



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## LOGOVACÍ STANICE DO VLHKÉHO PROSTŘEDÍ

LOGGING STATION FOR HUMID ENVIRONMENTS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Pavlík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.

BRNO 2023

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Jan Pavlík

**ID:** 230152

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2022/23

**NÁZEV TÉMATU:**

## Logovací stanice do vlhkého prostředí

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Prostudujte možnosti měření meteorologických veličin.
- 2) Na základě nabytých znalostí vytvořte blokový návrh dataloggru pro logování teploty, relativní vlhkosti, CO<sub>2</sub>, atmosferického tlaku, množství skapové vody a její vodivosti a pH. Pro zápis naměřených hodnot použijte externě přístupnou SD kartu.
- 3) Vyberte vhodné komponenty, navrhnete schéma zapojení a vytvořte návrh desky plošných spojů.
- 4) Vytvořte příslušný software pro vyčtení dat a zadávání parametrů pomocí bluetooth připojení a pomocí SD karty.
- 5) Návrh realizujte a všechny jeho funkce řádně otestujte.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HOROWITZ, Paul. The art of electronics. Third edition. New York, NY: Cambridge University Press, 2015. ISBN 978-0-521-80926-9.

**Termín zadání:** 6.2.2023

**Termín odevzdání:** 22.5.2023

**Vedoucí práce:** Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

### 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**

Práce se zabývá návrhem meteorologické stanice do vlhkého prostředí a její konstrukcí. Stanice bude použita pro měření meteorologických veličin v jeskynních, proto bylo nutné navrhnout stanci na minimalizaci spotřebovaného výkonu. K obsluze stanice byl navrhnout firmware, který umožňuje bezdrátové ovládání stanice. Podstatná část práce se zabývá výběrem a popisem senzorů a součástek použitých v konstrukci. V závěru práce je popsán řídicí algoritmus, komunikační rozhraní a konstrukce zařízení.

## **Klíčová slova**

Meteorologické měření, měření pH, měření teploty, relativní vlhkost, atmosférický tlak, vodivost vody, bezdrátová konfigurace

## **Abstract**

This thesis is about the design of a meteorological station deployed in a wet environment and its construction. The station will be used for measuring meteorological instrumentation in caves, because of that the station was designed to minimize its power consumption. Firmware was designed, to allow remote control of the station. A major part of the thesis is concerned with selection and description of the sensors and components used. Near the end of the thesis the control algorithm, communication interface and construction of the device is described.

## **Keywords**

Meteorological measurement, pH measurement, temperature measurement, relative humidity, atmospheric pressure, water conductivity, wireless configuration

## Bibliografická citace

PAVLÍK, Jan. *Logovací stanice do vlhkého prostředí* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151834>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Zoltán Szabó.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<b>Jan Pavlík</b>
<b>VUT ID studenta:</b>	<b>230152</b>
<b>Typ práce:</b>	<b>Bakalářská práce</b>
<b>Akademický rok:</b>	<b>2022/23</b>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<b>Logovací stanice do vlhkého prostředí</b>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne: 22. května 2023

-----  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zoltánu Szábo, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji panu Ing. Zdeňkovi Roubalovi, Ph.D. za pomoc při návrhu pH metru.

V Brně dne: 22. května 2023

-----  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK .....	10
ÚVOD .....	11
<b>1. ZÁKLADNÍ PARAMETRY SENZORŮ PRO MĚŘENÍ METEOROLOGICKÝCH VELIČIN.....</b>	<b>12</b>
1.1 TECHNICKÉ PARAMETRY SENZORŮ .....	12
1.1.1 Statické parametry senzorů .....	12
1.1.2 Dynamické parametry senzorů .....	13
<b>2. PRINCIPY VYBRANÝCH SENZORŮ METEOROLOGICKÝCH VELIČIN .....</b>	<b>14</b>
2.1 MĚŘENÍ TEPLoty.....	14
2.1.1 Polovodičové senzory teploty s PN přechodem.....	14
2.1.2 Odporové kovové senzory teploty (RTD) .....	14
2.2 MĚŘENÍ RELATIVNÍ VLHKOSTI VZDUCHU .....	15
2.2.1 Kapacitní senzory vlhkosti.....	15
2.2.2 Zrcadlové senzory teploty rosného bodu.....	16
2.3 MĚŘENÍ ATMOSFÉRICKÉHO TLAKU .....	16
2.3.1 Membránové deformační senzory tlaku .....	16
2.3.2 Kapacitní senzory tlaku.....	16
2.4 MĚŘENÍ PH KAPALIN.....	16
2.5 MĚŘENÍ KONCENTRACE CO <sub>2</sub> .....	17
2.6 MĚŘENÍ KONDUKTIVITY VODY .....	18
2.7 MĚŘENÍ PRŮTOKU KAPALIN .....	18
2.7.1 Dávkovací měření průtoku .....	18
<b>3. POUŽITÉ SENZORY A SOUČÁSTKY.....</b>	<b>19</b>
3.1 SBĚRNICE I2C.....	19
3.2 ODPOROVÝ KOVOVÝ SENZOR TEPLoty Pt1000 .....	19
3.3 SENZOR RELATIVNÍ VLHKOSTI VZDUCHU SHT81 .....	22
3.4 SENZOR KONCENTRACE CO <sub>2</sub> SCD30.....	23
3.5 SENZOR ATMOSFÉRICKÉHO TLAKU HP206C .....	24
3.6 KONDUKTOMĚR GREISINGER GMH 5400 .....	25
3.7 ELEKTRODY PRO MĚŘENÍ PH THETA HC 133-FES-PTD .....	26
3.8 KAPKOMETR.....	26
3.9 MIKROKONTROLER ESP32.....	26
3.10 MULTIPLEXER I2C TCA9548 .....	27
3.11 AD PŘEVODNÍK I2C ADS1115 .....	28
3.12 MODUL HODIN REÁLNÉHO ČASU DS3231.....	29
3.13 MODUL SD KARTY .....	30
3.14 OPERAČNÍ ZESILOVAČ LMC6001 .....	30
3.15 OPTICKY ODDĚLENÝ ZESILOVAČ HCPL-7800 .....	30
3.16 VÝKONOVÝ SPÍNAČ STMP5 2171 STR.....	31
3.17 MĚNIČ DC-DC AM1DM-0505D.....	32
3.18 ZDROJ PROUDU LM334DT .....	33

3.19	JAZÝČKOVÝ KONTAKT PRO SEPnutí EXTERNÍ KOMUNIKACE.....	34
<b>4.</b>	<b>BLOKOVÝ DIAGRAM ZAPOJENÍ.....</b>	<b>35</b>
<b>5.</b>	<b>SCHÉMA ZAPOJENÍ A DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ .....</b>	<b>37</b>
5.1	SCHÉMA ZAPOJENÍ pH ELEKTROD A KONDUKTOMĚRU .....	37
5.2	SCHÉMA ZAPOJENÍ DC-DC MĚNIČE .....	38
5.3	SCHÉMA ZAPOJENÍ OPOROVÉHO ČIDLA TEPLoty PT1000 .....	38
5.4	DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ – VRCHNÍ VRSTVA.....	39
<b>6.</b>	<b>PROGRAM A OVLÁDÁNÍ.....</b>	<b>40</b>
6.1	STAVOVÝ AUTOMAT ZAŘÍZENÍ .....	40
6.1.1	<i>Stav INIT a třída Config.....</i>	<i>41</i>
6.1.2	<i>Stav WIFI, WIFI_END a knihovna WifiConfigServer .....</i>	<i>42</i>
6.1.3	<i>Stav DATA_READ, DATA_SAVE a třída Data.....</i>	<i>42</i>
6.1.4	<i>Knihovna Sensors .....</i>	<i>43</i>
6.1.5	<i>Funkce Error().....</i>	<i>43</i>
6.2	OBSLUHA NÍZKO VÝKONNÉHO PROCESORU .....	43
6.3	OVLÁDÁNÍ STANICE POMOCÍ WI-FI .....	44
6.3.1	<i>Úvodní stránka webového rozhraní.....</i>	<i>45</i>
6.3.2	<i>Nastavování konfigurace skrze webové rozhraní .....</i>	<i>47</i>
<b>7.</b>	<b>KONSTRUKCE METEOROLOGICKÉ STANICE .....</b>	<b>50</b>
<b>8.</b>	<b>ODZKOUŠENÍ ZAŘÍZENÍ A KALIBRACE .....</b>	<b>52</b>
8.1	KALIBRACE A NASTAVENÍ SENZORŮ .....	55
8.2	SPOTŘEBA ENERGIE STANICE .....	55
<b>9.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>56</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>61</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>61</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Teplotní závislosti odporových senzorů teploty. [1] .....	15
2.2	Závislost prostupnosti prostředí na vlnové délce a plynu. [1].....	17
3.1	Obecné schéma zapojení pro čtyř vodičové měření odporového čidla. ....	20
3.2	Graf závislosti teploty na odporu čidla Pt1000 (vypočtený).....	21
3.3	Závislost chyby aproximace polynomem (3.2) na odporu.....	21
3.4	Schéma připojení rezistorů a filtračních kondenzátorů k AD převodníku pro měření odporu.....	22
3.5	Snímač relativní vlhkosti SHT85. [9].....	23
3.6	Snímač koncentrace CO <sub>2</sub> SCD30. [10].....	24
3.7	Senzor atmosférického tlaku HP206C. [12].....	24
3.8	Konduktoměr Greisinger GMH 5450. [14].....	25
3.9	Schéma elektrody pro měření pH THETA HC 133-FES-PtD. [15].....	26
3.10	Vývojová deska pro mikrokontroler ESP32. [17] .....	27
3.11	Modul multiplexeru TCA9548. [18].....	27
3.12	Blokový diagram ADS1115. [20].....	28
3.13	Modul AD převodníku ADS1115. [21] .....	29
3.14	Modul hodin reálného času DS3231. [22] .....	29
3.15	Modul pro připojení SD karty. [25].....	30
3.16	Převodní charakteristika zesilovače HCPL-7800. [26].....	31
3.17	Schematické zapojení DC-DC měniče. [28] .....	32
3.18	Schéma základního zapojení zdroje proudu LM 334DT. [29] .....	33
3.19	Jazýčkový magnetický kontakt THT MEder KSK-1A66-1020. [30] .....	34
4.1	Blokový diagram zapojení komunikace stanice .....	35
5.1	Schéma zapojení pH elektrod a konduktoměru.....	37
5.2	Schéma zapojení DC-DC měniče. ....	38
5.3	Schéma zapojení odporového čidla teploty Pt1000.....	38
5.4	Zapojení desky plošných spojů na vrchní straně desky.....	39
5.5	Zapojení desky plošných spojů na spodní straně desky.....	39
6.1	Diagram řídicího stavového automatu.....	40
6.2	Organizace souborů na SD kartě. ....	41
6.3	Úvodní obrazovka webového rozhraní.....	44
6.4	Stránka dotazující se uživatele na vymazání dat.....	45
6.5	Stránka dotazující se uživatele na ukončení komunikace.....	46
6.6	Stránka pro nastavení konfigurace.....	47
6.7	Kód spuštěný na zařízení uživatele.....	48
6.8	Kalibrace pH sond a konduktoměru .....	48
7.1	Vnitřní konstrukce zařízení .....	50
7.2	Připojení senzorů ke stanici.....	51
8.1	Graf naměřené teploty senzorem SHT85.....	52
8.2	Graf naměřené teploty senzorem Pt1000.....	53
8.3	Graf naměřené relativní vlhkosti senzorem SHT85 .....	53
8.4	Graf naměřené koncentrace CO <sub>2</sub> .....	54
8.5	Graf naměřeného atmosférického tlaku.....	54

## SEZNAM TABULEK

3.1	Tabulka programovatelných rozsahů AD převodníku ADS1115 .....	28
8.1	Tabulka přibližného proudu spotřebovaného zařízením.....	55
8.2	Tabulka proudu spotřebovaného různými součástkami.....	55

# ÚVOD

Cílem Bakalářské práce je návrh meteorologické stanice do jeskyních prostor. Vzhledem k umístění stanice je nutné ji napájet pomocí baterie, aby bylo dosaženo dobré výdrže zařízení je nutné návrh optimalizovat pro nízkou spotřebu energie. Aby mohla stanice být použita ve vlhkém venkovním prostředí je potřeba zamezit průniku vody do zařízení. Komunikace se zařízením a jeho nastavení tak je provedeno bezdrátovým připojením. Stanice měří standardní meteorologické veličiny teplotu, relativní vlhkost vzduchu a atmosférický tlak. Dále také měří množství kapající vody, pH vody, konduktivitu vody a koncentraci CO<sub>2</sub>. V práci jsou popsány různé parametry senzorů a principy měření požadovaných veličin. Podle parametrů a vlastností různých principů jsou vybrány senzory meteorologických veličin které jsou vhodné pro konstruované zařízení. V práci jsou dále popsány specifické senzory a součástky, které byly použity a jejich komunikační rozhraní a použití v zařízení. Je vytvořen blokový diagram zapojení komunikace senzorů a součástek z mikrokontrolerem. V práci je zobrazeno schéma zapojení, vybraná schémata vstupních obvodů. Vytvořený program zařízení pro měření je rozebrán na část měření senzorů a bezdrátovou komunikaci s uživateli. V závěru jsou shrnuty vlastnosti zařízení a poznatky o konstrukci.

# 1. ZÁKLADNÍ PARAMETRY SENZORŮ PRO MĚŘENÍ METEOROLOGICKÝCH VELIČIN

Senzory, jinak také snímače, jsou zařízení, které převádějí fyzikální veličinu na výstupní signál za účelem zjištění hodnoty původní veličiny. Výstupním signálem snímače může být jakákoliv jiná fyzikální veličina, nejčastěji je to ale některá z elektrických veličin. Snímače převádějící neelektrickou fyzikální veličinu na elektrický signál se nazývají snímače neelektrických veličin. Tyto senzory jsou vhodné pro autonomní měření, které se realizuje pomocí mikrokontrolerů. Údaje ze snímačů se převádějí na binární reprezentaci pomocí A/D převodníků. Pro správné měření je potřeba znát základní parametry senzorů.

## 1.1 Technické parametry senzorů

Parametry senzorů se obecně dělí do dvou kategorií, a to na Statické a Dynamické.

### 1.1.1 Statické parametry senzorů

Statická převodní charakteristika je dána funkční závislostí  $y = f(x)$  mezi vstupní veličinou  $x$  a výstupní veličinou v časově ustáleném stavu. Ideální charakteristika senzoru je pak dána vztahem: [1]

$$y = Kx [-] \quad (1.1)$$

Kde  $K$  je **Citlivost** senzoru.

**Stabilita** senzoru udává změnu citlivosti v dlouhodobém časovém úseku, v ideálním případě by senzor svoji citlivost neměnil.

**Rozlišitelnost** (resolution) senzoru je dána hodnotou snímané veličiny, při které je na výstupu senzoru signál odpovídající efektivní hodnotě šumu. Při číslicovém převodu je rozlišitelnost navíc omezena na 1 LSB (nejméně významný bit) AD převodníku. [2]

Pro rozlišitelnost při číslicovém převodu platí vztah [1]:

$$r_d = \frac{1}{2^n - 1} \quad (1.2)$$

Kde  $n$  je počet bitů AD převodníku.

AD převodníky převádějí měřenou analogovou hodnotu do digitálního formátu. Kvalitu AD převodníku lze rozlišovat podle rozlišitelnosti nebo podle rychlosti AD převodu.

### 1.1.2 Dynamické parametry senzorů

Pro meteorologická měření je perioda měření obecně dlouhá, dynamické parametry senzorů se tak neprojeví.

**Časová konstanta** určuje čas za který, při skokové změně vstupní veličiny, nabude výstup 63% měřené hodnoty.

**Dynamický rozsah** senzoru je dán intervalem přípustných hodnot snímané fyzikální veličiny. Interval je zdola ohraničen rozlišitelností a shora maximální hodnotou měřené veličiny [1].

## 2. PRINCIPY VYBRANÝCH SENZORŮ METEOROLOGICKÝCH VELIČIN

Senzory uvedené v této kapitole se budou v rámci semestrální práce využívat. Jsou uvedeny některé základní vztahy pro výpočty a fyzikální principy na kterých senzory pracují.

### 2.1 Měření teploty

Termodynamická teplota je definována na základě Carnotova cyklu. Teplotní stupnice je definovaná na základě trojného bodu vody  $T = 273,16 K$  kde  $K$  je jednotka termodynamické teploty kelvin. Jednotkou teploty je i stupeň Celsia [ $^{\circ}C$ ] definovaný vztahem: [3]

$$\vartheta = T - T_0 \text{ [}^{\circ}C\text{]} \quad (2.1)$$

Kde  $T_0 = 273,15 K$ , Velikost stupně celsia je tedy stejná jako velikost stupně kelvinu.

#### 2.1.1 Polovodičové senzory teploty s PN přechodem

Teplotní senzory s PN přechodem jsou založeny na závislosti napětí v propustném směru na okolní teplotě. Díky použité technologii jsou senzory ideální pro měření teploty na integrovaných obvodech, kde k nim lze doplnit podpůrné obvody. Jejich závislost na teplotě je velmi lineární. Problémem je nutnost kalibrace každého senzoru na základě nepřesností ve výrobě. [3]

Díky svojí konstrukci jsou senzory vhodné pro teplotní kompenzaci jiných senzorů, nejsou však vhodné pro přesné měření teploty kapaliny, kde je potřeba oddělit měřicí element od okolního prostředí.

#### 2.1.2 Odporové kovové senzory teploty (RTD)

Odporové kovové senzory pracují na principu teplotní závislosti odporu kovu na teplotě. Nejrozšířenějšími odporovými teploměry jsou teploměry vyrobeny z platiny. [2]

Pro závislost odporu platinového senzoru na teplotě v rozsahu teplot od  $-200^{\circ}C$  až do  $850^{\circ}C$  platí vztah [3]:

$$R_{\vartheta} = R_0[1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3(\vartheta - 100)] \text{ [}\Omega\text{]} \quad (2.2)$$

Kde je:  $R_{\vartheta}$  odpor při teplotě  $\vartheta^{\circ}C$

$R_0$  odpor při teplotě  $0^{\circ}C$

$\vartheta$  teplota snímače ve  $^{\circ}C$

A, B a C jsou konstanty dány normou ČSN EN IEC 60751 [4].

