do určitého objemu, která byla umístěna nad kovovou plochu ve výšce přibližně 1,5 m. Při pomalém stlačování se u ústí stříkačky vytvářela kapka, která se zvětšovala do určitého objemu, až její tíha převýšila sílu povrchového napětí, a kapka se oddělila. Pokud se postupným kapáním stříkačka vyprázdní a tedy je veškerý její objem rozdělen na  $N$  přibližně stejně velkých kapek, je možné zjistit průměrný objem jedné kapky. Vzhledem k tomu, že povrchové napětí je pro každý případ stejné, měly by velikosti jednotlivých kapek být identické s malou odchylkou.

Nevýhodou této aplikace však je, že kapka nedosáhne konečné rychlosti  $v_t$ , které dosahují kapky srážkové. Naopak výhodou je relativně přesné určení objemu kapek.



Obr. 3.6: Časový průběh zvukového signálu uměle vytvořených kapek

Na obrázku 3.6 je časový průběh signálu vyvolaného uměle vytvořenými kapkami, které mají průměrný objem 0,056ml, na obrázku 3.7 je pak spektrum tohoto signálu.



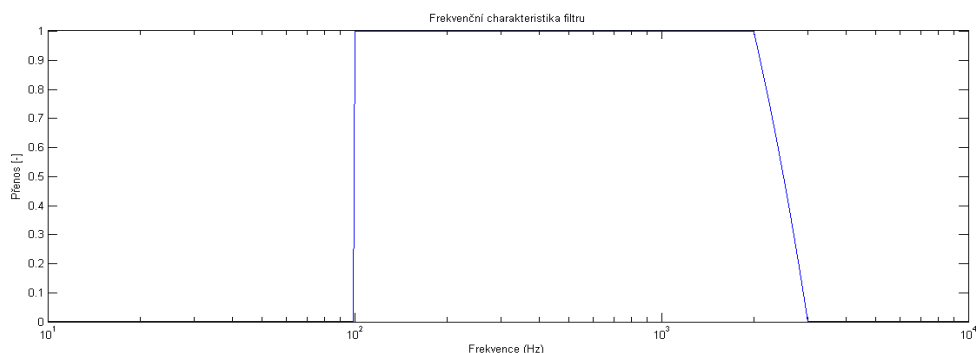
Obr. 3.7: Spektrum zvukového signálu uměle vytvořených kapek

V reálné situaci však vždy při dešti padají kapky různých velikostí a většinou s takovou četností, že rozeznání jednotlivých kapek je obtížné. Signál uměle vytvořených kapek má sice výraznější složky mezi 100 Hz a 200 Hz, reálný dešťový signál však takových maxim neobsahuje. Dopad kapky na desku vytváří tedy širokopásmový impuls s určitou energií.

### 3.4 Měření akustických signálů vyvolaných deštěm

Měření tedy bylo zaměřeno na závislost objemu (popřípadě intenzity) srážek na výkonu signálu, který srážky vytváří při interakci s deskou. Je zřejmé, že s větší intenzitou srážek bude hlasitost dopadu deště na desku větší a tedy i vyšší výkon signálu. Naopak s menší intenzitou srážek bude signál menší. Při nulové intenzitě srážek pak mikrofon zaznamenává pouze minimální hodnotu signálu vlivem přítomnosti šumu. [28]

Pro následující měření byl vytvořen program v Matlabu, který získával signál z mikrofonu a vypočetl z něj jeho výkon. Zároveň byl měřen objem srážek, které za daný čas spadly na kovovou plochu. Mezi výkonem signálu a objemem srážek byla tedy měřena závislost.



Obr. 3.8: Frekvenční charakteristika použitého filtru

Při zpracovávání signálu v programu Matlab byl použit filtr pro případné potlačení nežádoucích jevů a šumu při nulové intenzitě deště. Frekvenční charakteristika filtru je

na obrázku 3.8. Filtr potlačuje frekvence signálu do 100 Hz, kde se vyskytuje šum mikrofonu, ale signál dešťových kapek zde není příliš výrazný. Jsou také potlačovány frekvence vyšší než 3000 kHz, kde znovu převládá šum nad zvukem kapek.

### 3.4.1 Uměle generovaný déšť

Bylo vytvořeno improvizované pracoviště pro simulaci dešťových srážek. Ve výšce přibližně 1 m nad měřicím zařízením byla umístěna nádrž s pěti malými otvory ve dně. V této nádrži byla pomocí regulace přitékající vody udržována přibližně konstantní hladina vody. S měnící se hladinou vody se mění i tlak u dna nádrže a s tím i objem vody, která projde otvory a vytvoří kapky. Bylo tedy možné simulovat různé intenzity umělých srážek a měřit výkon jimi vytvořeného signálu.

V této části trvala jednotlivá měření dvě minuty. V tabulce 3.1 jsou získané hodnoty výkonu signálu a intenzity deště, která je přepočítaná na plochu 1 m<sup>2</sup> po dobu jedné hodiny.

