

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2020

Ing. Jiří Seifert



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## MĚŘENÍ VÝŠKY HLADINY VODY

WATER LEVEL MEASUREMENT

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jiří Seifert

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2020



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**  
Ústav mikroelektroniky

**Student:** Ing. Jiří Seifert

**ID:** 155129

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měření výšky hladiny vody

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci bakalářské práce navrhnete a realizujete automatické měření výšky hladiny vody. Prostudujte možnosti měření výšky hladiny v nádrži a navrhnete systém, který takové měření bude umožňovat. Navržený systém realizujte s ohledem na prostředí, ve kterém měření probíhá s možností bezdrátového monitorování. Funkčnost měřicí stanice ověřte změřením důležitých parametrů. Výsledky měření vyhodnoťte.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 8.6.2020

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**

*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:**

Tato práce se zabývá měřením výšky hladiny dešťové vody. Měření je umístěno v betonové nádobě pod zemí. Byl vybrán ultrazvukový senzor jako optimální řešení. Ten je umístěn v ochranném obalu IP 65 a vyveden ven do nádrže. Součástí čidla je systém autokalibrace. Signál čidla je vyhodnocen ARMovým mikrokontrolerem ESP8266EX. Vypočtené zaplnění nádrže je odesíláno pomocí WiFi modulu na server.

## **KLÍČOVÁ SLOVA:**

Ultrazvukové čidlo, měření výšky hladiny, ESP8266, Wi-Fi, IoT, akustika, autokalibrace

## **ABSTRACT:**

This thesis is dealt with measurement of water level. Measurement is placed in the concrete container under the ground. It was chosen an ultrasonic sensor as an optimal result. The sensor is placed in the safety container IP 65 and it is placed outside into container. The part of water level measurement is the system of the autocalibration. The signal of the sensor is evaluated by ARM microcontroller ESP8266EX. Calculated water level is broadcasted by WiFi modul to server.

## **KEYWORDS:**

Ultrasonic sensor, level measurement, ESP8266, Wi-Fi, IoT, acoustics, autocalibration

SEIFERT, Jiří. *Měření výšky hladiny vody*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2020. 48 s., 1 soubor elektronické přílohy. Semestrální práce. Vedoucí práce doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

## **PODĚKOVÁNÍ:**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlovi Šteffanovi, Ph.D. za trpělivost, účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

## OBSAH:

<b>ABSTRAKT:</b> .....	<b>7</b>
<b>PODĚKOVÁNÍ:</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>12</b>
<b>1 TEORETICKÝ ÚVOD DO MĚŘENÍ VÝŠKY HLADINY</b> .....	<b>13</b>
1.1 ROZDĚLENÍ HLADINOMĚŘŮ .....	13
1.2 MECHANICKÉ HLADINOMĚRY .....	14
<i>Stavoznaky</i> .....	14
<i>Plovákové stavoznaky</i> .....	14
<i>Hladinoměry s vrtulkou</i> .....	15
<i>Ponorná tyč</i> .....	15
1.3 SILOVÉ HLADINOMĚRY .....	15
<i>Hladinoměry s ponorným tělesem</i> .....	15
<i>Hydrostatické hladinoměry</i> .....	15
<i>Provzdušňovací hladinoměry</i> .....	16
1.4 HLADINOMĚRY VYUŽÍVAJÍCÍ ZÁŘENÍ .....	16
<i>Fotoelektrické hladinoměry</i> .....	16
<i>Laserové senzory</i> .....	16
<i>Radary (Elektromagnetické záření)</i> .....	17
<i>Hladinoměry využívající radioaktivní záření</i> .....	18
1.5 ELEKTRICKÉ HLADINOMĚRY .....	19
<i>Hladinoměry s elektrodami</i> .....	19
<i>Kapacitní hladinoměry</i> .....	19
<i>Ultrazvukové hladinoměry</i> .....	20
<i>Fyzikální popis šíření zvukové vlny<sup>[10]</sup></i> .....	20
<i>Intenzita zvuku a výkon</i> .....	22
<i>Ultrazvukový převodník (zdroj zvukové vlny)</i> .....	23
<i>Umístění ultrazvukových čidel</i> .....	24
<b>2 PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>25</b>
2.1 ZÁKLADNÍ IDEOVÉ SCHÉMA PŘÍSTROJE .....	25
2.2 VÝBĚR SENZORŮ .....	25
<i>Výběr ultrazvukového senzoru</i> .....	26
<i>Výběr pomocného teplotního senzoru</i> .....	27
2.3 VÝBĚR ZOBRAZOVACÍ JEDNOTKY .....	28
2.4 VÝBĚR VYHODNOCOVACÍ JEDNOTKY .....	28
<i>Chip ESP8266EX</i> .....	29
<i>Testovací základní deska</i> .....	30
2.5 ZAPOJENÍ A PRINCIP FUNKCE ČIDLA MĚŘENÍ HLADINY .....	31
<i>Dimenzování součástek pro správný chod čidla</i> .....	33
<i>Výpočet napěťového přizpůsobení 3,3 V na 5 V pomocí tranzistoru</i> .....	33
<i>Výpočet děliče napětí: přizpůsobení z 5 V – 3,3 V</i> .....	33
<i>Popis napájecí části</i> .....	34
<i>Pojistka</i> .....	34