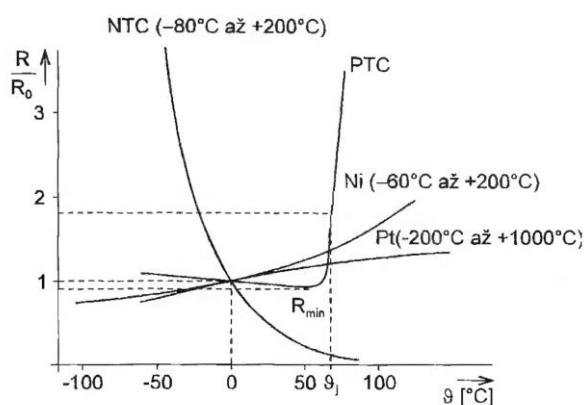
$$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$$

Kde konstanta C je pro teploty vyšší jak  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  rovna 0.

Platinové odporové senzory jsou dlouhodobě stabilní a jsou přibližně lineární (2.1), proto jsou vhodné pro měření teploty za účelem logování. Pro měření je však nutné zvolit vhodné zapojení pro měření odporu. Díky výpočetnímu výkonu dnes vyráběných mikrokontrolerů, není problémem nelinearita měřeného odporu. Pro výpočet teploty se dá vytvořit tabulka odporu a odpovídající teploty, tyto body lze také proložit a vytvořit tak rovnici pro výpočet teploty ze změřené velikosti odporu. Senzory tohoto typu jsou dobře použitelné pro měření teploty ve vlhkém prostředí, protože je lze konstruovat vodotěsné. Proto bude použit k měření teploty vody senzor Pt1000.



Obrázek 2.1 Teplotní závislosti odporových senzorů teploty. [1]

## 2.2 Měření relativní vlhkosti vzduchu

Vlhkost vyjadřuje množství vodních par v plynu (např. vzduchu). Velmi častý způsob uvádění hodnoty vlhkosti je relativní vlhkost. Maximální množství vodních par ve vzduchu závisí na teplotě. Relativní vlhkost v procentech je pak poměr skutečné koncentrace vodních par a maximální možné koncentrace pro danou teplotu. [5]

Pro rozlišení procentuální hodnoty z rozsahu, a hodnoty relativní vlhkosti, bude dále použito označení jednotky relativní vlhkosti %RH.

### 2.2.1 Kapacitní senzory vlhkosti

Jsou založeny na principu změny impedance kondenzátoru při absorbování molekul vodní páry z okolního prostředí. Senzor je tvořen plošným kondenzátorem. Jeho dielektrikum je vyrobeno z polymeru, který je schopen absorbovat okolní vlhkost. Kapacita senzoru je pak dána relativní vlhkostí okolí. [2]

Kapacitní senzory vlhkosti jsou nejvíce používané senzory vlhkosti. Mají dobrou stabilitu a přesnost. Jsou také obecně dostupné.

### **2.2.2 Zrcadlové senzory teploty rosného bodu**

Vlhkost vzduchu lze detekovat pomocí rosného bodu. Ochlazením zrcadla dochází k jeho orosení. Orosení zrcadla lze detekovat opticky pomocí měření odraženého záření. Zrcadlo se v senzoru ochlazuje pomocí Peltierova článku. Proud tekoucí do článku je regulován tak aby na zrcadla byla právě teplota rosného bodu. Tato teplota se měří jedním ze sensorů. Z naměřené teploty lze určit relativní vzdušnou vlhkost. Výhodou sensorů je jejich přesnost. Nevýhodou sensorů je vysoká pořizovací cena a nutnost držet zrcadlo zcela čisté. [2] Pro měření bude použit kapacitní senzor vlhkosti SHT85.

## **2.3 Měření atmosférického tlaku**

Nulový tlak je v prostoru bez hmoty (vakuum). Absolutní tlak je pak rozdíl tlaku v porovnání s nulovým tlakem. Atmosférický tlak je pak absolutní tlak okolního vzduchu u zemského povrchu. Měření tlaku lze převést na sílu. Sílu pak lze převést na deformaci pomocí pružného členu. K měření této deformace lze využít tenzometry. [2]

### **2.3.1 Membránové deformační senzory tlaku**

Jedná se o nejpoužívanější senzory tlaku. Jsou založené na měření mechanické deformace pomocí tenzometrů. Dnes se tenzometry pro měření tlaku vyrábějí stejným způsobem jako integrované obvody, kde jako pružný člen využívají křemíkovou membránu. Důvody jsou ideální pružnost křemíku a jednoduchost masové výroby. Tato technologie se nazývá MEMS [3]

### **2.3.2 Kapacitní senzory tlaku**

Pružným členem těchto sensorů bývá přepjatá kovová membrána. Výchylku membrány měříme diferenčním kapacitním senzorem, kde membrána slouží jako středová elektroda. Nevýhodou těchto sensorů je že jsou často konstruovány pro diferenční měření tlaku. Tedy měření tlaku mezi dvěma body. Je tedy obtížné s nimi měřit atmosférický tlak. [2] Ve stanici je použit deformační membránový senzor tlaku HP206C. Je přímo od výrobce navržen k tomuto měření.

## **2.4 Měření pH kapalin**

pH je definováno na stupnici od 0 do 14, kde 7 je hodnota při které roztok neobsahuje žádné ionty. Roztoky s pH menším jak 7 kyselé a s pH větším jak 7 jsou zásadité. pH vody lze měřit pomocí koncentrace iontů v roztoku. Pokud do roztoku ponoříme elektrody vznikne elektrický článek. Proudové zatížení článku by ale ovlivnilo měření,



proto je potřeba měřit napětí elektrod zesilovačem s velkým vnitřním odporem, řádově  $G\Omega$ . [1]

Pro měření platí vztahy [1]:

$$\varphi = \varphi_0 \mp \frac{2,303RT}{nF} \log a_i \text{ [V]} \quad (2.3)$$

Kde je:  $\varphi$  potenciál na elektrodách [V]

$\varphi_0$  standartní potenciál při  $pH = 7$  [V]

R plynová konstanta  $R = 8,3144 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$

T termodynamická teplota [K]

n valence (oxidační číslo) iontů

F Faradayova konstanta  $F = 9,6487 \times 10^4 \text{ Cmol}^{-1}$

$a_i$  aktivita iontů (+ pro kationty, - pro anionty)

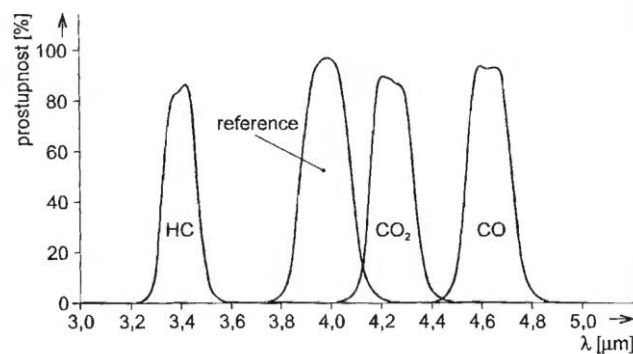
$$pH = -\log a_{H^+} [-] \quad (2.4)$$

Z výše uvedených vztahů lze odvodit že pH bude záviset na teplotě roztoku, s toho vyplývá potřeba teplotu měřit. Typická hodnota napětí na jednotku pH se pohybuje kolem  $59 \text{ mV/pH}$  [6]. Hodnota je ale silně ovlivněna konstrukcí elektrod a teplotou měřené látky.

Při hodnotě pH 7 by na elektrodách mělo být napětí 0 V.

## 2.5 Měření koncentrace $\text{CO}_2$

Pro měření koncentrace plynu v prostředí se využívá absorpce určitých vlnových délek plynem. Oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) nepohlcuje vlnové délky  $4\mu\text{m}$  až  $4,5\mu\text{m}$ , které odpovídají infračervenému záření. Pro omezení vlivu systematických chyb, jako je například kolísání zářivého toku zářiče nebo znečištění vzduchu prachovými částicemi, se často zároveň provádí měření v srovnávacím plynu, který je od okolního prostředí oddělen. Srovnávací plyn je ozařován totožným zářičem jako měřený plyn. [2]



Obrázek 2.2 Závislost prostupnosti prostředí na vlnové délce a plynu. [1]

Koncentrace CO<sub>2</sub> se měří v jednotkách ppm, které označují počet molekul CO<sub>2</sub> na milion molekul vzduchu, ve kterých se CO<sub>2</sub> vyskytuje.

## 2.6 Měření konduktivity vody

Měření konduktivity spočívá v měření vodivosti roztoku pomocí elektrod. V případě měření vodivosti vody, musí voda obsahovat ionty z nějaké rozpuštěné látky. Jednotka konduktivity je stejná jako u elektrických vodičů.

$$\gamma = Sm^{-1} [Sm^{-1}]. \quad (2.5)$$

Kde je:             $\gamma$  konduktivita  
                       $S$  vodivost prostředí  
                       $m$  vzdálenost elektrod

Konduktivita roztoku je také závislá na jeho teplotě. Musí se proto opět měřit. Při měření se také musí brát v potaz polarizace elektrod, kdy jimi přestane téct proud. K zabránění tohoto jevu je nutné elektrody napájet střídavým napětím. Protože měření a kalibrace tohoto čidla je komplikovaná je vhodné použít pro toto měření určený přístroj. [2]

## 2.7 Měření průtoku kapalin

Měření průtoku kapalin dělíme na objemové nebo hmotnostní množství tekutiny proteklé za jednotku času. V meteorologické stanici se měří objemový průtok. Protože je velikost průtoku relativně malá (dána kapáním vody v jeskyni) je jediný možný způsob měření dávkovací. [2]

### 2.7.1 Dávkovací měření průtoku

Při dávkovacím měření průtoku měříme objem kapaliny pomocí jednotlivých dávek kapaliny. Pro zjištění průtoku stačí zjistit počet dávek za čas. [1]

## 3. POUŽITÉ SENZORY A SOUČÁSTKY

V dnešní době se senzory často vyrábějí v integrovaných modulech, které komunikují přes některou sériovou digitální sběrnici (např. I2C). Výhodou těchto modulů je jejich přesnost a jednoduchost použití. Senzory bývají přesnější, protože moduly často měří několik veličin pro kompenzaci výsledné hodnoty. Výrobci těchto modulů dále mají možnost tuto kompenzaci kalibrovat, pro měření také zvolí AD převodníky potřebné přesnosti. Moduly jsou jednodušší k užití, protože není potřeba navrhovat analogový měřicí obvod. Některé senzory je však stále výhodné používat jako samostatné prvky. Zejména odporové snímače teploty a senzory které nelze integrovat do jednoho modulu vzhledem k požadavkům na umístění. Dále uvedené senzory se řadí do těchto dvou skupin.

### 3.1 Sběrnice I2C

Několik dále uváděných senzorů používá pro komunikaci sběrnici I2C. Sběrnice I2C slouží ke komunikaci jednoho Master zařízení a množstvím Slave zařízení. Pro připojení I2C sběrnice stačí 2 vodiče na které může být paralelně připojeno až 127 různých zařízení. Pro rozlišení mezi zařízeními má každé svoji unikátní adresu. [7]

V našem případě bude Master mikro kontrolér použitý pro zápis naměřených hodnot a Senzory budou Slave zařízení.

Pro zápis do Slave zařízení musí Master na sběrnici zapsat Start bit, za kterým přichází 7 bitů adresy Slave zařízení. Master potom čeká na posláni bitu Slave zařízení, kterým oznamuje že zprávu přijalo. Poté lze pracovat z vnitřními registry Slave zařízení. [7]

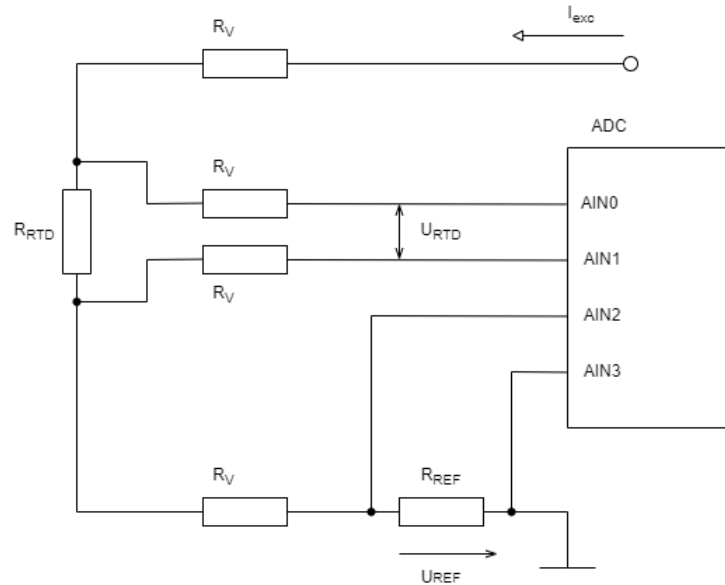
Pro přijmutí data ze Slave zařízení na něj musí Master poslat stejnou sekvenci bitů jako při zápisu. Musí pak ale navázat start bitem, adresou Slave a bitem pro čtení. Slave pošle na sběrnici bit označující přijmutí zprávy a následně pošle příslušná data.

### 3.2 Odporový kovový senzor teploty Pt1000

Pro měření v této práci není vhodné měření čidlem s PN přechodem. Senzory s PN přechodem potřebují ke správné funkci blízko umístěnou vyhodnocovací elektroniku, která by nebyla vhodná do vlhkého prostředí. Zvolíme tedy měření pomocí odporového senzoru.

Označení Pt1000 znamená že senzor je vytvořen z platiny a má hodnotu odporu při 0 stupních °C 1000Ω. Odpor čidla 1000Ω je pro měření vhodnější, protože změna odporu vytvoří větší úbytek napětí na čidle. Pro výpočet teploty je nutné přesně změřit odpor tohoto senzoru. Nejvíce vhodné je měření čtyřmi vodiči ohmovou metodou, dva vodiče vedou excitační proud a dva vodiče jsou použity pro bez proudové měření napětí na čidle. Zapojení tak eliminuje vliv přívodních vodičů čidla. Senzor je napájen zdrojem proudu, který by neměl být vyšší, než 1 mA aby nedošlo k samo zahřívání čidla.

Samo zahřívací efekt lze omezit také krátkodobým zapnutím proudu senzorem. Projeví se zde časová konstanta doby potřebné k samo ohřevu čidla.



Obrázek 3.1 Obecné schéma zapojení pro čtyř vodičové měření odporového čidla.

Ze schématu zapojení zobrazeného v obrázku (3.1) lze odvodit že napětí na odporovém čidle  $R_{RTD}$  bude posunutě o hodnotu napětí na referenčním odporu  $R_{REF}$ , s toho plyne potřeba měřit napětí na čidle diferenčně. Měření je dále ovlivněno vnitřním odporem AD převodníku, který se řadí paralelně k odporovému čidlu. Odpor  $R_{REF}$  je použit pro kontrolu hodnoty referenčního proudu  $I_{exc}$ . Pro výpočet hodnoty odporu čidla pak slouží vztah:

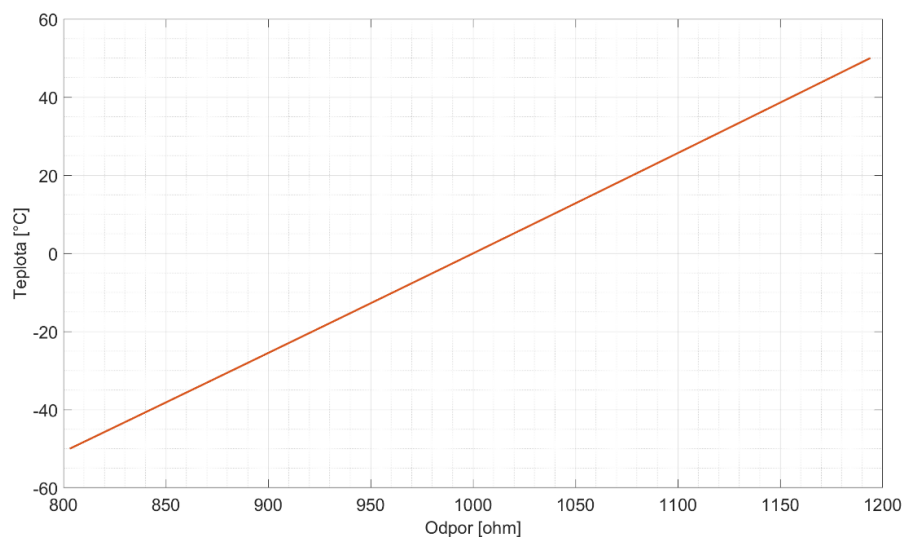
$$R_{RTD} = \frac{U_{RTD} \cdot R_{REF}}{U_{REF}} \quad [\Omega] \quad (3.1)$$

Na výrobci čidla teoreticky nezáleží, protože se senzory řídí normou.

Vzorec pro výpočet odporu z teploty (2.2) má velmi komplikované algebraické řešení pro inverzi (výpočet teploty pomocí odporu). Průběh však lze aproximovat pomocí polynomu. K vytvoření aproximace byl použit software Matlab. V softwaru prvně vytvoříme vektor odporu v závislosti na teplotě ve zvoleném rozsahu (-50 °C až 50 °C). Poté použijeme interní funkci „polyfit“ k vytvoření polynomu pomocí metody nejmenších čtverců. Průběh tohoto polynomu je zobrazený na obrázku 3.2. Pro zvolení řádu vypočteného polynomu vypočteme rozdíl mezi hodnotu teploty získanou polynomem a „skutečnou“ hodnotou. Tím získáme chybu proložení na rozsahu senzoru.