Tab. 3.1: Změřené hodnoty výkonu signálu a intenzit uměle vytvořeného deště, kde  $P$  je výkon signálu a  $R$  je intenzita deště

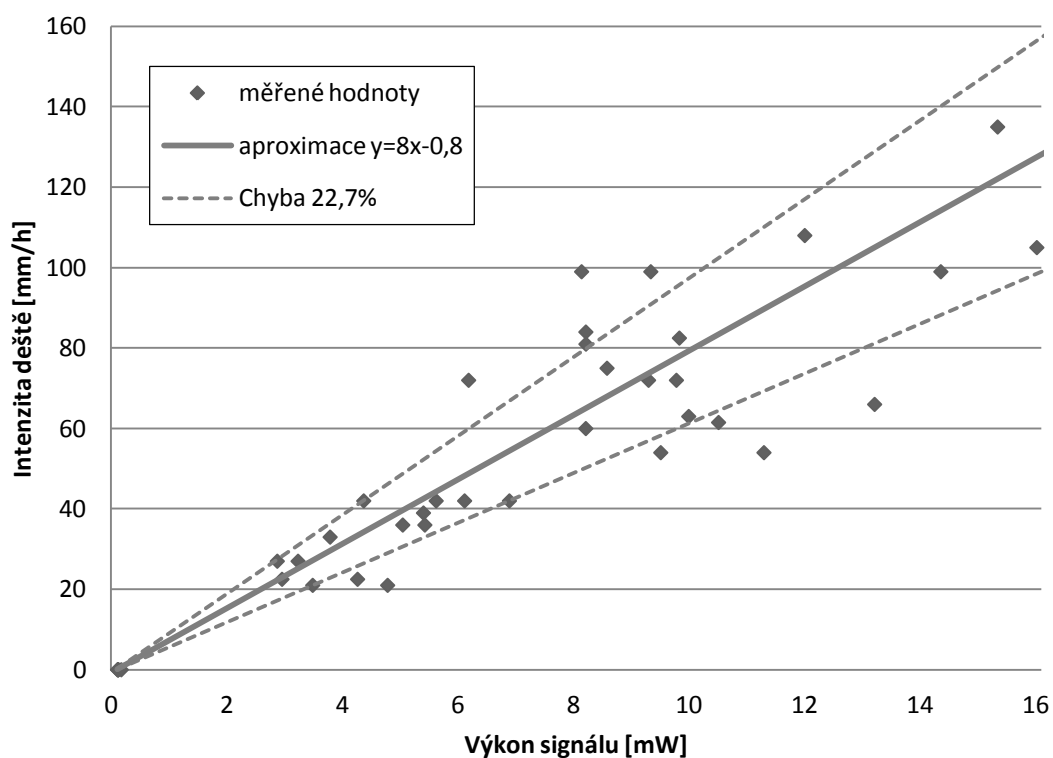
<b>P [mW]</b>	<b>R [mm/h]</b>	<b>P [mW]</b>	<b>R [mm/h]</b>	<b>P [mW]</b>	<b>R [mm/h]</b>
0,1145	0	4,7900	21	9,3062	72
0,1213	0	5,0515	36	9,3450	99
0,1232	0	5,4098	39	9,5170	54
0,1275	0	5,4340	36	9,7880	72
0,1300	0	5,6300	42	9,8396	82,5
0,1800	0	6,1220	42	10,0010	63
2,8800	27	6,1920	72	10,5180	61,5
2,9620	22,5	6,8975	42	11,3035	54
3,2395	27	8,1468	99	12,0100	108
3,4930	21	8,2200	60	13,2187	66
3,7940	33	8,2210	84	14,3648	99
4,2700	22,5	8,2217	81	15,3480	135
4,3760	42	8,5870	75	16,0266	105

Grafická závislost hodnot z tabulky 3.1 je na obrázku 3.9. Hodnoty byly v programu Microsoft Excel aproximovány lineární křivkou s rovnicí

$$R = 8 \cdot P[\text{mW}] - 0,8, \quad (3.1)$$

kde  $R$  je intenzita deště v mm/h a  $P$  je výkon signálu v mW. Průměrná vypočtená relativní odchylka všech měřených hodnot od aproximace je 22,7%. Tato chyba je vynesena v grafu přerušovanou čarou. [29]





Obr. 3.9: Závislost intenzity deště na výkonu akustického signálu při uměle vytvořeném dešti

### 3.4.2 Skutečný déšť

Dále byly pomocí měřicího zařízení měřeny skutečné dešťové srážky. Tyto srážky byly měřeny vždy po dobu dvou minut. Hodnoty výkonu signálu a příslušné intenzity deště jsou uvedeny v tabulce 3.2. Při nulové intenzitě srážek se hodnota výkonu signálu pohybovala kolem hodnoty 0,1 mW.