<i>Dimenzování baterie</i> .....	34
<i>Měření reálné spotřeby</i> .....	35
2.6 SCHEMATICKÝ POPIS OVLÁDACÍHO SW .....	35
<i>Vývojový diagram hlavní smyčky programu</i> .....	36
<i>Část kódu pro ovládání ultrazvukového čidla I a II</i> .....	37
2.7 WIFI KOMUNIKACE A SBĚR DAT NA SERVER.....	38
2.8 PROTOTYP ČIDLA MĚŘENÍ VÝŠKY HLADINY .....	38
2.9 REALIZACE, OŽIVOVÁNÍ A TESTOVÁNÍ V PROVOZU.....	39
2.10 CENOVÁ KALKULACE .....	41
<b>3 ZÁVĚR A SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ:</b> .....	<b>42</b>
<b>4 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	<b>43</b>
<b>5 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.</b> .....	<b>44</b>
<b>6 SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>45</b>
<b>7 SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>46</b>
<b>8 SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>48</b>



## Úvod

Cílem práce je vyzkoušet si praktický návrh a konstrukci elektronického zařízení pro měření výšky hladiny. Cílem není vyvinout nové převratné čidlo, ale projít si celý proces vývoje, testování až po reálně fungující vzorek.

Zadáno je měření výšky hladiny v betonové nádobě pod budovou. Zařízení by mělo umět posílat data po WiFi na server. Žádné jiné limity nebyly zadány. Čidlo bude měřit výšku hladiny a tu bude systém přepočítávat na procenta zaplněnosti nádrže. Výběrem byl zvolen ultrazvukový senzor. Z fyziky pohybu zvukové vlny plynou náročnější podmínky pro kalibraci senzoru. Součástí je systém autokalibrace pomocí dvou nezávislých veličin. Kalibrovat lze teplotou nebo měřením známé vzdálenosti. Zařízení bude bezdrátově vysílat výšku hladiny dešťové vody na server. Data budou zobrazena v prostředí ThingSpeak. K němu lze přistupovat pomocí webového rozhraní nebo aplikací v chytrém telefonu. Při návrhu byla vzata do úvahy následující kritéria s cílem najít kompromisní řešení.

Požadovaná kritéria:

- relativní přesnost z hlediska tvaru nádoby a vlastností vody,
- snadná údržba a odolnost,
- výdrž napájení (bude napájeno baterií),
- vliv prostředí (zařízení je umístěno ve vlhku a v neklimatizovaném prostoru),
- schopnost bezdrátové komunikace,
- cena.

Jedním z cílů bylo vybrat optimální typ senzoru měření hladiny. K tomu potřeba znát fyzikální podstatu celého procesu měření. Na základě požadavku snadné údržby byl zvolen ultrazvukový senzor. Oproti jiným cenově dostupným čidlům nepotřebuje pomocnou reflexní plochu. Složitější je kalibrace, protože rychlost zvukové vlny silně závisí na prostředí. Ultrazvukové čidlo je doplněno autokalibrací pomocí teploty, která ovlivňuje rychlost šíření zvukové vlny. Rychlost zvuku ve vzduchu je silně závislá na teplotě, méně pak na vlhkosti nebo tlaku. Další možností autokalibrace, kterou systém obsahuje je doplnění druhým ultrazvukovým senzorem sloužícím ke kalibraci na základě známé vzdálenosti. Vlnění hladiny lze vyloučit průměrováním měřených hodnot.

# 1 Teoretický úvod do měření výšky hladiny

Měření hladiny je jedním z nejrozšířenějších měření v průmyslové praxi. Důvodem není jen zjištění stavu media v zásobnících, ale celkový přehled nákladů na výrobu. Hladina se často přepočítává na množství z geometrických znalostí nádoby. Z hlediska fyzikálního principu se jedná o zjištění rozhraní mezi kapalnou a plynou fází nebo případně mezi tuhou a plynou fází (např. voda – vzduch nebo cukr – vzduch). Méně častým případem je zjišťování rozhraní mezi dvěma kapalnými fázemi dvou nemísitelných látek (např. olej – voda)[1][2].