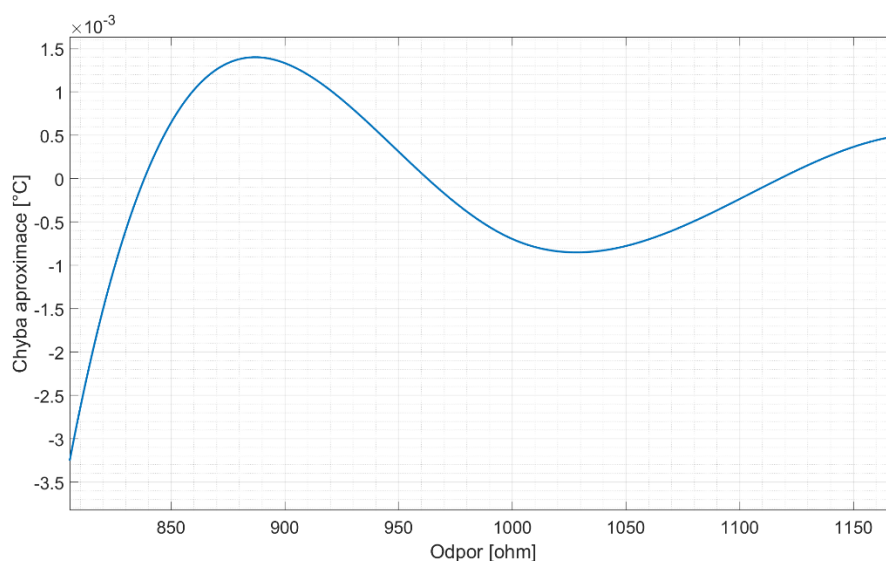
Jako dobrý kompromis mezi přesností a výpočetní náročností se jeví polynom druhého řádu:

$$\vartheta = 9,9091 \cdot 10^{-6} \cdot R_{RTD}^2 + 0,236 \cdot R_{RTD} - 245,946. \quad (3.2)$$



Obrázek 3.2 Graf závislosti teploty na odporu čidla Pt1000 (vypočtený)

Průběh chyby tohoto polynomu je zobrazen na následujícím grafu. V případě proložení lineárním průběhem se výrazně zvyšuje chyba aproximace, a to skoro v celém rozsahu měření. Polynom třetího řádu chybu oproti polynomu druhého řádu výrazně neredukuje.



Obrázek 3.3 Závislost chyby aproximace polynomem (3.2) na odporu

Pro omezení vstupního šumu se k obvodu AD převodníku musí připojit filtrační rezistory a kondenzátory. V obrázku 3.4 nejsou uvedeny odpory přívodních vodičů, hodnoty odporu ve schématu jsou dány následovně:

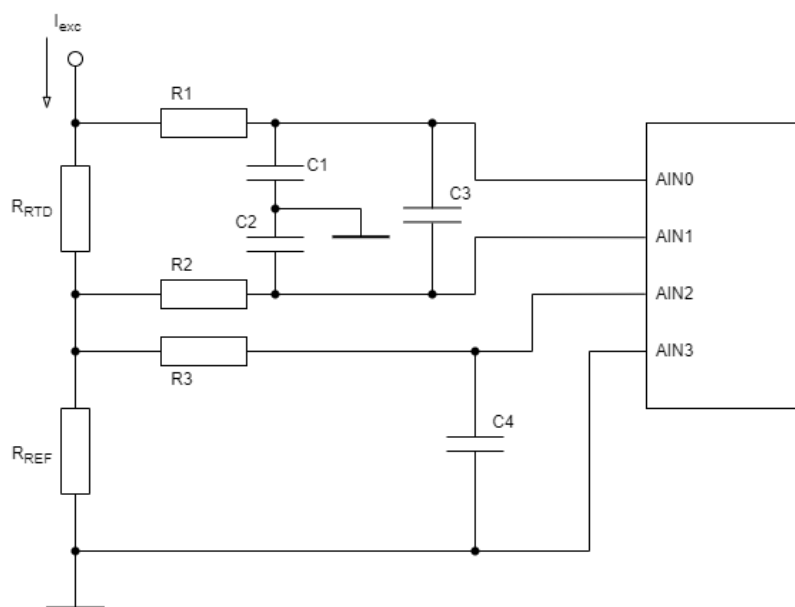
$$R_1 = R_2 = R_3 = 1k\Omega. \quad (3.3)$$

Hodnoty kondenzátorů jsou

$$C_1 = C_2 = 0,01\mu F. \quad (3.4)$$

$$C_4 = C_3 = 0,1\mu F. \quad (3.5)$$

Tyto hodnoty byly určeny pomocí schématu vytvořeného firmou Analog Devices [8]. U odporu  $R_{REF}$  není nutné umístit obdobu kondenzátorů  $C_1$  a  $C_2$ , protože vodič připojený k vstupu  $AIN3$  je spojen se zemí, nemůže tak jím téct proud a vytvořit potenciál vůči zemi.



Obrázek 3.4 Schéma připojení rezistorů a filtračních kondenzátorů k AD převodníku pro měření odporu

### 3.3 Senzor relativní vlhkosti vzduchu SHT81

Senzor SHT85 je kapacitní senzor relativní vlhkosti od výrobce Sensirion, který komunikuje přes sběrnici I2C. Obsahuje tedy integrovaný AD převodník a teploměr pro kompenzaci vlivu okolní teploty vzduchu. Dokáže tak měřit vlhkost s přesností na

1,5 % RH. Okolní teplotu senzor měří s přesností 0,1°C. Modul může být napájen napětím v rozsahu 2,15-5,5V.

Protože senzor komunikuje výhradně přes sběrnici I2C lze jej přes sběrnici i nastavovat a upravovat jeho vlastnosti. Pro naše využití je použit v módu pro jedno čtení kde po přijetí příkazu pro měření načte do vnitřních registrů teplotu a vlhkost vzduchu. Po příkazu pro načtení dat pošle senzor na sběrnici nejprve 16-bitovou hodnotu teploty a poté 16-bitovou hodnotu vlhkosti. Zároveň senzor pošle kontrolní součet dat, kdyby došlo k jejich poškození při přenosu. Pro konverzi platí následující vztahy: [9]

$$RH = 100 \cdot \frac{S_{RH}}{2^{16} - 1} [\%RH] \quad (3.6)$$

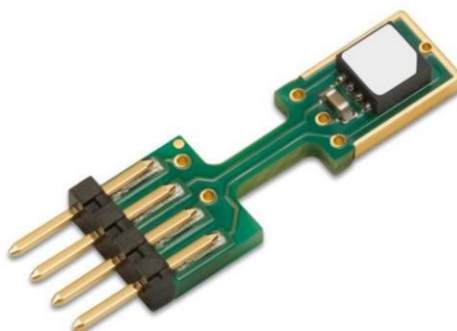
Kde:  $RH$  je relativní vlhkost vzduchu v procentech

$S_{RH}$  je 16-bitová hodnota přečtená ze senzoru reprezentovaná decimálně

$$T = -45 + 175 \cdot \frac{S_T}{2^{16} - 1} [^{\circ}C] \quad (3.7)$$

Kde:  $T$  je teplota ve stupních celsia

$S_T$  je 16bitová hodnota přečtená ze senzoru



Obrázek 3.5 Snímač relativní vlhkosti SHT85. [9]

### 3.4 Senzor koncentrace CO<sub>2</sub> SCD30

Je senzor od firmy Sensirion založený na principu měření koncentrace CO<sub>2</sub> pomocí absorpce infračerveného záření. Opět se jedná o modul schopný komunikovat přes sériové rozhraní (UART nebo I2C), a který měří i několik dalších veličin pro linearizaci a kompenzaci měření. Sensor měří teplotu a relativní vlhkost ovšem s nižší přesností než senzor SHT85. Zde je teplota měřena s přibližnou přesností 0,4 °C a vlhkost s přesností 3%RH. Tyto údaje však senzoru slouží pro kompenzaci hodnoty koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře. Sensor dále umí přijmout hodnotu atmosférického tlaku a přepočítat podle ní koncentraci CO<sub>2</sub>. Koncentraci CO<sub>2</sub> měří senzor s přesností 30ppm. [10]

Pro komunikaci je použita sběrnice I2C. Senzor umí číst pouze kontinuálně s nastavitelnou periodou od 2 sekund až do 1800 sekund.

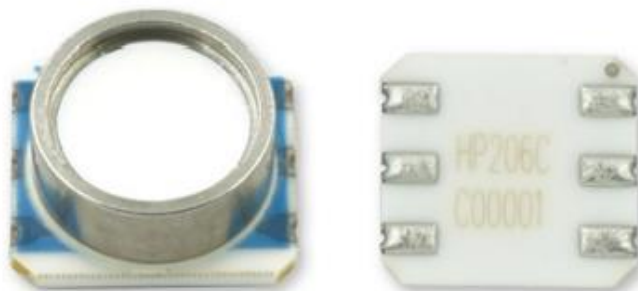
Defaultní adresa senzoru na sběrnici je 0x61 (0b01100001). pro zapnutí měření senzoru na I2C sběrnici pošleme hodnotu 0x0010 za touto hodnotou pošleme naměřený atmosférický tlak pro kompenzaci měření. Po přijetí tohoto příkazu bude senzor měřit hodnotu koncentrace CO<sub>2</sub> s defaultní periodou měření 2 sekundy. Naměřenou hodnotu senzor ukládá do svého vnitřního registru. Po přijetí příkazu pro čtení pošle senzor poslední naměřenou hodnotu. [11]



Obrázek 3.6 Snímač koncentrace CO<sub>2</sub> SCD30. [10]

### 3.5 Senzor atmosférického tlaku HP206C

Senzor pracuje na bázi převodu tlaku na sílu, která je měřena tenzometry. Senzor je opět na bázi modulu, který komunikuje přes sběrnici I2C. AD převodník integrovaný v modulu má rozlišení 20bitů, a dokáže měřit s přesností 1,5mbar. Senzor opět měří teplotu, kterou používá pro kompenzaci měřené hodnoty. Pomocí nastavitelného parametru OSR, který se zapíše do vnitřního registru lze nastavit dobu převodu senzoru. Tím lze zlepšit přesnost měřené hodnoty. I2C adresa senzoru je 0x76. [12]



Obrázek 3.7 Senzor atmosférického tlaku HP206C. [12]



Senzor je napájen napětím 3,3 V. Senzor se automaticky po dokončení měření a převodu hodnoty nastaví do režimu Sleep (spánek). V tomto režimu senzor spotřebuje méně jak jednu mikroampéru proudu. [12]

### 3.6 Konduktoměr Greisinger GMH 5400

Protože měření konduktivity je komplikované na kalibraci použijeme k měření ruční přístroj Greisinger GMH 5400. V rámci úspory energie bude přístroj napájen zapínatelným napětím, přístroj má port pro externí připojení napětí 5 V a analogový výstup. Přístroj má několik nastavitelných rozsahů měření konduktivity. Přístroj si tyto rozsahy dokáže zvolit automaticky nebo lze určitý rozsah nastavit. Analogový výstup přístroje se pohybuje v rozsahu 0-1 V. [13]

Pro zjištění hodnoty naměřené přístrojem se lineárně převede hodnota napětí na hodnotu z rozsahu, podle vzorce:

$$\gamma = (\gamma_{max} - \gamma_{min}) \frac{U - U_{min}}{U_{max} - U_{min}} + \gamma_{min}. \quad (3.8)$$

Kde:  $\gamma_{max}$  a  $\gamma_{min}$  je nastavený rozsah konduktoměru  
 $U_{max}$  a  $U_{min}$  je rozsah napětí na výstupu přístroje

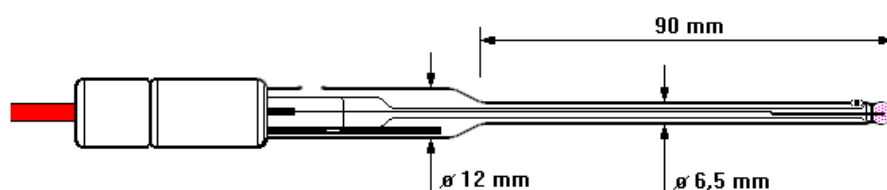


Obrázek 3.8 Konduktoměr Greisinger GMH 5400. [14]

Na obrázku je na spodu zařízení uprostřed připojení pro elektrody přístroje. Vlevo pak je připojení pro externí napájení a analogový výstup.

### 3.7 Elektrody pro měření pH Theta HC 133-FES-PtD

Pro měření pH budou použity elektrody od Firmy THETA 90. Typ, který bude použit je speciálně upraven pro testování malých objemů se zvýšenou mechanickou odolností [15]. Elektrody jsou také chemicky odolné. Vzhledem k požadavku přenosnosti zařízení a měření pH skapové vody jsou elektrody jsou tyto vlastnosti výhodné. Velká komplexita v měření v pH je v návrhu měřicího analogového obvodu. Schéma připojení k AD převodníku je uvedeno v kapitole 5.



Obrázek 3.9 Schéma elektrody pro měření pH THETA HC 133-FES-PtD. [15]

### 3.8 Kapkometr

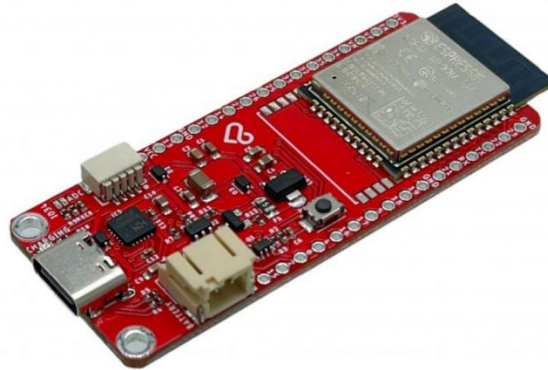
Pro měření spadové vody je použit kapkometr který po nahromadění určitého množství vody generuje na výstupu pulz. Konstrukce vyplývá ze dvou shodných objemů, které se střídavě naplňují kapající vodou. Při naplnění objemu dojde k překlopení měřicí nádoby. Nádoba v sobě obsahuje magnet, který při překlopení přejde přes senzor. To způsobí signál na výstupu kapkometru. Objem kapaliny pak lze získat pomocí počtu překlopení.

### 3.9 Mikrokontroler ESP32

Pro zpracování a přepočítání všech hodnot naměřenými senzory je použit mikrokontroler ESP32. Mikrokontroler se liší od mikroprocesoru tím, že obsahuje operační paměť, programovou paměť a vstupně-výstupní obvody. Samotný mikrokontroler obsahuje AD převodníky s rozlišením 12bitů, tedy 4096 diskretních hodnot, v rozsahu 0-3,3 V. Toto je dostačující pro orientační měření, pro přesný převod je ale vhodné použít diskretní AD převodníky. Dále je nevýhodou AD převodníku integrovaného v ESP32 jeho nelinearita v extrémních hodnotách omezující rozsah měření [16]. Výhodou ESP32 při použití v navrhovaném zařízení je možnost pomocí programu uvést počítač do spánku, při stále aktivním nízko výkonném jádru. Dále je výhodou integrovaný modul Wi-Fi a Bluetooth který umožní komunikaci s okolím bez nutnosti se fyzicky připojit k zařízení. Pro tuto aplikaci je tedy vhodnější oproti jiným mikrokontrolerům díky nízké spotřebě a možnosti

propojení přes Wi-Fi. ESP32 dokáže dokonce fungovat jako Wi-Fi AP, díky čemuž může vytvořit vlastní Wi-Fi přístupový bod.

Protože nezáleží na rozměrech konstruovaného zařízení, je použita vývojová deska od výrobce Laskakit, která umožní rychlejší vývoj softwaru. Deska se vyznačuje nízkou spotřebou v deep-sleep módu díky použitému stabilizátoru napětí. Výrobce uvádí spotřebu  $9,5\mu\text{A}$ , desky bez periférií v tomto módu [17]. Použitá deska je zobrazena na obrázku 3.10.

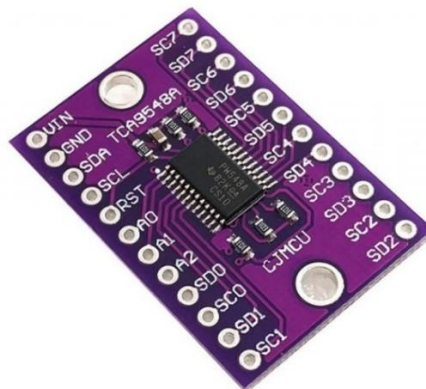


Obrázek 3.10 Vývojová deska pro mikrokontroler ESP32. [17]

### 3.10 Multiplexer I2C TCA9548

Sběrnice I2C umí pracovat s více zařízeními na jedné lince, v projektu je ale potřeba na stejnou linku připojit zařízení které pracují na různých napěťových úrovních.

Proto je použit multiplexer I2C TCA9548, který umí na každé z osmi výstupních linek převádět úroveň napětí. Zároveň zabrání případnému konfliktu adres, který by mohl nastat díky připojení více stejných zařízení se stejnou adresou.



Obrázek 3.11 Modul multiplexeru TCA9548. [18]

Pro přepnutí kanálu Master zapíše pomocí I2C do řídicího registru multiplexeru bit na pozici, která odpovídá požadované lince. Potom co Master nastaví požadovanou linku může adresovat na ní umístěné zařízení. [19]

Napájecí napětí je nutné volit podle nejnižšího napětí na všech linkách. Musí proto být 3,3 V. Adresa převodníku lze nastavit pomocí pinů A0 až A2. Po zapnutí není s Master zařízením propojena žádná linka a musí být nastavena.

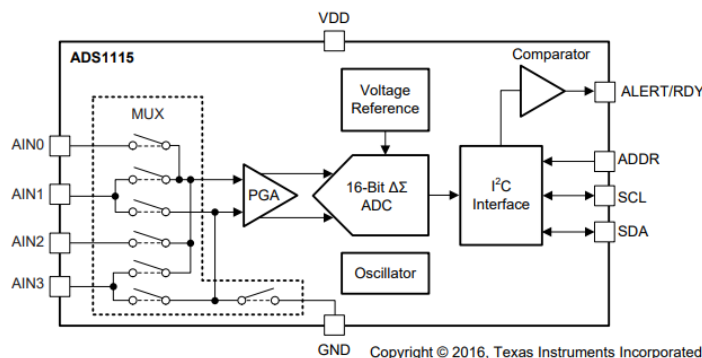
### 3.11 AD převodník I2C ADS1115

Pro přesný AD převod napětí jsou použity 16bitové AD převodníky ADS1115, které komunikují přes sběrnici I2C. Převodník obsahuje 4 analogové vstupy, vnitřní zesilovač a multiplexer.