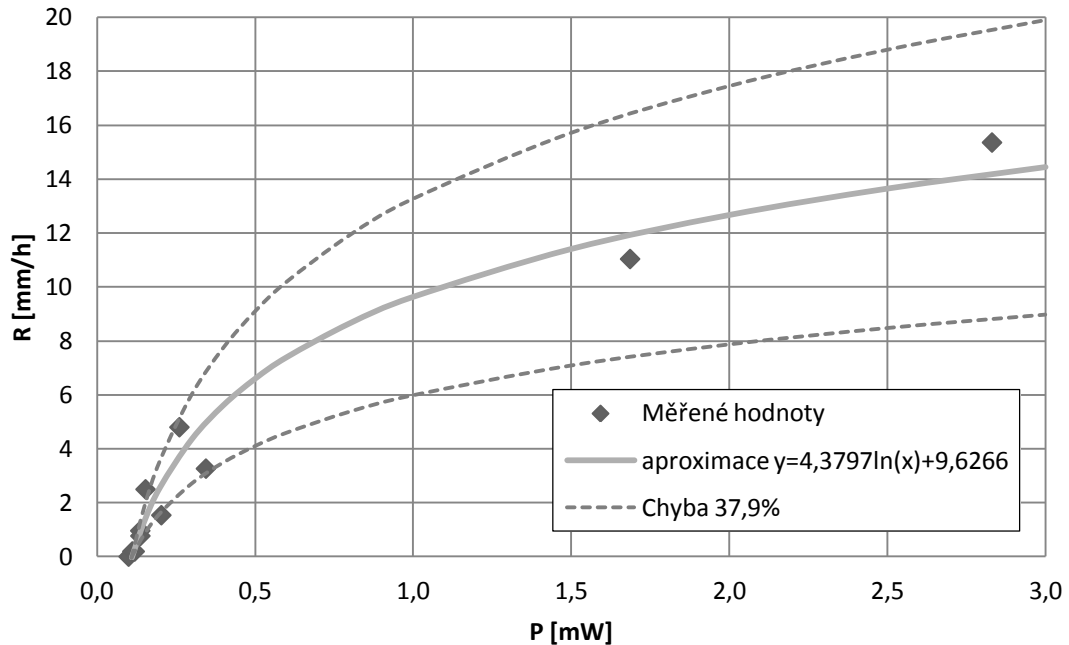
Tab. 3.2: Změřené hodnoty výkonu signálu a intenzit skutečného deště, kde  $P$  je výkon signálu a  $R$  je intenzita deště

$P$ [mW]	$R$ [mm/h]
0,1000	0,000
0,1118	0,192
0,1193	0,192
0,1369	0,960
0,1372	0,768
0,1536	2,496
0,2036	1,536
0,2607	4,800
0,3446	3,264
1,6863	11,040
2,8311	15,360

Grafická závislost hodnot intenzity deště na výkonu signálu z tabulky 3.2 je na obrázku 3.10. Hodnoty byly v programu Microsoft Excel aproximovány logaritmickou křivkou s rovnicí

$$R = 4,3797\ln(P[\text{mW}]) + 9,6266, \quad (3.2)$$

kde  $R$  je intenzita deště v mm/h a  $P$  je výkon signálu v mW. Průměrná relativní odchylka měřených hodnot od aproximace je v tomto případě 37,9%. Tato chyba je znovu vynesena v grafu přerušovanou čarou. [29]

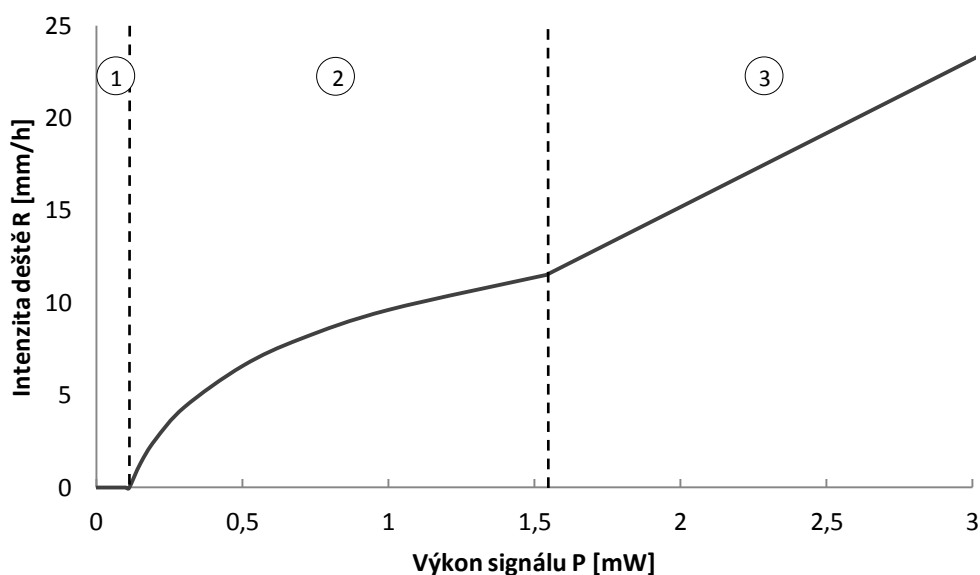


Obr. 3.10: Závislost intenzity deště na výkonu akustického signálu při skutečném dešti

### 3.4.3 Celková závislost intenzity deště na výkonu signálu

Jelikož bylo obtížné vytvořit umělé srážky o intenzitě menší než 20mm/h, tedy srážky nejčastější, a zároveň se nepodařilo získat hodnoty u skutečných srážek dostatečně velkých, jsou použity hodnoty obou měření dohromady. Při použití obou aproximací vznikly tři intervaly, jak je zobrazeno v grafu 3.12:

1. Pro výkon do 0,11 mW byla změřená intenzita srážek nulová
2. Pro výkon od 0,11 mW do 1,5396 mW byla změřená závislost intenzity na výkonu logaritmická podle vztahu 3.2
3. Pro výkon od 1,5396 mW byla závislost lineární podle vztahu 3.1