## 1.1 Rozdělení hladinoměrů

- Mechanické hladinoměry:
  - o Stavoznaky,
  - o Plovákové,
  - o Hladinoměry s vrtulkou,
  - o Ponorná tyč.
- Silové hladinoměry
  - o S ponorným tělesem,
  - o Hydrostatické,
  - o Provzdušňovací.
- Hladinoměry využívající záření
  - o Viditelné,
  - o Elektromagnetické záření (radary),
  - o Radioaktivní.
- Elektrické hladinoměry
  - o S elektrodami,
  - o Kapacitní,
  - o Ultrazvukové.

## 1.2 Mechanické hladinoměry

### Stavoznaky

Využívají fyzikální princip spojených nádob. Stavoznak je průhledná trubice, nejčastěji ze skla, která je pevně spojená s nádrží. Je-li nádrž plná, hladina ve stavoznaku dosahuje poloviny výšky. Využívají se pouze pro vizuální indikaci.

### Plovákové stavoznaky

Využívají fyzikální princip rozdílu hustot měřené kapaliny a plováku. Plovák plave na hladině měřené kapaliny nebo tuhé látky. Jeho poloha je převáděna pomocí převodníků a snímačů polohy na požadovaný výstupní signál.

Je-li hladina v nádrži neklidná, dochází ke kmitání výšky hladiny. Pak se plováky umísťují do plovákové komory. Ty jsou bočně uchyceny jako spojitě nádoby, aby zachytily změny hladiny. V menším objemu, v plovákové komoře, je změna výšky hladiny menší.

V tlakových nádobách, nebo v prostředí s nebezpečím výbuchu je výška plováku vyváděna ven pomocí magnetické spojky. Případně se používá prstencový plovák, který využívá magnetického spojení s vnějším prostorem nádrže.

Zajímavou aplikací jsou plovákové spínače. Kdy při poklesu plováku dojde k sepnutí spínače a např. otevření přívodního ventilu a spuštění čerpadla. Až je hladina kapaliny v definované výšce dojde k rozepnutí plovákového spínače a vypnutí přívodu a čerpadla.

Převedení pohybu plováku na elektrický signál se používají odporové snímače polohy nebo indukční snímače. Principem odporového snímače je pohyb jezdce po odporové dráze a měření odporu. Principem indukčního snímače je zasunování feromagnetického jádra do cívky a měření indukčnosti cívky.

Mechanicko-elektrický převod je další možností, jak převést pohyb plováku na digitální signál pomocí snímače rotace tyče. Plovák je pevně přichycen k tyči pomocí šroubovice. Jak plovák klesá nebo stoupá dochází k rotaci tyče, která je připevněna k rotoru vně nádrže. Poloha rotoru se vyhodnocuje jako výška plováku v nádrži.

Všechny převodové mechanismy a ucpávky působí silou  $F_t$ , která brzdí pohyb plováku. Plovák se dá do pohybu, až hmotnost kapaliny (rozdíl hustot plováku a kapaliny), tedy vztlková síla  $F_a$  překoná třecí sílu  $F_t$ . To je oblast necitlivosti měření plovákem. Daná necitlivost působí také jako filtr. Změna posunutí plováku  $\Delta h_p$  je dána podílem třecí (brzděné) síly  $F_t$  a plochou plováku  $S$ , hustotou kapaliny  $\rho$  a gravitačním zrychlením.

$$\Delta h_p = \frac{F_t}{S \cdot \rho \cdot g} \quad (1.1)$$

### **Hladinoměry s vrtulkou**

Slouží k indikaci nastavené výšky hladiny. Využívají se pro sypké láky nebo vysoce viskózní kapaliny (asfalt). Principem je roztočená vrtulka na hřídeli. Dojde-li k jejímu zasypání nebo zalití, pak dojde k zastavení vrtulky. Tím je indikováno dosažení definované hladiny.

### **Ponorná tyč**

Jedná se o nejstarší a nejrozšířenější typ měření výšky hladiny v zásobnících. Jedná se o nejlevnější měření a nejprimitivnější měření. Principem je vložení suché tyče kolmo ke dnu nádrže. Po vytažení se změří délka zasažené oblasti, která odpovídá výšce hladiny v nádobě. Běžně se tento způsob měření vyskytuje v automobilech, kde měříme hladinu oleje v motorovém prostoru.

### **1.3 Silové hladinoměry**

Principem měření výšky hladiny silových hladinoměrů je působení vztlakové síly proti ponořenému tělesu. Případně se měří hydrostatický tlak v určité výšce pod hladinou.

### **Hladinoměry s ponorným tělesem**

Principem měření je kompenzace vztlakové síly ponořeného tělesa proti pružině. Ponorné těleso má tvar protáhlého válce. Pokud měříme výšku hladiny na rozhraní fáze vzduch – kapalina, pak je těleso částečně ponořeno. Pokud měříme rozhraní dvou vzájemně nemísitelných kapalin, pak je těleso ponořeno úplně.