V obrázku (3.12) je naznačeno vnitřní schéma AD převodníku. Pomocí I2C sběrnice lze nastavit vnitřní parametry „MUX“ a „PGA“. MUX je programově nastavitelný multiplexer který propojuje různé vstupní porty. Lze tedy měřit 4 různé vstupy vůči zemi nebo dvě dvojice diferenčně. PGA je programovatelný zesilovač který určuje rozsah převodníku. Nejvyšší měřitelná hodnota na AD převodníku nesmí být vyšší než hodnota napájecího napětí. Hodnoty rozsahu nastavitelné v AD převodníku jsou zobrazeny v tabulce.

Tabulka 3.1 Tabulka programovatelných rozsahů AD převodníku ADS1115

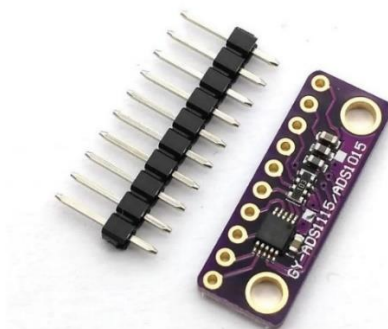
Rozsah [V]	Rozlišitelnost (LSB) [ $\mu V$ ]
<b><math>\pm 6,144</math></b>	187,5
<b><math>\pm 4,096</math></b>	125
<b><math>\pm 2,048</math></b>	62,5
<b><math>\pm 1,024</math></b>	31,25
<b><math>\pm 0,512</math></b>	15,625
<b><math>\pm 0,256</math></b>	7,8125



Obrázek 3.12 Blokový diagram ADS1115. [20]

Pro každý rozsah je v tabulce (3.1) uvedena hodnota napětí, která odpovídá změně nejméně signifikantního bitu AD převodu. Hodnoty tedy určují dynamický rozsah.

Převodník má dva programovatelné módy měření, kontinuální a jedno vzorkové. Při kontinuální konverzi se převodník řídí nastavenou periodou vzorkování. V projektu je použit mód jednoho vzorku, který má výrazně menší spotřebu elektrické energie. V tomto módu převodník převede hodnotu pouze při přijetí příkazu přes I2C sběrnici. [20]



Obrázek 3.13 Modul AD převodníku ADS1115. [21]

### 3.12 Modul hodin reálného času DS3231

Logovací stanice měří všechny údaje s určitou periodou. Mikrokontroler ESP32 má vnitřní obvody časovačů. Požadované délky period jsou moc dlouhé (řádově minuty) a po dlouhých časových úsecích by docházelo k posunu vzhledem k reálnému času. Často je potřeba sledovat změnu veličin v čase, proto by byl postupný skluz času pro měření nevhodný. Řešením je externí obvod hodin reálného času, který je přesný. Vnitřní časovač je použit k probuzení zařízení ze spánku. Hodnota přesného času je ale získána z modulu hodin reálného času RTC DS3231. Modul je zobrazen na obrázku 3.14.



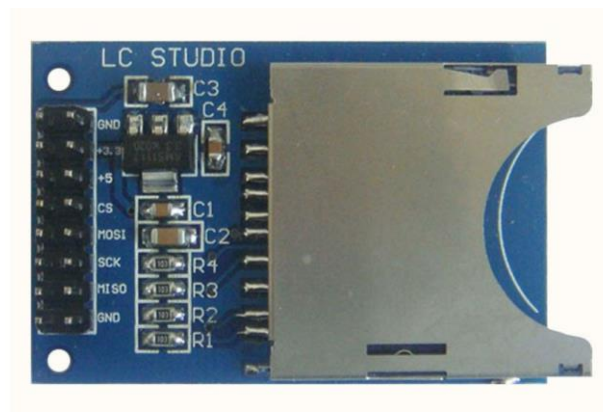
Obrázek 3.14 Modul hodin reálného času DS3231. [22]

Modul komunikuje po sběrnici I2C. Adresa RTC je 0x68 hexadecimálně. Pro zpřesnění měří modul okolní teplotu a modifikuje tak oscilátor pro stabilizaci frekvence.

Výrobce garantuje že se hodnota času za rok bude lišit pouze o  $\pm 2$  min. Pomocí I2C sběrnice lze nastavit také počáteční hodnotu času a alarmy. [23]

### 3.13 Modul SD karty

Pro ukládání naměřených je použita SD karta, SD karty lze přepisovat pomocí sběrnice SPI. SPI je sériová sběrnice, která se připojuje čtyřmi vodiči (SPISIMO, SPISOMI, SPICLK, SPICS). Stejně jako u I2C je sběrnice ovládána Master zařízením. Vodič SPICS je určen pro zvolení Slave zařízení. [24]



Obrázek 3.15 Modul pro připojení SD karty. [25]

Pro zápis Master zařízení stáhne pin SPICS na nulu. Poté může Master zařízení pomocí pinu SPISIMO přenášet data do SD karty. SD karta taky bude ukládat webové rozhraní zařízení.

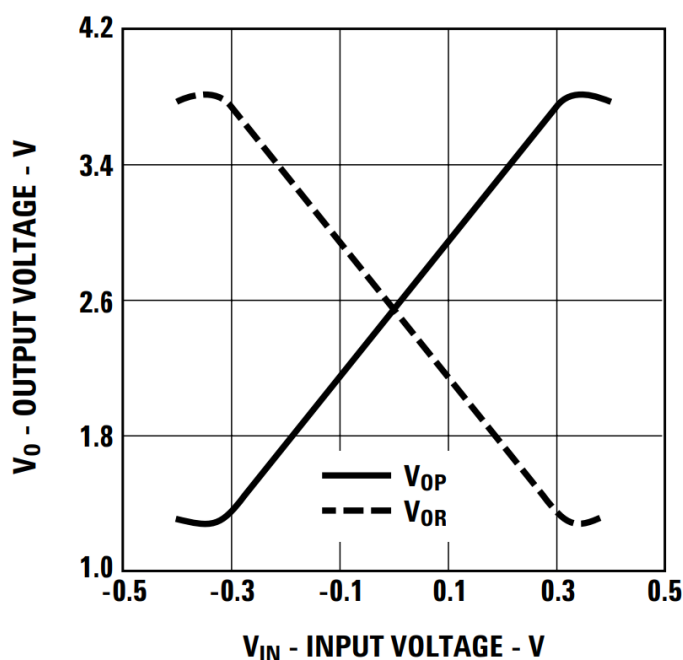
### 3.14 Operační zesilovač LMC6001

Operační zesilovač LMC6001 je speciálně navržen tak, aby měl velmi malý vstupní proud v řádu 25fA. Je tedy vhodný pro zvýšení vstupního odporu měřicího obvodu pH elektrod. Protože napětí na elektrodách může být záporné je potřeba operační zesilovač napájet symetrickým napětím, zde  $\pm 5$  V. Maximální výstupní proud zesilovače je 22 mA. [6]

### 3.15 Opticky oddělený zesilovač HCPL-7800

Protože AD převodník nedokáže měřit napětí které je menší než jeho zemnicí napětí, je nutné oddělit signál operačního zesilovače od AD převodníku. K tomu použijeme opticky oddělený zesilovač, který lineárně posune hodnotu napětí a umožní měření AD převodníkem.

Zesilovač HCPL-7800 je vhodné použít díky jeho malé nelinearitě 0,004 % v rozsahu vstupního napětí -0,3 V až 0,3 V. [26]



Obrázek 3.16 Převodní charakteristika zesilovače HCPL-7800. [26]

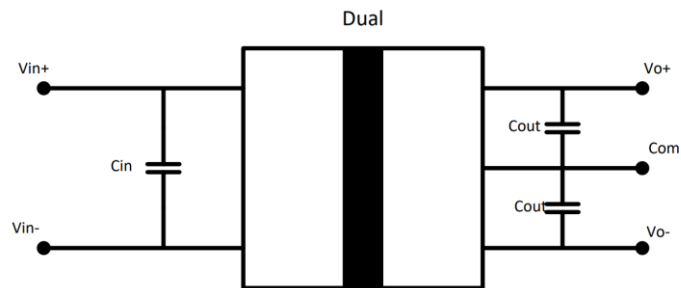
V obrázku (3.16) je  $V_{IN}$  vstupní napětí ve voltech a  $V_O$  výstupní napětí ve voltech. Z převodní charakteristiky v obrázku (3.14) je vidět že zesilovač převádí napětí se záporného na kladné a zároveň ho zesiluje. Hodnota zesílení je rovna  $8 \pm 0,08$ . [26]

### 3.16 Výkonový spínač STMPS 2171 STR

Pro ušetření energie bude pomocí ESP32 spínáno napětí na některých součástkách. Spínání bude zajištěno integrovaným obvodem STMPS 2171. Integrovaný obvod napětí 5 V s maximálním odběrem proudu 1 A. Obvod má jeden logický vstup EN a jeden logický výstup FAULT. Pro zapínání slouží pin EN, prahové napětí tohoto pinu je 2 V. Pin FAULT slouží zařízení pro komunikaci s řídicím obvodem, při zkratu, odběru většího množství proudu než 1 A, přehřátí a nízkém vstupním napětí. Při aktivaci pin FAULT uzemní napětí, které na něm je, tím signalizuje vypnutí obvodu. [27]

### 3.17 Měníč DC-DC AM1DM-0505D

Pro napájení operačního zesilovače bude použit DC-DC měnič. Přivedené napětí 5 V měnič transformuje symetrické napájení  $\pm 5$  V. Maximální výstupní proud měniče je 100 mA. Pro filtraci šumu budou u vstupu a výstupu měniče umístěny kondenzátory. Jejich hodnoty zjistíme z technické dokumentace DC/DC převodníku.



Obrázek 3.17 Schematické zapojení DC-DC měniče. [28]



### 3.18 Zdroj proudu LM334DT

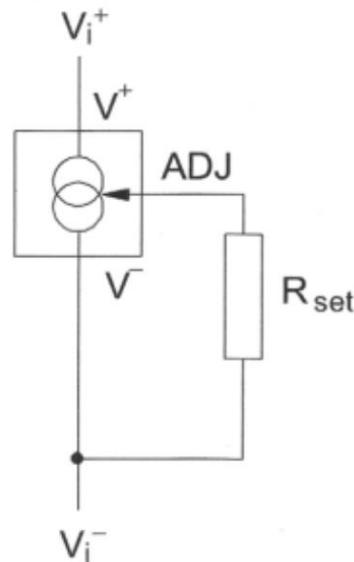
Pro omezení proudu odporovým čidlem teploty bude použit zdroj proudu LM334DT. Proud se nastavuje rezistorem  $R_{SET}$ . Výstupní proud byl nastaven tak aby hodnota měřeného napětí na odporu Pt1000 nepřesáhla hodnotu 1,024V. Tím bude dosaženo nepřesáhnutí rozsahu AD převodníku v normálních provozních podmínkách. Pro výpočet použijeme maximální přepokládanou hodnotu odporu Pt1000, která byla zvolena jako hodnota odporu při 50°C cca 1200  $\Omega$ . Pomocí Ohmova zákona lze odvodit:

$$I = \frac{V}{R_{MAX}} = \frac{1,024}{1200} = 0.853mA \quad (3.9)$$

Ze vztahu uvedeném v datasheetu zdroje proudu pak lze vypočítat : [29]

$$R_{SET} = \frac{0,0677}{I_{SET}} = \frac{0,0677}{0,000853} = 79.33 \Omega \quad (3.10)$$

Vybereme nejbližší dostupnou hodnotu odporu  $R_{SET} = 82\Omega$ . Protože hodnota tohoto odporu je závislá na teplotě, je stále nutné velikost proudu měřit. Schéma zapojení odporu ke zdroji proudu je uvedeno v obrázku 3.18.



Obrázek 3.18 Schéma základního zapojení zdroje proudu LM 334DT. [29]

### 3.19 Jazýčkový kontakt pro sepnutí externí komunikace

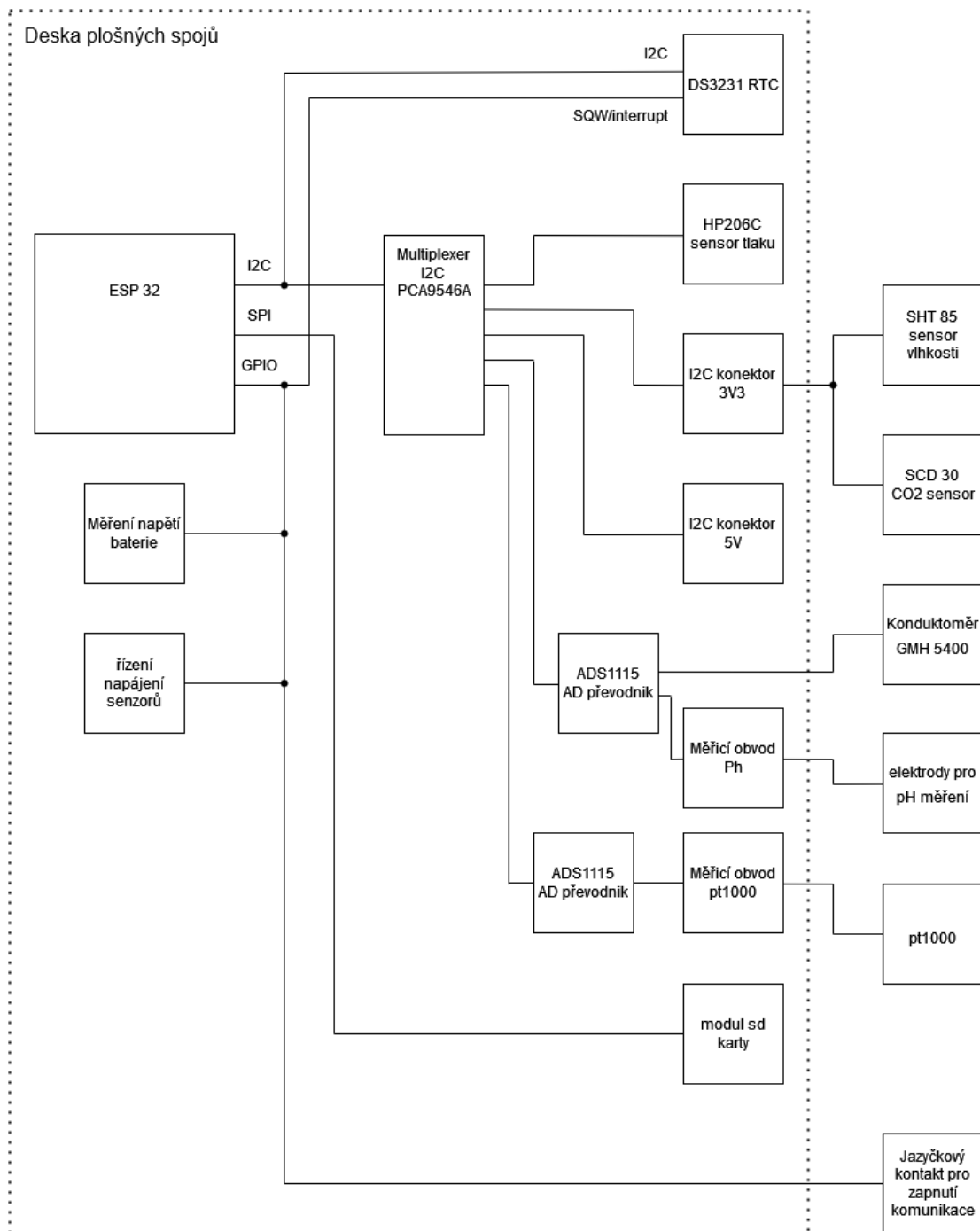
Pro sepnutí komunikace je použit jazýčkový magnetický kontakt. Jedná se o snímač okolního magnetického pole, který se skládá ze dvou kontaktů. Při jejich magnetizaci okolním magnetickým polem se kontakty spojí. To uzavře elektrický obvod. Pomocí ESP32 pak můžeme detekovat přiblížení magnetu k přístroji a začít tak komunikaci s externím zařízením. K spínání tak není potřeba porušit fyzický obal zařízení.



Obrázek 3.19 Jazýčkový magnetický kontakt THT MEder KSK-1A66-1020. [30]

## 4. BLOKOVÝ DIAGRAM ZAPOJENÍ

Základem měřicí stanice je mikrokontroler ESP32. Ten bude zajišťovat komunikaci se senzory a AD převodníky a zápis dat na SD kartu. Mikrokontroler bude taky přímo měřit napětí baterie. Připojení periférií k mikrokontroleru je zobrazeno na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1 Blokový diagram zapojení komunikace stanice

Většinu senzorů je nutno vystavit externím podmínkám a jsou tak umístěny vně vodotěsné krabice. Pouze senzor atmosférického tlaku lze umístit uvnitř krabice, protože v čase se tlak vně a uvnitř krabice vyrovná. Na desce plošných spojů je umístěn modul hodin reálného času a AD převodníky. Deska má konektory vývodů I2C sběrnice s napájením. Díky vlastnostem sběrnice I2C je možné zapojit několik různých senzorů na stejný konektor, pokud tedy senzor komunikuje přes I2C lze jej přidat ke stanici bez nutnosti fyzických úprav desky plošných spojů. AD převodníky jsou připojeny na různé kanály multiplexeru aby nedošlo ke kolizi adres. Modul hodin reálného času bude připojen přímo na I2C linku ESP32. Pro přístup k aktuálnímu času není potřeba nastavovat multiplexer. Pro komunikaci s řízenými komponenty a externí přerušení jsou použity piny GPIO (General-purpose input/output) mikrokontroleru ESP32. ESP32 má všechny piny nastavitelné a dokáže vyvolat přerušení od změny stavu na kterémkoliv pinu. AD převodníky ESP32 lze také interně připojit k většině pinů GPIO. Řízení je napájení senzorů je připojeno na pin 14. Měření napětí externí baterie je připojeno na pin 35. Pro zapnutí externí komunikace pomocí jazýčkového kontaktu je použit pin 27.

## 5. SCHÉMA ZAPOJENÍ A DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ

Celé schéma zapojení je uvedeno v příloze A. V této kapitole jsou uvedeny části zapojení, které souvisí s analogovým měřením a úpravou napětí.