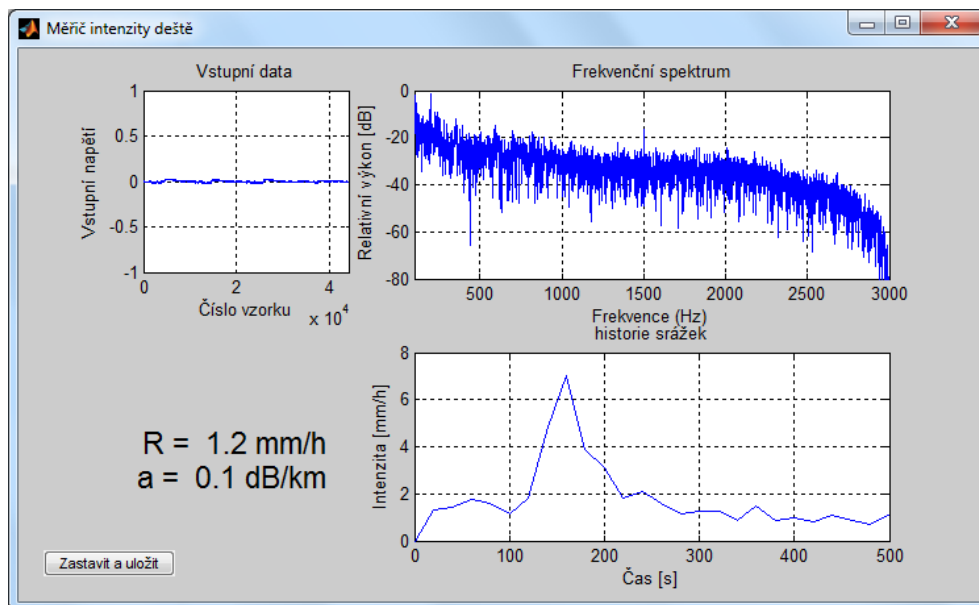


Obr. 3.11: Celková změřená závislost intenzity deště R na výkonu signálu P

Hodnota 1,5396 mW je dána jako průsečík rovnice 3.1 a 3.2.

### 3.5 Měřicí program intenzit srážek

Na základě závislosti z obrázku 3.12 byl vytvořen program v Matlabu, který je po připojení k měřicímu zařízení schopný z výkonu signálu přijatého ze zvukové karty vypočítat intenzitu deště, který dopadá na zařízení. Následně je časový průběh intenzit srážek zaznamenáván do matice. Program byl vytvořen na základě programu pro měření hladiny akustického tlaku z [30].



Obr. 3.12: Program pro měření intenzity deště

Okno programu je rozděleno na čtyři části. První část zobrazuje vstupní data, tedy vzorky signálu, který vstupuje do zvukové karty. Druhá část, umístěná v pravé horní části okna, zobrazuje relativní frekvenční spektrum signálu. V třetí části jsou programem vypočtené aktuální hodnoty intenzit srážek, které jsou přepočteny na měrný útlum podle vztahu 1.5. V poslední části je zaznamenáván časový průběh intenzit srážek. Okno programu také obsahuje tlačítko “Zastavit a uložit“, které zastaví měření a otevře dialogové okno pro uložení maticového souboru s příponou .mat, který obsahuje zaznamenanou historii intenzit srážek. Tento uložený soubor je možné později otevřít pomocí Matlabu a zobrazit zaznamenaný časový průběh intenzit srážek.

Program je tvořen čtyřmi .m soubory. Spouští se souborem Meric.m. Tento soubor obsahuje inicializaci potřebných konstant, nastavení sběru dat ze zvukové karty a spuštění okna programu. Pro přesnější výpočet je potřeba do tomto souboru zadat citlivost mikrofону a konstanty  $a$  a  $b$  pro výpočet měrného útlumu ze vztahu 1.5. Tyto hodnoty se nastavují v souboru Meric.m na 10. až 12. řádku:

```
cit = 0.1778;      %citlivost mikrofónu
autlum = 1.0900; %konstanta a pro výpočet útlumu z intenzity deště
butlum = 0.9580; %konstanta b pro výpočet útlumu z intenzity deště
```

Program po inicializaci proměnných a zvukové karty zaznamená data a zavolá funkci vypocet, která je obsažena v souboru vypocet.m. Tato funkce vypočte ze získaných vzorků spektrum, aplikuje filtr, vypočte výkon a z něj poté určí intenzitu srážek na základě závislosti 3.11 a útlum podle vztahu 1.5. Poté je otevřeno okno, kde jsou vloženy všechny grafy a údaje popsané výše.

```
[X,intenzita,alfa,f] = vypocet(x,Fs,cit,autlum,butlum);
%funkce pro výpočet intenzity srážek a útlumu
```

Poté se periodicky volá funkce obnova, která získává nové vzorky signálu ze zvukové karty, pomocí funkce vypocet získá nové údaje, které následně obnoví v okně programu.

```
set(AI,'TimerFcn',@obnova);
%obnovení dat v okně programu
```

V případě stisku tlačítka “Zastavit a uložit“ je volána funkce stopUloz ze souboru stopUloz.m. Tato funkce otevře dialogové okno pro uložení záznamu intenzit deště a zastaví obnovu a záznam dat. Po uložení dat se tlačítko změní v tlačítko “Spustit“, které znovu spustí měření a záznam dat.

```
%Tlačítko pro uložení
button = uicontrol('Style','pushbutton','String','Zastavit a
uložit',...
'Position',[20 20 100 20],...
'Callback',@stopUloz);
```