### 5.1 Schéma zapojení pH elektrod a Konduktoměru

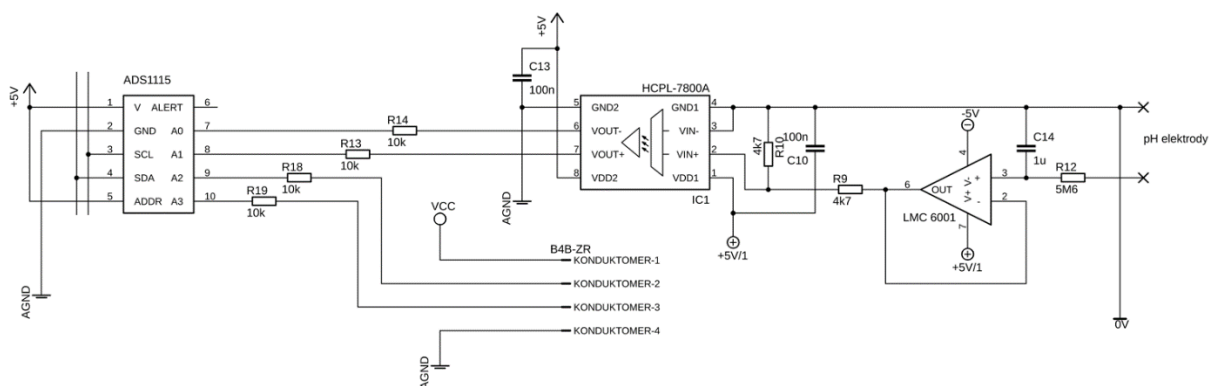
Ve schématu není uvedeno připojení AD převodníku na sběrnici I2C. Kompletní propojení je ve schématu v příloze. Pro měření pH bude na vstupu nízko propustný RC filtr, který zajistí filtraci šumu na vstupu operačního zesilovače. Časová konstanta vstupního filtru je:

$$\tau = RC = 5,6 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6} = 5,6s \quad (5.1)$$

Filtr by tedy měl vyfiltrovat jakýkoliv vysokofrekvenční šum na vstupu zesilovače. Obvod bude měřit pouze dlouhodobě ustálenou hodnotu pH.

Za filtrem je připojen operační zesilovač LMC6001 zapojený jako sledovač napětí. Tím se docílí zvýšení vstupního odporu na dostatečnou úroveň pro bezproudové měření. Na výstupu zesilovače je dělič napětí 1:2, který zajistí nepřekročení rozsahu vstupního napětí opticky odděleného zesilovače. Zároveň je zde filtrační kondenzátor pro omezení šumu na výstupu zesilovače. Následuje opticky oddělený zesilovač, jeho výstup měříme AD převodníkem ADS1115. Schéma zapojení bylo inspirováno schématem, které bylo navrženo panem doktorem Zdeňkem Roubalem.

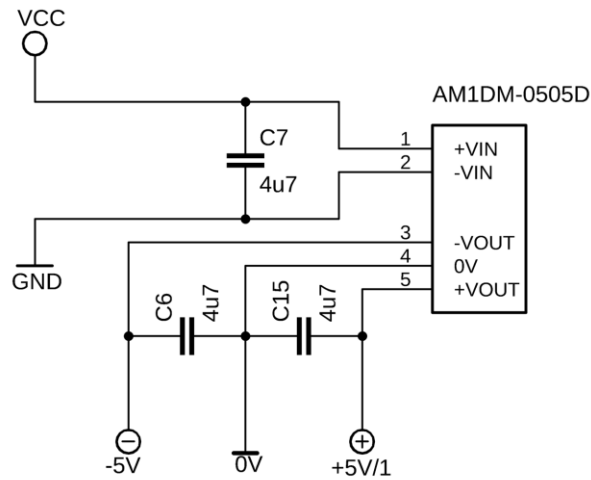
Konduktoměr je připojen pomocí jeho univerzálního konektoru. Pro napájení je k němu přivedeno spínané napětí 5 V. Pro měření je přiveden 1 V analogový výstup konduktoměru na vstup AD převodníku.



Obrázek 5.1 Schéma zapojení pH elektrod a konduktoměru.

## 5.2 Schéma zapojení DC-DC měniče

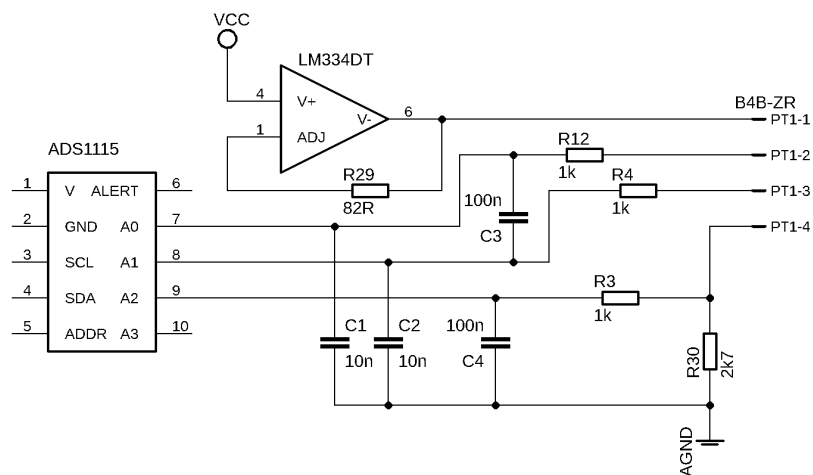
Měnič napětí je zapojen podle doporučeného zapojení v dokumentaci měniče [28]. Pro ušetření energie bude zapojen na mikrokontrolerem spínané napětí.



Obrázek 5.2 Schéma zapojení DC-DC měniče.

## 5.3 Schéma zapojení odporového čidla teploty Pt1000

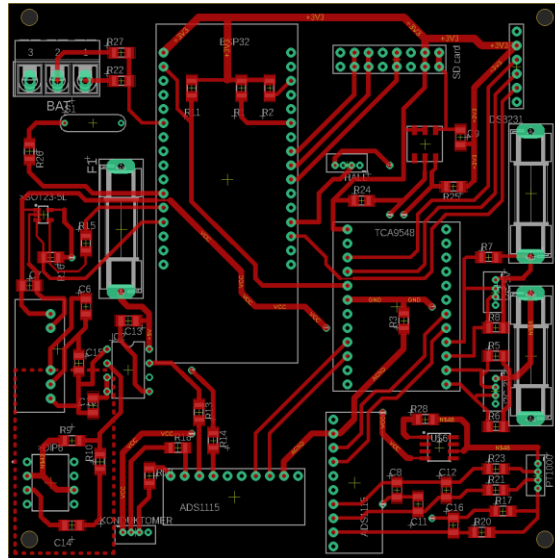
Čidlo teploty je zapojeno podle schémat uvedených v sekci 3.2. Odpor pro nastavení proudového zdroje byl vypočten v sekci 3.17. AD převodník diferencně měří napětí na odporovém čidle, pomocí pinů A0 a A1. Na pinu A2 se měří napětí na referenčním odporu. Tím je zjištěn celkový proud čidlem Pt1000.



Obrázek 5.3 Schéma zapojení odporového čidla teploty Pt1000.

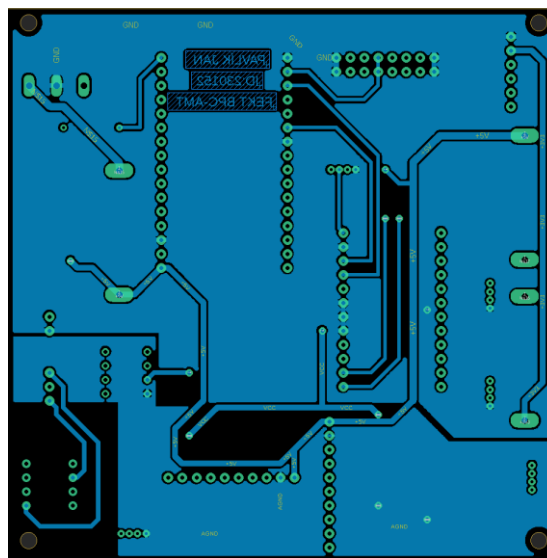
## 5.4 Deska plošných spojů – vrchní vrstva

Protože ESP32 je instalováno ve formě modulu lze tedy pod něj umístit SMD součástky a ušetřit tak místo na desce.



Obrázek 5.4 Zapojení desky plošných spojů na vrchní straně desky.

Spodní vrstva desky plošných spojů slouží převážně pro vedení zemního signálu pod desce.



Obrázek 5.5 Zapojení desky plošných spojů na spodní straně desky.

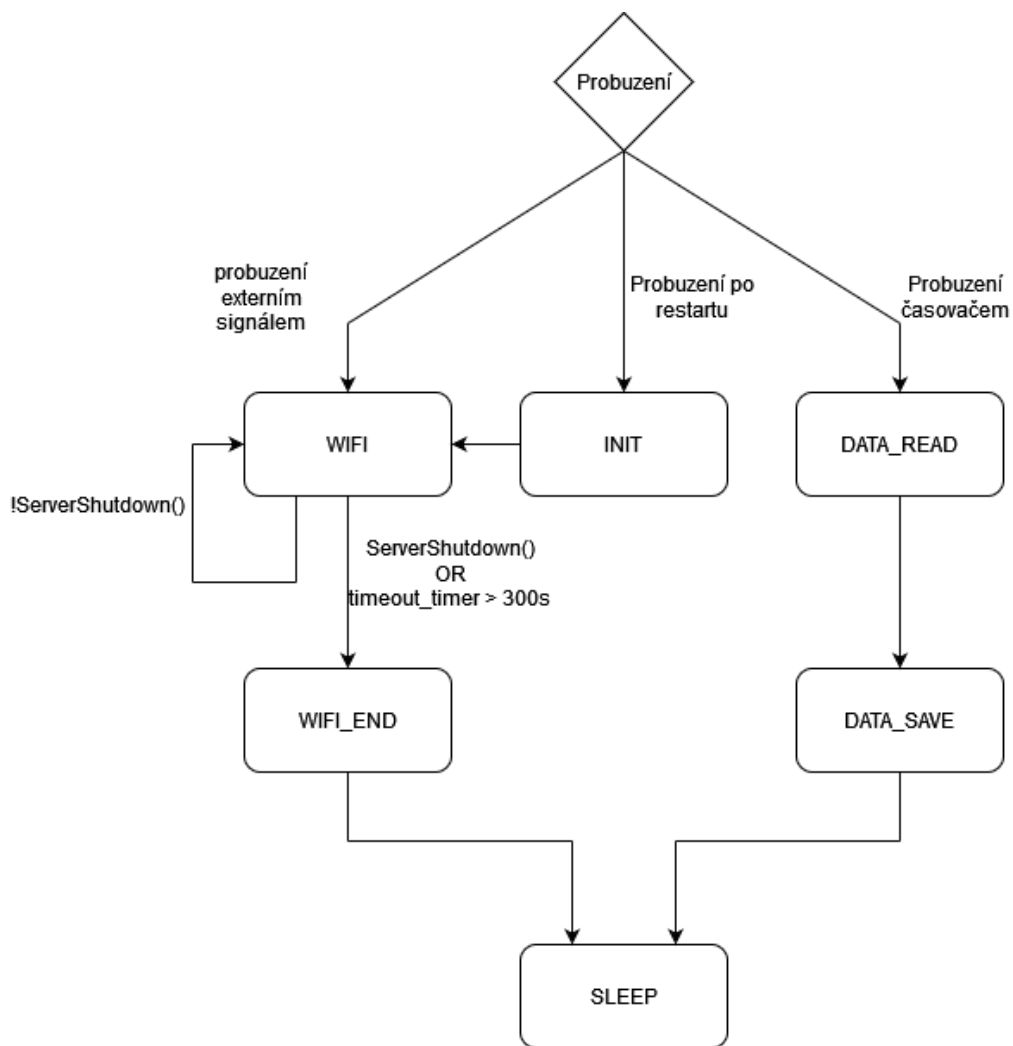
Protože je kritické, aby na vstupu zesilovače pro pH měření nebylo rušení bude jeho vstup vyveden vzdušně přímo z desky. Není tak nutné, aby měl konektor. Pro ochranu součástek jsou na desce pojistky zabráňující poškození komponent.

## 6. PROGRAM A OVLÁDÁNÍ

Program musí správně přečíst data ze senzorů, nahrát je do úložiště a umožnit jejich stažení. Zároveň musí existovat možnost zařízení bezdrátově ovládat. Program funguje na základě stavového automatu, jehož stav se udržuje i v režimu spánku. Zařízení je ovládáno přes Wi-Fi připojení. Zařízení si vytvoří vlastní přístupový bod sítě a na IP adrese 192.168.0.1 umožní přístup na vnitřní server. K ovládání tak stačí jakékoliv zařízení s internetovým prohlížečem.

### 6.1 Stavový automat zařízení

Stavový automat je tvořen sedmi stavy: INIT, WIFI\_INIT, WIFI\_END, DATA\_READ, DATA\_SAVE, SLEEP a ERROR\_PRINT. Jejich funkce je popsána následujícím diagramem:



Obrázek 6.1 Diagram řídicího stavového automatu.



Mezi stavy se přepíná pomocí interní detekcí důvodu probuzení mikrokontroleru. Pokud byl se mikrokontroler probudil po restartu nastaví se stav na INIT. Pokud mikrokontroler probudí pomocí vzbuzení přes GPIO pin, bylo detekováno sepnutí jazýčkového relé, a stav se nastaví na WIFI. Pokud je probuzení zapříčiněno časovačem, tak se STAV nastaví na DATA\_READ. Ze stavu WIFI se přejde po překonání časového úseku při neaktivitě uživatele anebo pokud uživatel zadá požadavek na ukončení komunikace. Pro uložení stavu je využito speciálního paměťového prostoru RTC slow memory, který se při usnutí ESP32 nemaže. Do tohoto prostoru se ukládá taky proměnná ID která udává pořadí měření a proměnná S\_TO\_WAKEUP která ukládá hodnotu sekund po kterou bude ESP v hlubokém spánku. Pro dlouhodobý zápis dat a uložení webového rozhraní je použita SD karta. Souborová struktura je tvořena z konfiguračního souboru „Config.txt“ Datového souboru „Log.txt“ a složky „WebServer“ obsahující soubory webového rozhraní zobrazených na obrázku 6.2.

```
D: .
|   log.txt
|   Config.txt
|
\---WebServer
      Config.html
      Erase.html
      index.html
      style.css
      VUT_fekt.png
      WiFiOff.html
```

Obrázek 6.2 Organizace souborů na SD kartě.

Ihned po spuštění se také nastaví pin 14 na HIGH čímž dojde ke spuštění spínaných snímačů. Při přechodu do spánku se pin nastaví na hodnotu LOW. Tím se spínané prvky vypnou. Protože spuštění senzorů po obnovení napájení nějakou dobu trvá, je omezena minimální doba vzorkování zařízení. Pro start senzorů je vyčleněn čas 10 sekund. Velká část tohoto času je tvořena časem pro zahájení činnosti konduktoměru GMH 5400.

### 6.1.1 Stav INIT a třída Config

Ve stavu INIT se nastaví počáteční hodnoty konfigurace a vyzkouší se připojení senzorů. Třída Config slouží pro obsluhu konfiguračního souboru na SD kartě „Config.txt“. Soubor je tvořen čárkami oddělenými hodnotami konfigurace, první hodnota je načtený

Unix Time pro synchronizaci času, druhá je vzorkovací perioda zařízení, třetí je vzorkovací frekvence senzoru SCD30, čtvrté a páté hodnoty jsou hodnoty pro kalibraci senzoru Pt1000. Jedná se o offsety při kalibračních teplotách 0°C a 100°C. Poté se uládá rozsah konduktoměru, Třída má metody pro uložení a nahrání konfigurace ze souboru „Config.txt“, SaveConfig() a LoadConfig().

### **6.1.2 Stav WIFI, WIFI\_END a knihovna WifiConfigServer**

Ve stavu Wifi je požitá mnou vytvořená knihovna WifiConfigServer k aktivaci Wifi vysílače a nastavení konfigurace skrze webové stránky, které přeposílá z SD karty pomocí knihovny ESPAsyncWebServer [31]. Knihovna WifiConfigServer obsahuje funkce InitComm() a EndComm(), které zajišťují funkčnost serveru a wifi antény. Dále obsahuje funkce ServerShutdown(), ServerInitialized() a TimeoutRead(), ty vracejí hodnotu bool a podávají informace o vnitřním stavu serveru. ServerShutdown() je true pokud uživatel ukončil komunikaci. ServerInitialized() vrací hodnotu true pokud se server úspěšně inicializoval. TimeoutRead() vrací stav interní proměnné timeout\_tracker, která se nastavuje na hodnotu true v případě že uživatel provedl jakoukoliv akci. Funkce zároveň nastaví tuto proměnnou na false. Pokud je tedy tato hodnota přečtena jako true provede se reset časovače pro ukončení komunikace. Pokud časovač překročí hodnotu 300 sekund nebo je hodnota funkce ServerShutdown() true. Tak se aktuální stav nastaví na WIFI\_END.

Ve stavu WIFI\_END se pomocí funkce EndComm() vypne server a Wi-Fi anténa. Poté se uživatelem zadaná konfigurace nahraje do snímačů a proměnných. Po nahrání se nastaví stav SLEEP a zařízení přejde do spánku. Při nastavování času spánku se od něj odečte 10 sekund které budou použity ve stavu DATA\_READ.

### **6.1.3 Stav DATA\_READ, DATA\_SAVE a třída Data**

Pokud mikrokontroler probudí časovač, předpokládá se, že byla nastavena konfigurace a přejde se do stavu DATA\_READ, Na začátku stavu je funkce zpoždění 10 sekund, která zajišťuje že zařízení počká na spuštění všech snímačů. Postupně se připojují senzory a pomocí rovnic uvedených v předchozích kapitolách se vypočítají data pro uložení. K uložení hodnot je použita třída Data. Třída má metody pro vygenerování textového řetězce hodnot a uložení tohoto řetězce do souboru „Log.txt“ na SD kartě. Soubor je ve formátu CSV (Comma Separated Values). Ukládané hodnoty jsou ID měření, datum, čas, teplota vody, teplota vzduchu, koncentrace CO2, atmosférický tlak, relativní vlhkost, pH, vodivost a průtok vody. Pokud soubor neexistuje tak ho třída vytvoří a nahraje do něj předem danou hlavičku. Metody pro uložení dat jsou využity až ve stavu DATA\_SAVE. V tomto stavu se také čte hodnota času hodin reálného času. Čas je tak navázán k času uložení. Čtení senzorů je velmi rychlé, a tak je tato časová hodnota zároveň hodnota času měření.

### 6.1.4 Knihovna Sensors

Knihovna sensor zastřešuje obsluhu senzorů pomocí veřejných knihoven pro různé senzory. Senzor SCD30 je ovládán pomocí knihovny Adafruit\_SCD30 [32]. V knihovně byla upravena funkce begin(), která standartně resetuje vnitřní parametry SCD30. Vzhledem k neustálému připojování senzoru díky uspávání ESP32, bylo resetování z knihovny odebráno a dělá se externě ve funkci InitSCD30(). K znovu připojení senzorů po periodě spánku zařízení slouží funkce ConnectSCD30(). Podobně byla upravena i knihovna použita k obsluze AD převodníku Adafruit\_ADS1X15 [33]. K čtení senzoru HP206C je použita upravená knihovna vytvořená pro Arduino [34]. V knihovně byl upraven způsob čtení dat ze senzorů ke zlepšení kompatibility s ESP32. Knihovna obsahuje funkce, které používají hodnoty změřené AD převodníky k výpočtu měřených hodnot.

### 6.1.5 Funkce Error()

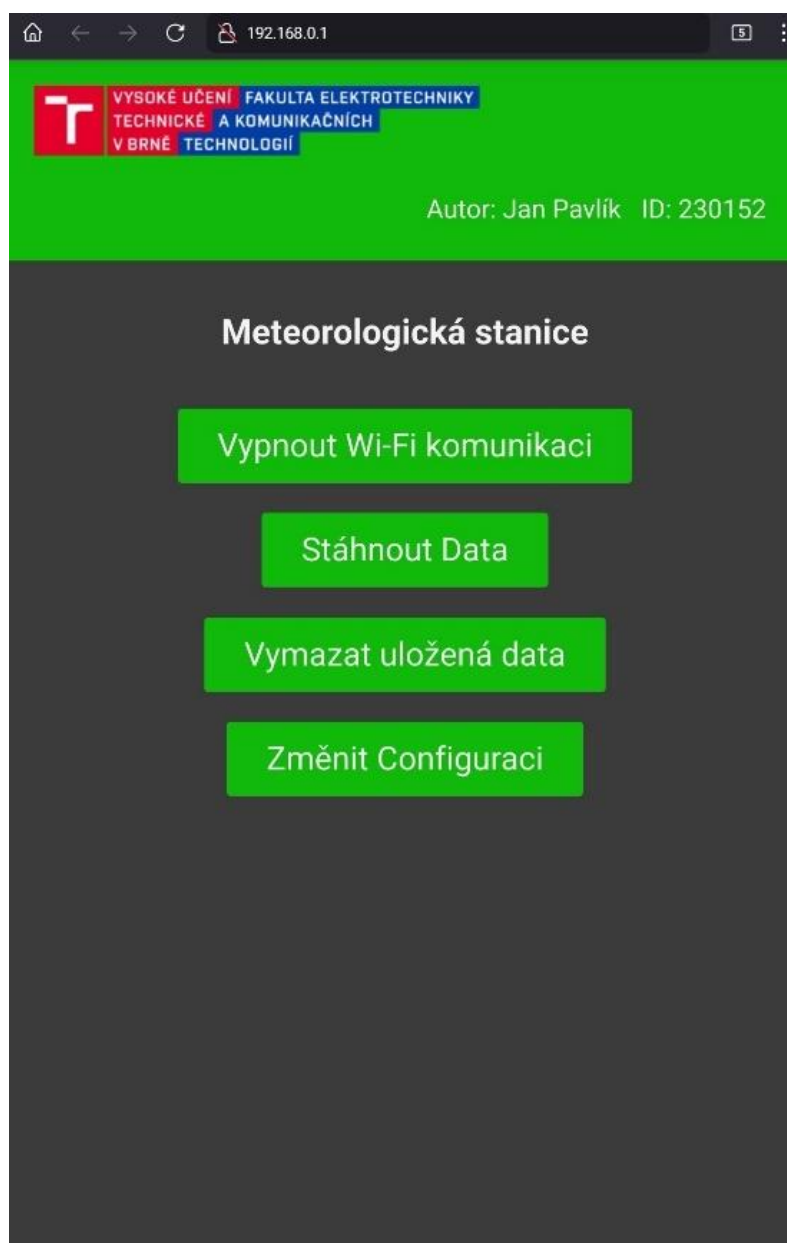
Pro obsluhu chyb v hlavní části programu je vytvořena funkce Error(), která umožňuje vypsání chybových zpráv do souboru „ERROR.txt“. Rozlišujeme mezi třemi různými zdroji poruch senzory, SD karta a RTC. V případě že se jedná o chybu senzoru, pokusí se funkce zapsat chybovou zprávu do souboru. Funkce také nepřeručí stavový automat a vrátí se zpět do vykonávání programu. Výpadek jednoho senzoru tak neovlivní ostatní senzory. V případě že je chyba při čtení nebo zápisu do SD karty, jedná se o závažnou chybu a funkce vyvolá celkový restart zařízení. Obdobně při chybě modulu reálného času hrozí poškození zaznamenávaných dat a je vyvolán restart zařízení. Pokud se provede restart vrátí se zařízení do stavu INIT. Chybová zpráva je tvořena informací o typu poruchy, aktuálním časem pokud je dostupný a zprávou, která je funkci předána v parametru.

## 6.2 Obsluha nízko výkonného procesoru

ESP 32 obsahuje nízko výkonný procesor, dále ULP (Ultra Low Power) procesor. Procesor se vyznačuje tím, že je schopen vykonávat instrukce i pokud je hlavní procesor v hlubokém spánku. V projektu je použit pro počítání impulzů kapko metru. Jeho programování je problematické, lze využít pouze jazyk Assembler a procesor umí pracovat pouze s omezeným paměťovým prostorem. Pro správnou kompilaci mnou zvoleným prostředím bylo nutné použít kompilační nástroj, který soubor nalinkoval [35]. Assembler soubor aktualizuje proměnnou „ulp\_edge\_count“ ze které získáme počet jednotlivých pulsů dělením dvěma. ULP procesor je aktivní hned od inicializace v hlavním programu a je aktivní i když procesor není v režimu hlubokého spánku.

## 6.3 Ovládání stanice pomocí Wi-Fi

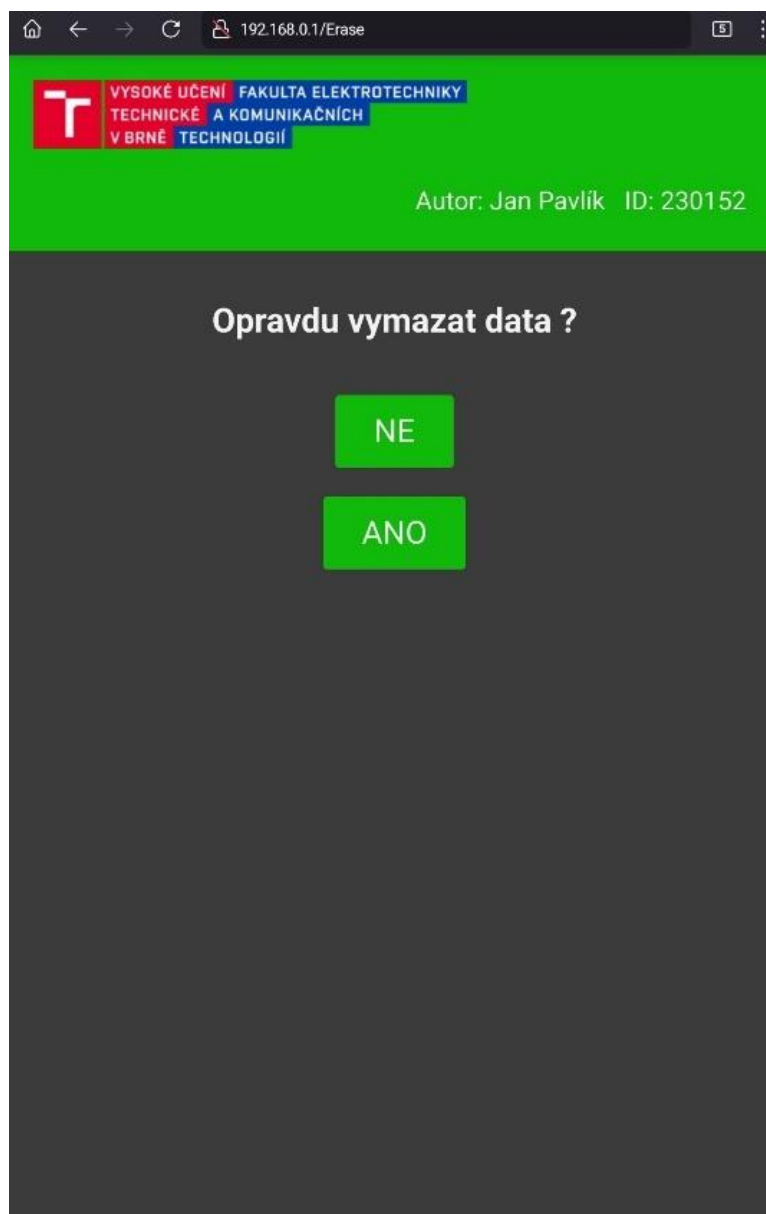
Výhodou použití webového rozhraní pro nastavení zařízení je možnost ovládní stanice různými zařízeními, také není potřeba instalovat speciální aplikace. Při prvotním zapnutí zařízení, nebo po aktivaci pomocí jazýčkového kontaktu se zpřístupní přístupový bod Wi-Fi „Meteo\_stanice“, který není zabezpečen heslem. Na IP adrese „192.168.0.1“ je hostován interní server. Pomocí jakéhokoli zařízení z wifi připojením a internetovým prohlížečem lze se stanicí komunikovat a nastavovat její vlastnosti. Úvodní obrazovka je zobrazena na obrázku 6.3.



Obrázek 6.3 Úvodní obrazovka webového rozhraní.

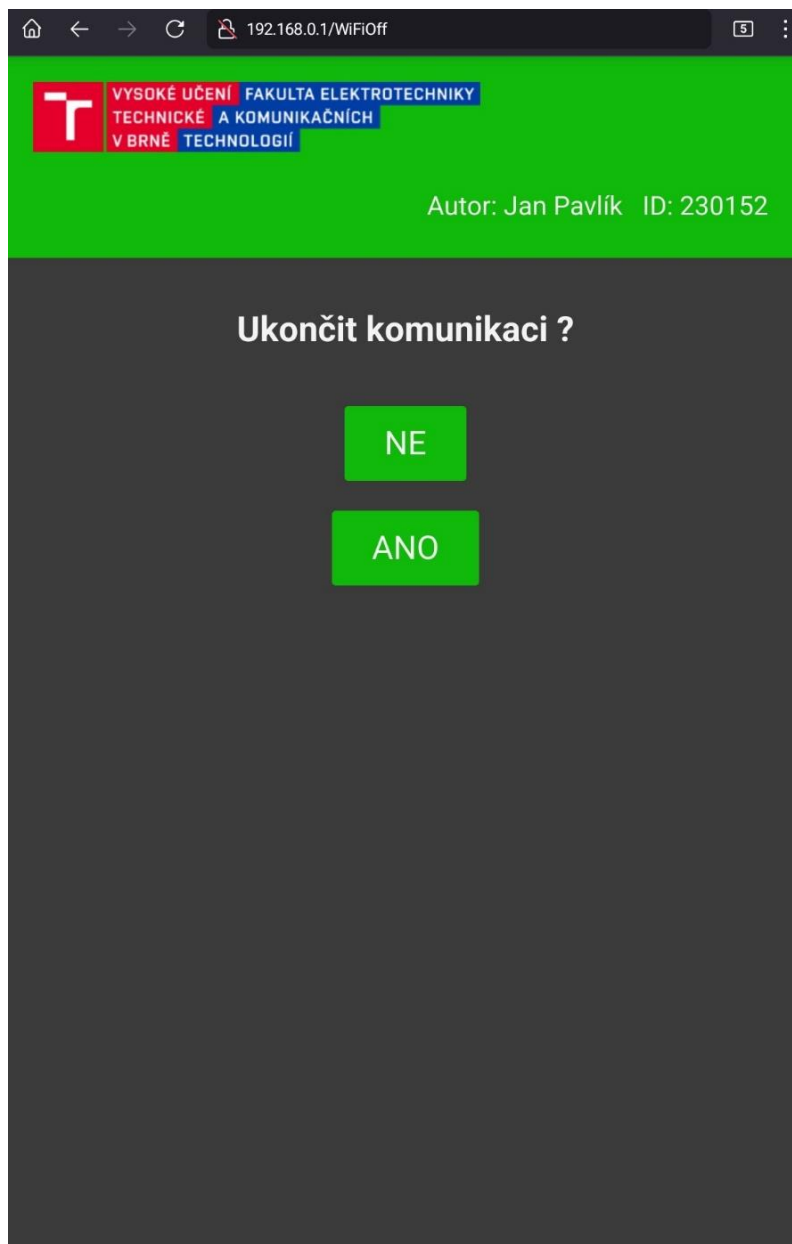
### 6.3.1 Úvodní stránka webového rozhraní

Úvodní webová stránka „index.html“, je tvořena rozcestníkem. Pomocí tlačítek lze přejít na různé části rozhraní. Tlačítko „Stáhnout data“ pošle uživateli přes webové rozhraní soubor „Log.txt“, není tedy nutné se zařízení vyndat SD kartu. Po stisknutí tlačítka „Vymazat uložená data“ je uživatel přesměrován na stránku „Erase.html“, která potvrzuje jeho záměr. Rozložení stránky je zobrazeno na obrázku 6.4. V případě že by uživatel data vymazat nechtěl je mu umožněno vrátit se zpět na úvodní rozcestník tlačítkem „NE“. Pokud si je uživatel jistý, tak stisknutím tlačítka „ANO“ je přesměrován zpět na rozcestník a soubor „Log.txt“ na SD kartě je smazán. Nový soubor obsahující hlavičku je vytvořen na jeho místě.



Obrázek 6.4 Stránka dotazující se uživatele na vymazání dat.

Při stisknutí tlačítka „Vypnout WiFi komunikaci“ je uživateli prezentována podobná stránka „WiFiOff.html“ zobrazená na obrázku 6.5. Stránka zamezuje neúmyslnému ukončení komunikace. Pokud uživatel stiskne tlačítko „ANO“ je na jeho zařízení poslána prázdná stránka a stanice přejde do stavu WIFI\_END. Anténa Wi-Fi je vypnuta a konfigurace nastavena uživatelem je přepsána do vnitřních proměnných, aby mohlo začít měření. Po stisknutí tlačítka „NE“ je uživatel přesměrován zpět na rozcestník.



Obrázek 6.5 Stránka dotazující se uživatele na ukončení komunikace.

### 6.3.2 Nastavování konfigurace skrze webové rozhraní

Pro nastavení konfigurace slouží menu obsažené v souboru „Config.html“, uživatel pomocí formulářů vyplňuje požadované hodnoty periody měření zařízení a periody měření senzoru SCD30. Zároveň je zde zobrazen aktuální čas zařízení pro kontrolu. Při každém odeslání hodnoty se konfigurace uloží do SD karty tak aby nebyla ztracena. Hodnoty, které jsou na stránce zobrazeny jsou nahrávány z SD karty a slouží pro kontrolu nastavených údajů.

VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
TECHNICKÉ A KOMUNIKAČNÍCH  
V BRNĚ TECHNOLOGIÍ

Autor: Jan Pavlík ID: 230152

## Nastavení konfigurace

Vzorkovací frekvence zařízení: 30s  
Vzorkovací frekvence senzoru SCD30: 15s  
Nově nastavený čas RTC: 2023-05-19,13:28:56

Perioda Vzorkování (15-65535)s:

Perioda vzorkování senzoru SCD30 (2-1800)s:

**Aktualizovat čas**

**Zpět**

## Kalibrace teploměru PT1000

Měřená teplota bez kalibrace: 21.35 °C, s kalibrací: 19.33°C

Teplota bez kalibrace při 0°C (2.50)°C:

Teplota bez kalibrace při 100°C (100.00)°C:

**Obnovit předchozí kalibraci**

Obrázek 6.6 Stránka pro nastavení konfigurace.

Při připojení uživatele k webové stránce se vykoná skript v jazyce Javascript, který se zařízení uživatele zjistí aktuální čas a pošle ho ve formátu ISO 8601, to umožní zařízení si lépe udržet aktuální čas. Krátký program je zobrazený na obrázku 6.7, aby čas odpovídal skutečnému času je před odesláním nutné odečíst časovou zónu uživatele.

```
<script type="text/javascript">
  var x = new Date()
  const offset = x.getTimezoneOffset()*60*1000;
  x.setTime(x.getTime()-offset);
  var xhr = new XMLHttpRequest();
  xhr.open('POST', '/datetime');
  xhr.setRequestHeader("Content-type", "application/x-www-form-urlencoded");

  var msg = "datetime="+x.toISOString();
  xhr.send(msg)
</script>
```

Obrázek 6.7 Kód spuštěný na zařízení uživatele.

Aby nedošlo k neúmyslnému přepsání času, například pokud uživatel má zařízení s časem, který neodpovídá času nastaveném ve stanici, je čas aktualizován pouze po stisknutí tlačítka „Aktualizovat čas“. Kalibrace Pt1000 zobrazuje aktuálně měřenou teplotu, a právě nastavenou hodnotu kalibrace. Kalibrace je provedena pomocí dvou snadno dosažitelných teplot, a to 0 °C a 100 °C, nadpis uvádí měřenou teplotu s korekcí a bez korekce.