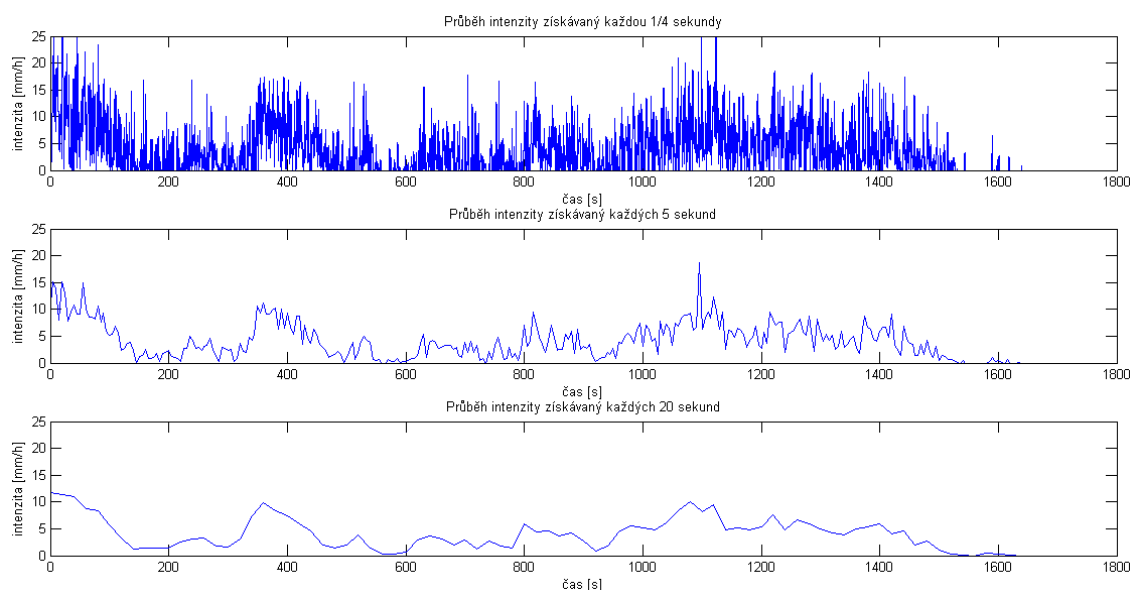
Uložené soubory .mat je možné načíst do programu Matlab a dále s nimi pracovat, popřípadě otevřít pomocí m-souboru zobrazit.m. Tento program po spuštění otevře dialogové okno pro výběr dříve zaznamenaného souboru .mat a zobrazí časový průběh intenzit srážek z tohoto souboru. [30]

Celý kód tohoto programu je uveden v příloze na konci této práce a na příloženém CD.

### 3.5.1 Průměrování zaznamenaných dat

Původně tento program vypočítával a zaznamenával intenzitu deště ze spektra signálu každou čtvrtinu sekundy. S velmi krátkým intervalem měření může být vypočtená intenzita nepřesná a také není zapotřebí tak krátkodobý interval. Proto jsou intenzity akumulovány a každý interval je vypočten průměr těchto hodnot.

Na obrázku 3.14 je srovnání průměrování dešťového záznamu dlouhého 30 minut při různých periodách. V prvním grafu je záznam hodnot prováděn každou čtvrtinu sekundy, v druhém grafu každých 5 sekund a v třetím každých 20 sekund.



Obr. 3.13: Průběhy intenzity deště s různou frekvencí záznamu

Z prvního průběhu je na první pohled patrné velké množství hodnot, které se s časem rychle mění a je zde velký vliv nežádoucích jevů, které se vyskytují v měřeném rozsahu frekvencí (hrom, projíždějící auta a šum). S menší frekvencí záznamu se tyto jevy částečně potlačí, průběh je hladší a zaznamenávaných hodnot je méně. Proto byl také zvolen záznam intenzity deště každých 20 sekund.

## 4 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo seznámit se s principy záznamu a zpracování zvukových signálů vyvolaných deštěm dopadajícím na kovovou plochu. Dále s využitím nabytých poznatků navrhnout a sestavit experimentální pracoviště pro realizaci vyhodnocování těchto signálů a jejich možný převod na veličinu charakterizující intenzitu deště.

Na základě znalostí problematiky bylo toto pracoviště pro záznam akustického signálu navrženo a byl sestaven zkušební prototyp. Pomocí něj bylo zaznamenáno několik nahrávek skutečného deště a uměle vytvořených vodních kapek.

Ze zpracovaných nahrávek bylo patrné, že zvuková odezva dopadu deště na hliníkovou desku je širokopásmová a dopad jednotlivých kapek je tedy jakýmsi akustickým impulsem. Proto bylo měření založeno na předpokladu, že výkon zvukového signálu je úměrný objemu srážek, které na desku dopadají.

Byly proto měřeny výkony signálů a průměrné úhrny srážek na ploše měřiče při skutečném a uměle generovaném dešti. Z těchto měření byly vytvořeny vzájemné závislosti těchto dvou hodnot. Tyto závislosti byly spojeny v jednu, která byla použita pro vytvoření programu pro okamžité určování intenzity srážek.

V programu byla aplikovaná filtrace nežádoucích jevů mimo frekvenční oblast s největším akustickým projevem dešťových kapek. Filtr tak propouští pouze frekvence od 100 Hz do 3 kHz. Rušivé jevy uvnitř tohoto rozsahu však mohou mít vliv na měření, proto by se měřič měl používat v akusticky klidném prostředí, kde na něj mohou působit pouze dešťové srážky.