Obnovit předchozí kalibraci

### Rozsah měření konduktoměru

Nastavená hodnota DAC0 v konduktoměru (0.00) [µS/cm]:

Nastavená hodnota DAC1 v konduktoměru (500.00) [µS/cm]:

### Nastavení kalibračních bodů pH elektrody

Kalibrovaná hodnota pH:0.00 při napětí sondy: -2.30mV :

Kalibrovaná hodnota pH:3.00 při napětí sondy: -2.30mV :

Kalibrovaná hodnota pH:8.00 při napětí sondy: -2.30mV :

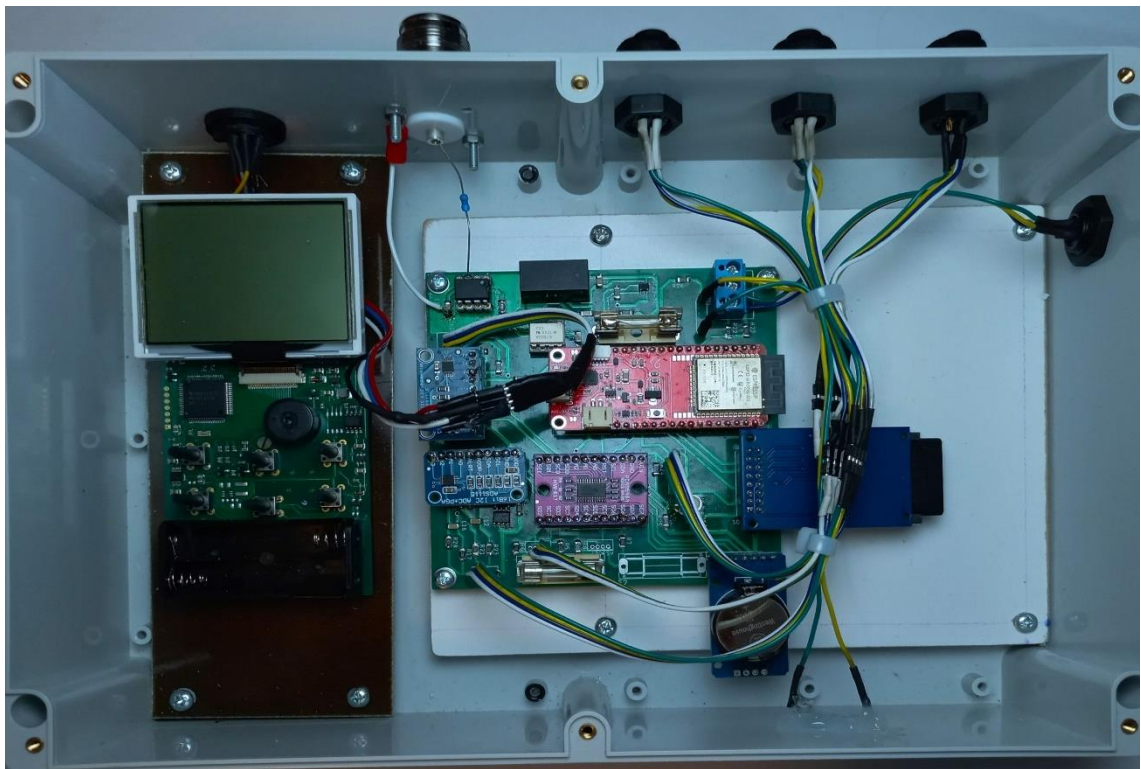
Obrázek 6.8 Kalibrace pH sond a konduktoměru



Na obrázku 6.8 je vidět způsob kalibrace konduktoměru a pH metru. Výstup konduktoměru závisí na vnitřních hodnotách „DAC0“ a „DAC1“, které určují rozsah měření. Tyto hodnoty je potřeba zadat do stanice, která pomocí nich převádí napětí na vodivost. pH elektrody jsou kalibrovány pomocí tří referenčních bodů. Ke kalibraci se používají speciální roztoky s přesnou hodnotou pH. Zadáním hodnoty pH roztoku, do kterého je elektroda ponořena, se změří aktuální vstupní potenciál a ten se nastaví jako referenční.

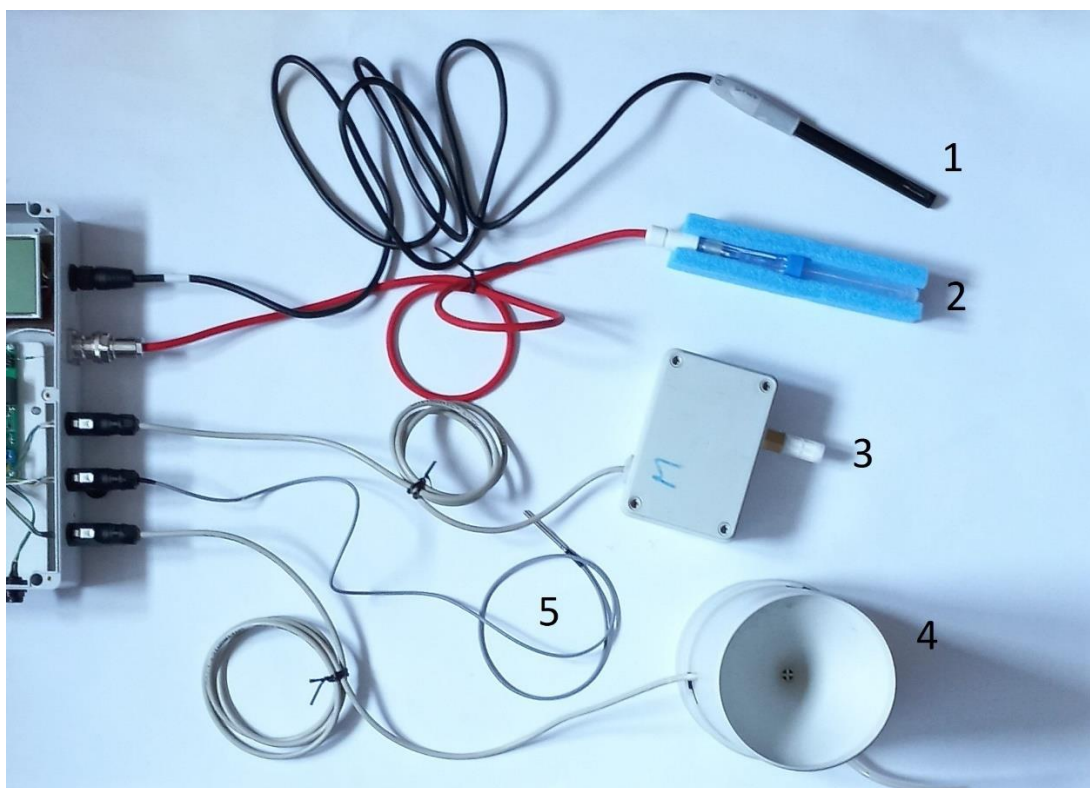
## 7. KONSTRUKCE METEOROLOGICKÉ STANICE

Meteorologická stanice je zkonstruována ve vodotěsné krabici. Senzory jsou připojeny vodotěsnými konektory. Stanice je tak odolná proti vlhkosti. Uvnitř vodotěsné krabice je umístěna i deska plošných spojů konduktoměru GMH 5400. Na obrázku 7.1 lze vidět připojení konektorů k desce a konduktoměr GMH5400. Jeho analogový výstup je vyveden a připojen na měřicí desku. Lze vidět i připojení pH sondy k desce pomocí rezistoru 5,6M $\Omega$ .



Obrázek 7.1 Vnitřní konstrukce zařízení

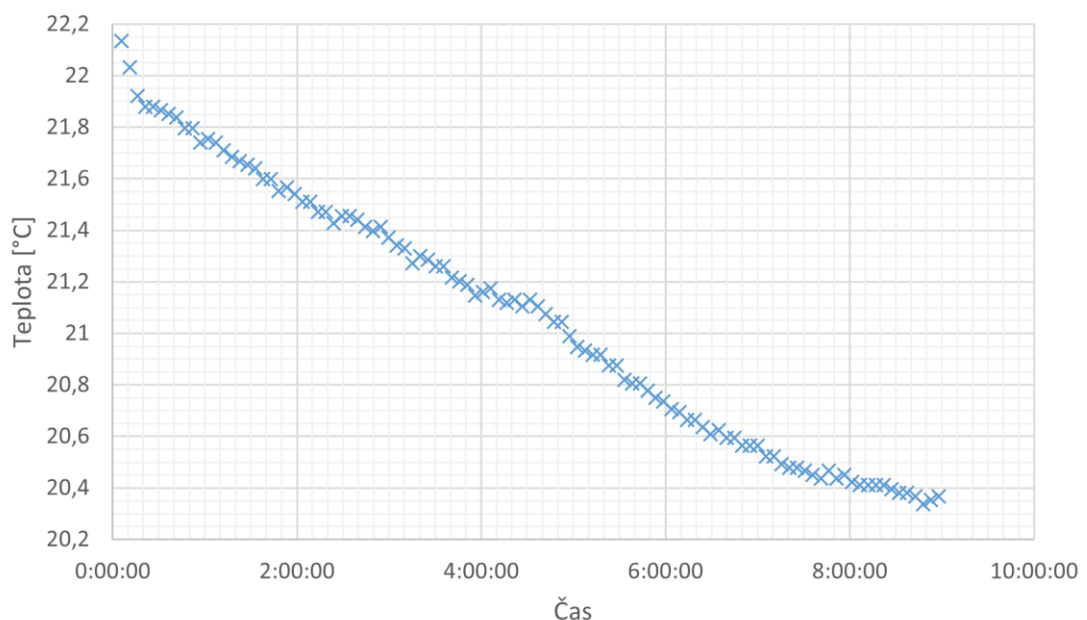
Na obrázku 7.2 je zobrazena stanice se všemi připojenými moduly. Číslem 1 je označená sonda konduktoměru, číslem 2 je označena sonda pH, číslo 3 označuje stanici obsahující číslo SHT85 a SCD30, číslem 4 je označen kapkometr a číslem 5 je označeno čidlo teploty Pt1000. Díky konektorům lze stanici lépe přenášet, což je výhoda v podmínkách kde stanice bude použita.



Obrázek 7.2 Připojení senzorů ke stanici

## 8. ODZKOUŠENÍ ZAŘÍZENÍ A KALIBRACE

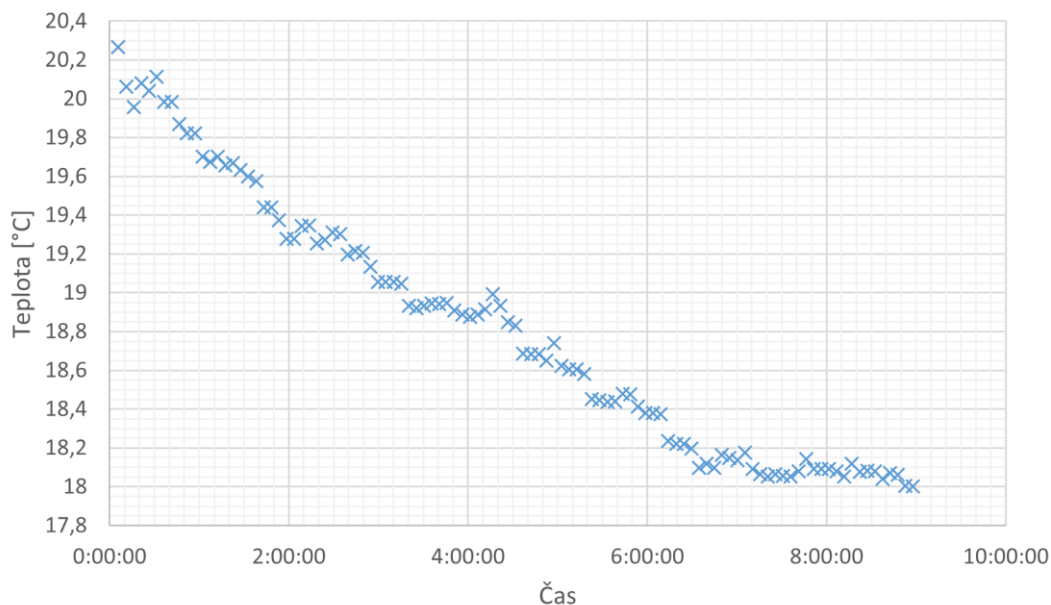
Pro ověření funkcionality stanice bylo provedeno měření v poměrně dlouhém časovém úseku asi 9 hodin se vzorkovací periodou 5 minut (300 sekund). Celkem bylo provedeno 105 jednotlivých měření. Protože simulace kapání vody by byla komplikovaná nebylo provedeno měření pH, průtoku vody a konduktivity vody. Test sloužil převážně k ověření senzorů pro sledování atmosféry a zápisu dat na SD kartu. Stanice byla umístěna uvnitř domu. Měření bylo započato 5 minut po 12. hodině ráno 17. května 2023. Okolo čtvrté hodiny bylo otevřeno okno pro větrání. Na obrázku 8.1 je zobrazen průběh teploty měřené teploty senzorem SHT85.



Obrázek 8.1 Graf naměřené teploty senzorem SHT85

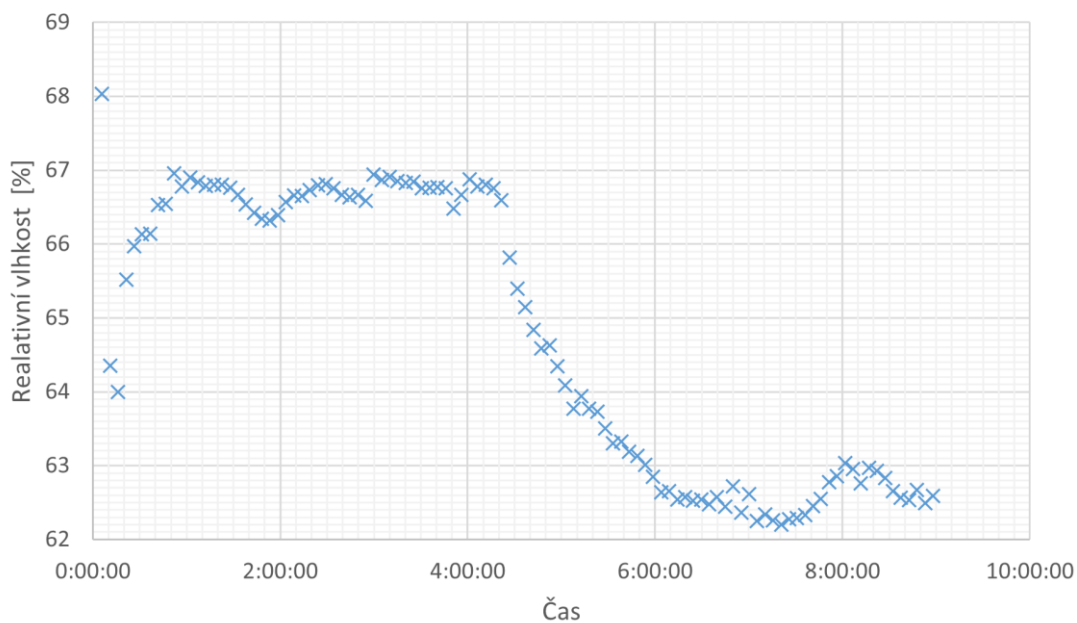
Senzor ukazuje na začátku měření vyšší teplotu vlivem manipulace se stanicí. Teplota postupem času klesala.

Senzor Pt1000 byl umístěn blízko okna a měřil tak nižší teplotu. To je vidět na obrázku 8.2. Měření teploměrem Pt1000 je při správné kalibraci přesnější jak měření pomocí senzoru SHT85, který je kalibrován pouze od výrobce.



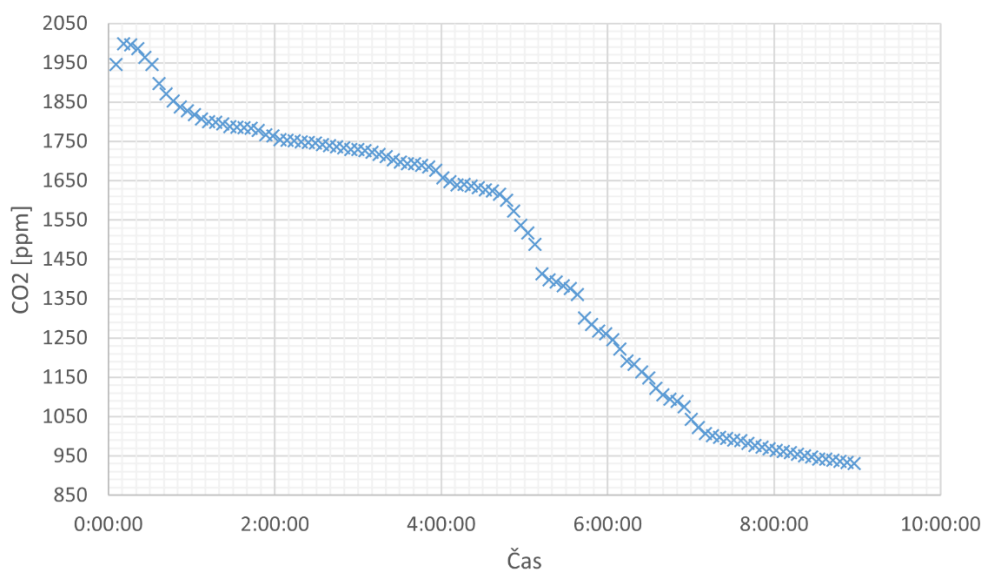
Obrázek 8.2 Graf naměřené teploty senzorem Pt1000

Senzor SHT85 také měřil okolní vlhkost. Z obrázku 8.3, který zobrazuje její průběh v čase lze vidět vliv manipulace se senzorem na měřená data na začátku měření.