Výhodou akustického měřiče srážek je okamžité stanovení intenzit srážek oproti srážkoměrům, které určují pouze průměrný úhrn za delší časové období. Taky oproti překlopnému srážkoměru má akustický měřič výhodu v tom, že zatímco u překlopného srážkoměru s menší intenzitou deště trvá překlopení déle a zjištěná intenzita je spíše průměrná, akustický měřič dále zobrazuje proměnné hodnoty intenzity.

Naopak nevýhodou je vliv již zmíněných rušivých akustických vlivů, nejčastěji hromů u bouřek a krup. Další nevýhodou je v případě této práce nedostatek změřených hodnot, a proto může být zjištěná závislost mírně nepřesná. Jak bylo spočteno při vyhodnocování měření, u lineární aproximace měřených hodnot vznikla relativní chyba 22,7% a u logaritmické aproximace až 37,9%. Program také nedokáže rozpoznat neslyšitelné mrholení.

Kvůli nedostatečným podmínkám, tedy žádným srážkovým událostem v době dokončování této práce, nebylo možné ověřit přesnost tohoto měřiče pomocí jiných měřičů intenzit srážek, například překlopného srážkoměru.

V případné další části práce by bylo vhodné zpřesnit vztah mezi výkonem signálu a intenzitou, a to hlavně získáním dalších hodnot při různých typech srážek. Také zavést přesnější rozpoznávání chybných vyhodnocení vlivem rušivých vlivů.

# LITERATURA

- [1] TĚTAUER, P. *Experimentální povodí v České republice*. Bakalářská práce. Praha: Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze, 2006.
- [2] VYSOUDIL, M. *Meteorologie a klimatologie pro geografu*. Elektronické skriptum. Olomouc: Univerzita Palackého, 1997.
- [3] WINDER, P. N. *An acoustic water tank disdrometer*. Dizertační práce. Hull: University of Hull, 2010.
- [4] RÝDL, D. *Zpracování dlouhodobých srážkoměrných údajů (z hlediska denního a sezonního chodu) pro využití v radiokomunikacích*. Bakalářská práce. Pardubice: Fakulta elektrotechniky a informatiky, Univerzita Pardubice, 2010.
- [5] LANGROVÁ, A. *Zpracování srážkových záznamů pro stanovení podmínek radiokomunikačního přenosu*. Bakalářská práce. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, 2010.
- [6] FIŠER, O. *Vliv deště na spolehlivost radiokomunikačních prostředků*. Habilitační práce. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, 2003.
- [7] OLSEN, R.; ROGERS, D. V.; HODGE, D. B. The aR b relation in the calculation of rain attenuation. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 1978, 26.2: 318-329.
- [8] Srážkoměr. *Exatherm* [online]. Dostupné z: <http://www.exatherm.cz/srazkomer.html>
- [9] FIŠER, O.; WILFERT, O. Novel processing of Tipping – bucket rain gauge records. *Atmospheric research*. 2009, vol. 92, issue 3, p. 283-288.
- [10] Tipping-Bucket Rain Gauge - Siphon Control. *Dyacon Weather Instruments* [online]. Dostupné z: <http://dyacon.com/product/tipping-bucket-rain-gauge-siphon-control/>
- [11] WINDER, P.N.; PAULSON K.S. An acoustic disdrometer: the measurement of rain kinetic energy and rain intensity using an acoustic disdrometer. *Measurement Science and Technology*. 2010, vol. 23, no.1.
- [12] Acoustic Rain Gauge (ARG). *DOSITS: Discovery of Sound in the Sea* [online]. Dostupné z: <http://www.dosits.org/technology/currentstempreature/acousticraingauge/>
- [13] SALMI, A.; IKONEN, J.; OYJ, Vaisala. Piezoelectric precipitation sensor from Vaisala. *WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-2005)*, Bucharest, Romania. 2005. p. 4-7.
- [14] SALMI, A.; ELOMAA, L.; KOPSALA, P. LAUKKANEN, E. Piezoelectric Vaisala Raincap® rain sensor applied to drop size distribution monitoring. *Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation*, 2011
- [15] WXT520 – stanice pro měření údajů o počasí. *D-Ex Instruments* [online]. Dostupné z: <http://www.dex.cz/produkty/meteorologie/wxt520.html>
- [16] SCHIMMEL, J. *Elektroakustika*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2013.
- [17] WIRSUM, S. *Abeceda nf techniky*. Praha: BEN – technická literatura, 2003.
- [18] Základní vybava pro domácí nahrávání. *Hudební fórum* [online]. Dostupné z: <http://hudebniforum.cz/viewtopic.php?p=584148>