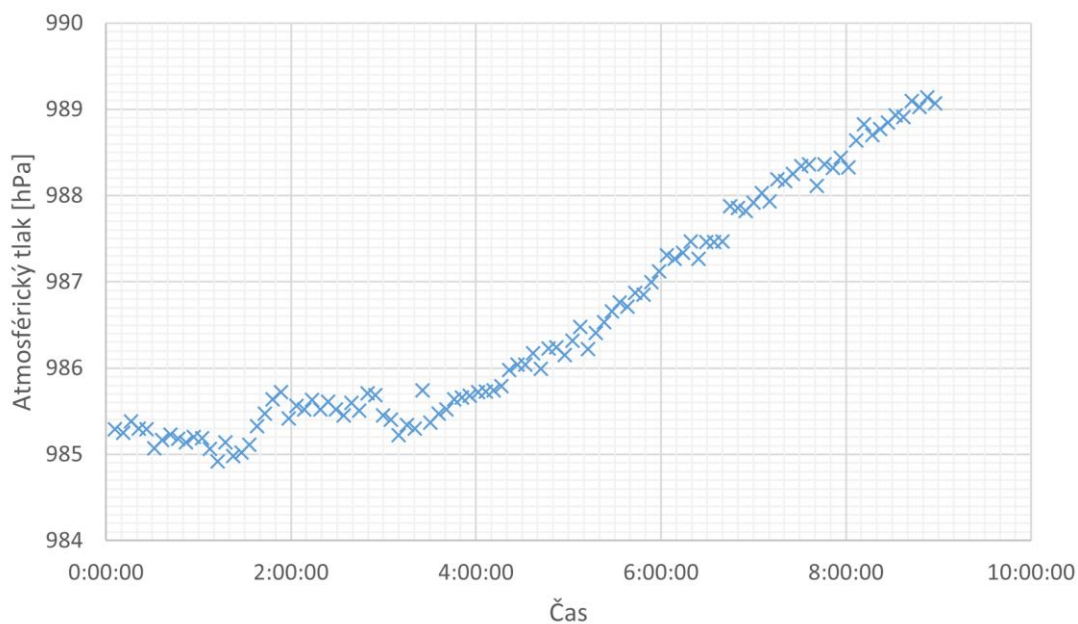
Obrázek 8.3 Graf naměřené relativní vlhkosti senzorem SHT85

Senzorem SCD30 byla měřená koncentrace CO<sub>2</sub> v průběhu času, koncentrace byla taktéž ovlivněna manipulací se senzorem. Sensor pracoval s interní periodou vzorkování 60 s. Průběh koncentrace CO<sub>2</sub> odpovídá očekávání. Při větrání se hodnota postupně snižuje na koncentraci venkovní atmosféry.



Obrázek 8.4 Graf naměřené koncentrace CO<sub>2</sub>

Poslední měřitelná veličina byl atmosférický tlak měřený senzorem HP206C. Tlak v průběhu měření roste.



Obrázek 8.5 Graf naměřeného atmosférického tlaku

## 8.1 Kalibrace a nastavení senzorů

Funkčnost měření konduktoměru byla ověřena porovnáním hodnoty na displeji konduktoměru z naměřenou hodnotu na analogovém výstupu. Přesnost měření závisí na zvoleném rozsahu hodnot. Teploměr Pt1000 byl kalibrován pomocí dvou bodů. A to bodem tání ledu 0 °C, při kterém bez kalibrace teploměr měřil teplotu 0,66 °C a bodem varu 100 °C kde nekalibrovaný teploměr naměřil teplotu 98,56 °C. Senzor pH byl kalibrován pomocí roztoků ze specifickými hodnotami 6.68pH a 10,01pH, třetí hodnotu tvoří udržovací roztok o hodnotě pH 7. Ostatní senzory jsou kalibrovány automaticky.

## 8.2 Spotřeba energie stanice

Spotřeba zařízení v různých režimech je zobrazena v tabulce 8.1. Spotřeba byla měřena na vstupu zařízení nahrazením pojistky ampérmetrem.

Tabulka 8.1 Tabulka přibližného proudu spotřebovaného zařízením

Mód	Spotřeba zařízení [mA]
Aktivována komunikace	160
Měření senzorů	60
Hluboký spánek	25

Zařízení má v režimu spánku poměrně vysokou spotřebu, po prozkoumání schématu a zapojení se ukázalo že 11 mA je spotřebováno opticky odděleným zesilovačem. Zbytek spotřeby se dělí mezi Modul SD karty, modul RTC a senzor hp206c. Schéma zapojení by šlo upravit přepojením napájení na spínanou větev. V tabulce 8.2 je zapsána spotřeba jednotlivých senzorů při měření, tedy nejhorší případ.

Tabulka 8.2 Tabulka proudu spotřebovaného různými součástkami

Součástka	Spotřeba [mA]
Senzor SCD30	2,2
Konduktoměr GMH 5400	6,0
Senzor HP206C	5,7
RTC DS 3231	0,5
Modul SD karty	1,6
Senzor SHT85	0,04
Pt1000	0,82
Kapkometr	1,1

## 9. ZÁVĚR

V rámci práce jsem navrhl stanici pro měření meteorologických veličin, která je určena k umístění do jeskynní. Našel jsem vhodné senzory a součástky pro konstrukci, a pro senzor Pt1000 jsem navrhnul schéma zapojení pro jeho čtyř-vodičové měření. Pro realizaci konstrukce jsem navrhnul blokové schéma zapojení, které schematicky zobrazuje propojení jednotlivých součástek. Podle schématu byla navržena deska plošných spojů, která propojuje moduly měření. Zkonstruoval jsem zařízení a naprogramoval algoritmus měření. Algoritmus měření je popsán stavovým diagramem. Vytvořil jsem komunikační rozhraní pro nastavení stanice a její kalibraci. Stanici lze ovládat pomocí mobilních zařízení nebo počítačů z Wi-Fi připojením. Ovládání podporuje všechny nejvíce používané operační systémy. Senzory je přes bezdrátové ovládání možné kalibrovat. Veškeré hodnoty kalibrace se pro pozdější použití ukládají na SD kartu, a zařízení je dokáže načíst ze souborů na SD kartě, konfiguraci tak lze měnit i pomocí změny souborů přímo na SD kartě. K změřeným datům je přístup i bez vytažení SD karty díky možnosti stáhnout data pře Wi-Fi připojení. Funkčnost měření jsem ověřil testem měření hodnot přes delší časový úsek. Senzor Pt1000 byl kalibrován pomocí dvou známých teplot. V případě dalšího vývoje stanice by bylo vhodné snížit spotřebu vypínáním většího množství součástek.



## LITERATURA

- [1] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-010-1500-9.
- [2] RIPKA, Pavel. *Senzory a převodníky*. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3123-3.
- [3] *Measurement, instrumentation, and sensors handbook* [online]. Second edition. Editor John G. WEBSTER, editor Halit EREN. Boca Raton: CRC Press, 2014 [cit. 2022-12-30]. ISBN 978-1-4398-4888-3. 9781315217451. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/b15474>
- [4] *Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové teplotní senzory: ČSN EN IEC 60751*. Ed.2. ČSN, 2022.
- [5] Introduction to Humidity: Basic Principles on Physics of Water Vapor. In: *Sensirion* [online]. Švýcarsko: Sensirion, 2009 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://sensirion.com/products/catalog/SHT85/>
- [6] LMC6001 Ultra, Ultra-Low Input Current Amplifier. In: *Texas Instruments* [online]. Dallas, Texas: Texas Instruments, 2015 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmc6001.pdf>
- [7] Understanding the I2C Bus. In: *Texas Instruments* [online]. Dallas, Texas: Texas Instruments Incorporated, 2015 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf>
- [8] *Analog Front-End Design Considerations for RTD Ratiometric Temperature Measurements*. USA, Massachusetts, 2016. Dostupné také z: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/afe-design-considerations-rtd-ratiometric.html>
- [9] Datasheet SHT85: Humidity and temperature sensor. In: *Sensirion* [online]. Švýcarsko: Sensirion, 2021 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://sensirion.com/products/catalog/SHT85/>
- [10] Datasheet Sensirion SCD30 Sensor Module. In: *Sensirion* [online]. Švýcarsko, 2020 [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: <https://sensirion.com/products/catalog/SCD30/>
- [11] Interface Description Sensirion SCD30 Sensor Module: CO2, humidity, and temperature sensor. In: *Sensirion* [online]. Švýcarsko: Sensirion, 2020 [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: <https://sensirion.com/products/catalog/SCD30/>

- [12] Datasheet, HP206C: Precision barometer and altimeter sensor. In: *Hoperref* [online]. Čína: HOPE Microelectronics, 2018 [cit. 2022-12-25]. Dostupné z: [https://www.hoperf.com/sensor/pressure\\_sensor/HP206C.html](https://www.hoperf.com/sensor/pressure_sensor/HP206C.html)
- [13] *Greisinger GMH 5450 Operating Manual: Conductivity measuring device water-proof, with data logger*. Německo, 2009. Dostupné také z: <https://www.manualslib.com/manual/1348767/Greisinger-Gmh-5450.html>
- [14] Greisinger GMH 5450. In: *Conrad* [online]. Česko: Conrad, 2022 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/p/greisinger-gmh-5450-multifunkcni-merici-pristroj-uvolnene-castice-tds-vodivost-salinita-teplota-1305320#!>
- [15] Provedení FES pH elektrod a dalších elektrod: pro rok 2022. In: *Theta90* [online]. Česko: THETA90, 2022 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://www.theta90.cz/clanky/ph-elektrody-laboratorni.html>
- [16] ESP32 Series: Datasheet. In: *Espressif* [online]. Čína: Espressif, 2022 [cit. 2022-12-26]. Dostupné z: <https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents>
- [17] ESP 32. In: *Laskakit* [online]. Česko: Laskakit, 2022 [cit. 2023-06-05]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/laskakit-esp32-devkit/>
- [18] TCA9548: Multiplexer I2C. In: *Laskakit* [online]. Česko: Laskakit, 2022 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/tca9548-1xi2c-master-8xi2c-slave-expander/>
- [19] TCA9548A Low-Voltage 8-Channel I 2C Switch with Reset. In: *Texas Instruments* [online]. Dallas,Texas: Texas Instruments, 2019 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/TCA9548A>
- [20] ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I 2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs: With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator. In: *Texas Instruments* [online]. Dallas,Texas: Texas Instruments, 2018 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/ADS1115>
- [21] 4-kanálový I2C ADC převodník: ADS1115. In: *Laskakit* [online]. Česko: Laskakit, 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/4-kanalovy-i2c-adc-prevodnik--ads1115/>
- [22] RTC Hodiny reálného času DS3231 AT24C32. In: *Laskakit* [online]. Česko: Laskakit, 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/arduino-rtc-hodiny-realneho-casu-ds3231-at24c32/>
- [23] DS3231: Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal. In: *Analog Devices* [online]. Analog Devices: Maxim integrated, 2015 [cit.

- 2022-12-28]. Dostupné z:  
<https://www.analog.com/en/products/ds3231.html#product-overview>
- [24] KeyStone Architecture: Serial Peripheral Interface (SPI). In: *Texas Instruments* [online]. Dallas, Texas: Texas Instruments, 2012 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ug/sprugp2a/sprugp2a.pdf>
- [25] SD Card modul pro Arduino. In: *Santy* [online]. Česko: Santy, 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.santy.cz/moduly-c22/arduino-sd-mega-nano-shield-modul-i6/>
- [26] HCPL-7800A/HCPL-7800: Isolation Amplifier. In: *Farnell* [online]. San José, California: Avago Technologies, 2008 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/1816980.pdf>
- [27] STMP2141, STMP2151, STMP2161, STMP2171: Enhanced single channel power switches. In: *Farnell* [online]. Švýcarsko: ST, 2013 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/1700527.pdf>
- [28] Series AM1DM-NZ: 1Watt DC-DC Converter. In: *Tme* [online]. Německo: Aimtec, 2022 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z:  
<https://www.tme.eu/Document/b4878c8122a08197ff480bbfaf99ac00/AM1DM-NZ.pdf>
- [29] LM134-LM234-LM334: Three terminal adjustable current sources. In: *Tme* [online]. Švýcarsko: ST, 2007 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z:  
<https://www.tme.eu/Document/d41b73a02b20bf5adb3677a406d8fa4f/lm334.pdf>
- [30] Jazyčkový magnetický kontakt: 200V 0.5A THT Meder KSK-1A66-1020. In: *Svět Součástek* [online]. Česko: SVět Součástek, 2022 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://www.svetsoucastek.cz/magneticky-jazyckovy-kontakt-meder-ksk-1a66-1020-p2544/>
- [31] ESPAsyncWebServer. In: *Github* [online]. github: ivankravets, 2019 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://github.com/me-no-dev/ESPAsyncWebServer>
- [32] Adafruit\_SCD30. In: *Github* [online]. github: Adafruit, 2021 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_SCD30](https://github.com/adafruit/Adafruit_SCD30)
- [33] Adafruit\_ADS1X15. In: *Github* [online]. github: Adafruit, 2021 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_ADS1X15](https://github.com/adafruit/Adafruit_ADS1X15)
- [34] Arduino\_Library\_HP206C\_24Bit\_ADC\_Barometer\_Altimeter\_Sensor. In: *Github* [online]. github: ncdcommunity, 2018 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z:  
[https://github.com/ncdcommunity/Arduino\\_Library\\_HP206C\\_24Bit\\_ADC\\_Barometer\\_Altimeter\\_Sensor](https://github.com/ncdcommunity/Arduino_Library_HP206C_24Bit_ADC_Barometer_Altimeter_Sensor)

- [35] Ulptool-pio. In: *Github* [online]. github: likeablob, 2018 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://github.com/likeablob/ulptool-pio/tree/feat-pio-integration/examples/ulp-counter>

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
GPIO	General-purpose input output
AD	Analog-digital
SD	Secure-digital
I2C	Inter-integrated Circuit
SMD	Surface mount device
CSV	Comma separated values

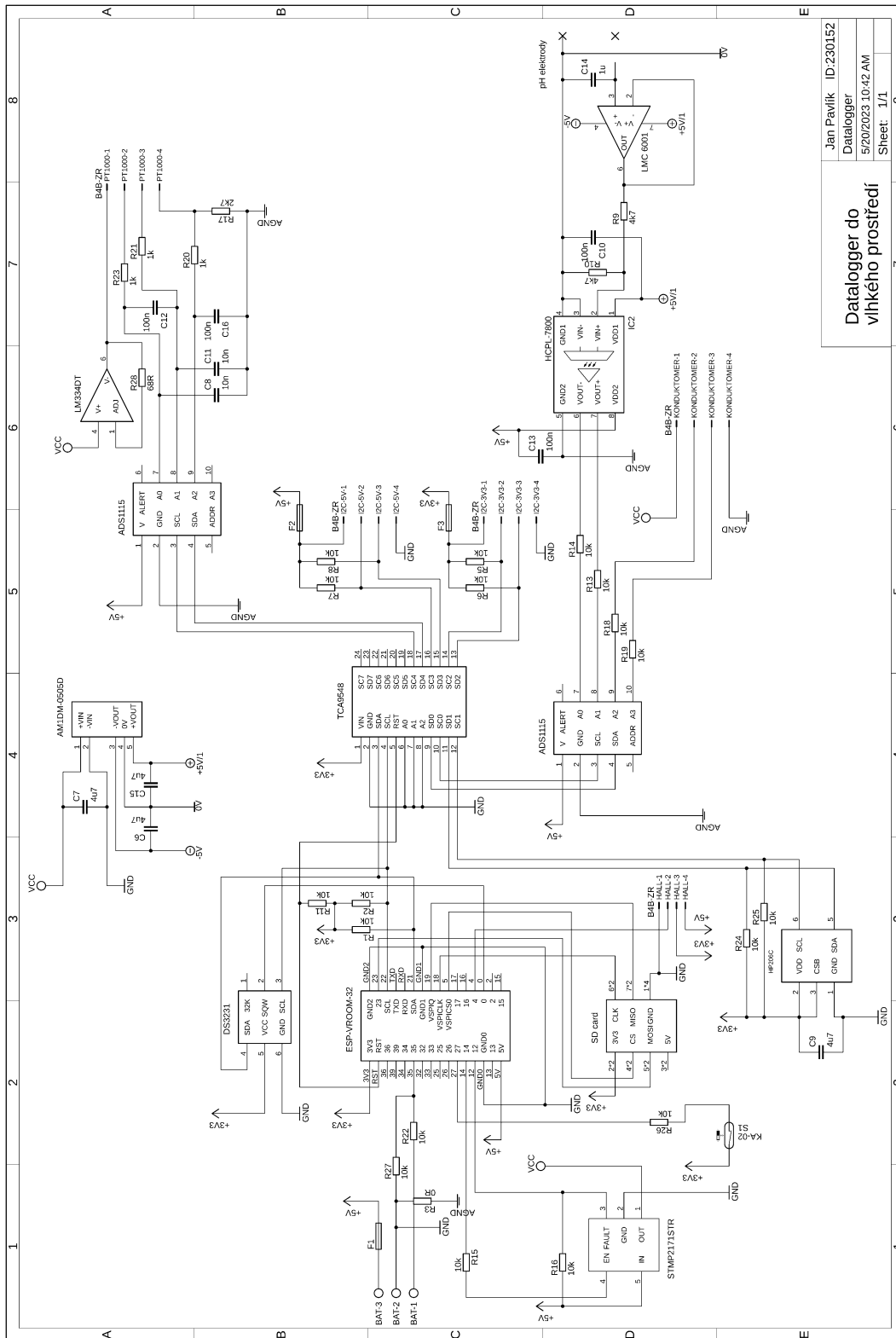
Symboly:

$K$	citlivost	(-)
$T$	termodynamická teplota	(K)
$n$	oxidační číslo	(-)
$\varphi$	potenciál na elektrodách	(V)
$R$	elektrický odpor	( $\Omega$ )
$\vartheta$	teplota ve stupních celsia	(°C)
$pH$	potenciál vodíku	(-)
$\gamma$	konduktivita	( $S m^{-1}$ )
$S$	vodivost	(S)
$m$	vzdálenost	(m)
$C$	kapacita	(F)
$\tau$	časová konstanta	(s)

## SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	62
PŘÍLOHA B - ZDROJOVÝ KÓD NA FLASHDISKU .....	63

# Příloha A - Schéma zapojení



Jan Pavlik	ID:230152
Datalogger	
5/20/2023 10:42 AM	
Sheet: 1/1	

Datalogger do vlhkého prostředí

## **Příloha B - Zdrojový kód na Flashdisku**