- [19] ŠEBESTA, V.; SMÉKAL, Z. *Signály a soustavy*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2012.
- [20] PRCHAL, J. *Signály a soustavy*. Praha: SNTL. 1987.
- [21] Pulse-Code Modulation. *Wikipedia: the free Encyclopedia* [online]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/PCM>
- [22] ROMBERG, J.; JOHNSON D. Aliasing. *OpenStax CNX: Sharing Knowledge and Building Communities* [online]. Dostupné z: <http://cnx.org/content/m10793/latest/>
- [23] Quantization (signal processing). *Wikipedia: the free Encyclopedia* [online]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Quantization\\_\(signal\\_processing\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Quantization_(signal_processing))
- [24] CHOI, L. Y. *A Study on simulated rainfall noise generated and prediction of rain noise for composite roof constructions*. Dizertační práce, Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 2004.
- [25] *Audacity: Volně dostupný zvukový editor a rekordér* [online]. Dostupné z: <http://audacity.sourceforge.net/>
- [26] *MathWorks: MATLAB and Simulink for Technical Computing - B* [online]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/>
- [27] MATLAB & Simulink Example: Continuous Acquisition Using Analog Input. *Mathworks* [online]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/daq/examples/continuous-acquisition-using-analog-input.html>
- [28] TRONO, E.M.; GUICO, M.L.; LIBATIQUE, N.J.C., et al. Rainfall monitoring using acoustic sensors. *TENCON 2012 - 2012 IEEE Region 10 Conference*, 2012. p. 1-6.
- [29] FAJMON B.; HLAVIČKOVÁ I.; NOVÁK. M. *Matematika 3*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2005
- [30] LANMAN, D. Sound Level Meter. MATHWORKS. *MATLAB Central* [online]. 2006. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9603-sound-level-meter>



# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$c$	Rychlost zvuku ve vzduchu [m/s]
$c_0$	Frekvenční koeficient stejnosměrné složky
$c_k$	Frekvenční koeficient střídavé složky
$D$	Průměr kapky [mm]
$f$	Frekvence [Hz]
$F_0$	Vzdálenost dvou spektrálních čar
$f_c$	Vlastní rezonanční frekvence
$f_{h,v}$	Komplexní rozptylová funkce dešťové kapky
$f_m$	Mezní frekvence
$F(t)$	Síla [N]
$F(x)$	Distribuční funkce
$H$	Úhrn srážek [mm]
$I$	Intenzita zvuku [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$k$	Vlnové číslo
$L_p, L_{SPL}$	Hladina akustického tlaku [dB]
$N(D)$	Rozdělovací funkce velikostí dešťových kapek
$p, p(t)$	Akustický tlak [Pa]
$P$	Akustický výkon [W]
$p_{00}$	Atmosférický tlak při 20°C [Pa]
$p_c$	Celkový tlak [Pa]
$R$	Intenzita deště [mm/h]
$S$	Obsah plochy [ $\text{m}^2$ ]
$S(k)$	Spektrální obraz periodické funkce
$S(\omega)$	Spektrální funkce
$T_1$	Základní perioda [s]
$T_{vz}$	Vzorkovací perioda [s]
$v$	Akustická rychlost [m/s]
$v_t$	Konečná rychlost, anglicky terminal velocity [m/s]
$\alpha$	Okamžitý měrný útlum [dB/km]
$\alpha_{h,v}$	Útlum

$\lambda$	Vlnová délka [m]
$\omega$	Úhlová frekvence [rad/s]
$\omega_1$	Základní frekvence [rad/s]

ARG	Acoustic Rain Gauge, akustický srážkoměr
DFŘ	Diskrétní Fourierova řada
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
FFT	Fast Fourier Transform, Rychlá Fourierova transformace
mp3	MPEG-1 nebo MPEG-2 Audio Layer III, zvukový kompresní formát
SPL	Sound Pressure Level, hladina akustického tlaku
wav	Waveform audio format, zvukový formát

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Zdrojové kódy</b>	<b>34</b>
A.1	Program pro měření intenzity deště .....	34

# A ZDROJOVÉ KÓDY

## A.1 Program pro měření intenzity deště

Meric.m:

```
clc;
clear all;
Fs = 44100;      %Vzorkovací frekvence [Hz]
odezva = 1;     %Odezva [s]
dobam = 1;      %Doba měření [s]
global hstr; hstr(1) = 0; %historie intenzity
global inx; inx = 1 %index pro akumulaci intenzity při průměrování
global acc; acc = 0; %akumulace intenzity při průměrování
global t; t(1) = 0; %matice pro grafické zobrazení času
cit = 0.1778;   %citlivost mikrofону
autlum = 1.0900; %konstanta a pro výpočet útlumu z intenzity deště
butlum = 0.9580; %konstanta b pro výpočet útlumu z intenzity deště

N = 2^nextpow2(odezva*Fs);

AI = analoginput('winsound');
addchannel(AI, 1);

set(AI, 'SampleRate', Fs);
Fs = get(AI, 'SampleRate');
set(AI, 'SamplesPerTrigger', N);
N = get(AI, 'SamplesPerTrigger');
set(AI, 'TriggerType', 'Manual');
set(AI, 'TriggerRepeat', 1);
set(AI, 'TimerPeriod', odezva/4);
set(AI, 'SampleRate', Fs);
set(AI, 'SamplesPerTrigger', Fs*dobam);

start(AI);
trigger(AI);

x = getdata(AI);

[X, intenzita, alfa, f] = vypocet(x, Fs, cit, autlum, butlum);
%funkce pro výpočet intenzity srážek a útlumu

%-----Vytvoření grafů-----
figureWindow = figure(1); clf;
set(gcf, 'Name', 'Měřič intenzity deště');
set(gcf, 'NumberTitle', 'off', 'MenuBar', 'none');

subplot(2, 3, 1);
samplePlot = plot(1:length(x), x);
title('Vstupní data');
xlabel('Číslo vzorku');
ylabel('Vstupní napětí');
axis([0 length(x) -1 1]);
grid on;
```

```

subplot(2,3,[2 3]);
fftPlot = plot(f,X);
title('Frekvenční spektrum');
xlabel('Frekvence (Hz)');
ylabel('Relativní výkon [dB]');
xlim([100 3000]); ylim([-80 0]);
grid on;

INT_str = sprintf('R =%5.1f%s\t',intenzita, ' mm/h');
subplot(2,3,4); axis off;
INT_text = text(1.0,0.5,INT_str,...
    'FontSize',17,'HorizontalAlignment','Right');

alfa_str = sprintf('\n\alpha =%5.1f%s\t',alfa, ' dB/km');
subplot(2,3,4); axis off;
alfa_text = text(1.0,0.5,alfa_str,...
    'FontSize',17,'HorizontalAlignment','Right');

subplot(2,3,[5 6]);
hstrPlot = plot(t,hstr);
title('historie srážek');
xlabel('Čas [s]');
ylabel('Intenzita [mm/h]');
grid on;

button = uicontrol('Style','pushbutton','String','Zastavit a
uložit',... %Tlačítko pro uložení
    'Position',[20 20 100 20],...
    'Callback',@stopUloz);
%-----

figData.figureWindow = figWindow;
figData.Button = button;
figData.samplePlot = samplePlot;
figData.fftPlot = fftPlot;
figData.hstrPlot = hstrPlot;
figData.hstrTime = t;
figData.dBA_text = INT_text;
figData.alfa_text = alfa_text;
figData.AI = AI;
figData.Cit = cit;
figData.A = autlum;
figData.B = butlum;
set(gcf,'UserData',figData);
set(AI,'UserData',figData);

set(AI,'TimerFcn',@obnova);
%obnovení dat v okně programu

```

vypocet.m:

```

function [X,intenzita,alfa,f] = vypocet(x,Fs,cit,autlum,butlum)

x = x*(0.1778/cit);
X = abs(fft(x));

```

```

f = (0:(Fs/(length(X))):(Fs/2)-Fs/(length(X)));
ind = find(f<Fs/2); f = f(ind); X = X(ind);

%-----Filtr-----
Fltr = zeros (1,length(X));
g = length(X)/(Fs/2);
for i = ceil(100*g):ceil(2000*g)
    Fltr(i) = 1;
end
j = ceil(1000*g);
for i = ceil(2001*g):ceil(3000*g)
    Fltr(i) = j/(ceil(1000*g));
    j = j-1;
end
X = Fltr'.*X;
%-----

totalEnergy = sum(X.^2)/length(X);
meanEnergy = totalEnergy/((1/Fs)*length(x));

X = (1/(max(X))).*X;
X = 20*log10(X);

if meanEnergy >= 0.1111 && meanEnergy < 1.53955      %logaritmická
závislost pro E = <0.1111 ; 1,53955)
    intenzita = 4.3795*log(meanEnergy) + 9.6267;
elseif meanEnergy >= 1.53955                      %lineární závislost pro
E = <1,53955 ; inf)
    intenzita = 8*meanEnergy - 0.8;
else
    intenzita = 0;                                  %R=0 pro E < 0.1111
end

alfa = autlum*(intenzita.^butlum);    %vztah pro utlum alfa = aR^b

```

obnova.m:

```

function obnova(obj,event)
global hstr;
global acc;
global inx;
global t;

figData = obj.userData;
x = peekdata(obj,obj.SamplesPerTrigger);
[X,intenzita,alfa] =
vypocet(x,obj.SampleRate,figData.Cit,figData.A,figData.B);

alfa_str = sprintf('\n\alfa =%5.1f%s\t',alfa, ' dB/km');
%-----průměrování-----
acc = acc+intenzita;
if inx==80
    hstr(end+1) = acc/80;
    INT_str = sprintf('R =%5.1f%s\t',acc/80, ' mm/h');
    acc=0;
    inx=0;
    t(end+1)=t(end)+20;
    set(figData.alfa_text,'string',alfa_str);

```

```

        set(figData.dBA_text, 'string', INT_str);
end
inx = inx+1;
%-----

% Obnovení dat v okně programu
set(figData.samplePlot, 'YData', x);
set(figData.fftPlot, 'YData', X);
set(figData.hstrPlot, 'XData', t);
set(figData.hstrPlot, 'YData', hstr);
set(get(figData.fftPlot, 'Parent'), 'YLim', [-80 0]);

```

#### stopUloz.m:

```

function stopUloz(obj,event)
global hstr;

figData = get(gcf, 'UserData');
AI = figData.AI;

if isrunning(AI)
    stop(AI);
    [soubor,cesta] = uiputfile('*.mat','Uložit historii intenzit');
    nazev=fullfile(cesta,soubor);
    if(soubor ~= 0)
        save(nazev, 'hstr');
    end
    set(figData.Button, 'string', 'Spustit');
else
    delete(AI); Meric;
end

```

#### zobrazit.m:

```

clear all;
clc;
[soubor,cesta] = uigetfile('*.mat','Otevřít uložený záznam');
nazev=fullfile(cesta,soubor);
if(soubor ~= 0)
    load(nazev);
end
t = 0:20:(length(hstr)-1)*20;

plot(t,hstr)
title('historie srážek');
xlabel('Čas [s]');
ylabel('Intenzita [mm/h]');
grid on;

```