Jestliže je ponořené těleso v klidu, pak platí rovnováha vztlaková síla je rovna deformační síle pružiny:

$$F_a = F_p \quad (1.2)$$

$$F_p = k \cdot s \quad (1.3)$$

kde  $k$  je tuhost pružiny a  $s$  je délka stlačené pružiny. Změnu délky  $s$  měříme.

### **Hydrostatické hladinoměry**

Hydrostatické hladinoměry, někdy taky pojmenované jako tlakové hladinoměry jsou nejrozšířenějším měřením výšky hladiny v průmyslu. Vynikají jednoduchostí a nízkou cenou. Fyzikálním principem je měření hydrostatického tlaku buď v určitém místě nebo pod hladinou. Sloupec kapaliny vyvíjí tlak, který je úměrný hustotě kapaliny, výšce sloupce kapaliny a tíhovému zrychlení.

$$P = h \cdot \rho \cdot g \quad (1.4)$$

Při změně hladiny (sloupce kapaliny), dojde ke změně tlaku. Pro názornost uvádím vzorec pro rtuťový U manometr.

$$\Delta P = \Delta h(\rho_{rtuti} - \rho_{měřené\ kapaliny}) \cdot g \quad (1.5)$$

Odtud pak pro výšku hladiny

$$\Delta h [m] = \frac{\Delta P}{(\rho_{rtuti} - \rho_{měřené kapaliny}) \cdot g} \quad (1.6)$$

Z uvedeného plyne, že prázdná nádoba nemá rozdílný tlak proti okolí nebo proti definovanému základnímu tlaku.

Dříve se používaly rtuťové manometry. Dnes se lze použít libovolné kapalinové tlakoměry. Pro dálková měření se používají membránové tlakoměry. Deformace membrány je snímána např. kapacitně, tenzometricky nebo elektromagneticky. Výhodou měření hydrostatického tlaku proti stavoznakům a měření pomocí plováku je možnost měření silně znečištěných kapalin, kapalin s pěnou nebo agresivních kapalin.

### **Provzdušňovací hladinoměry**

Někdy se používá název probublávací hladinoměry. Dříve se nazývali pneumatické hladinoměry s trvalým přívodem vzduchu. Principem je opět měření tlaku. Neměří se přímo hydrostatický tlak v nádrži, ale tlak plynu, který je přiváděn potrubím ke dnu nádrže. Pokud je tlak přiváděného plynu roven hydrostatickému tlaku měřené kapaliny, pak dojde k průchodu plynu měřenou kapalinou.

$$\Delta p = \Delta h \cdot \rho_{kapaliny} \cdot g + p_z \quad (1.7)$$

kde  $p_z$  jsou tlakové ztráty potrubí přivádějící inertní plyn.

Vzduch nebo inertní plyn je přiváděn do nádrže. Poklesne-li hydrostatický tlak v nádrži vlivem snížení sloupce kapaliny, poklesne rychlost tlak přívodu inertního plynu. Naopak vzroste-li hydrostatický tlak v nádrži, zvýší se hladina, pak vzroste tlak přiváděného plynu.

Tato měřicí metoda se s výhodou používá v nádobách s přetlakem. Je vhodná pro měření viskózních kapalin nebo kapalin, které tvoří nánosy. Nevýhodou je pak víření hladiny kapaliny i při plné nádrži s čímž se musí počítat při dimenzování nádrže.

## **1.4 Hladinoměry využívající záření**

### **Fotoelektrické hladinoměry**

Pracují na principu odrazu (refrakce) světelných paprsků od hladiny. Na jednu stranu nádrže je umístěn zdroj světla, které dopadá pod lomovým úhlem na hladinu. Světlo se odrazí a dopadne na fototranzistor umístěný v cestě světlu. Nad sebou je umístěno několik fototranzistorů. Každý z nich představuje určitou hladinu. Nejedná se o spojitě měření. Využívá se při práci s taveninami a při vysokých teplotách. Nejčastěji sklářské pece nebo hutní pece.

### **Laserové senzory**

Pracují na principu měření doby letu laserového paprsku. Nebo na principu triangulace.

Obecně je měření pomocí laserového paprsku hladiny kapalin nevhodné. Může docházet k lomu paprsku nebo změně směru od rozvlněné hladiny nebo naopak k adsorpci paprsku. Další překážkou je kouř, prach a znečištění optických prvků. Rozptyl nebo vliv vlnění hladiny lze vyřešit pomocí plováku s reflexní vrstvou.

Naopak výhodou je možnost získání odrazu od látek s nízkou odrazivostí např. uhelný prach, tavenina skla anebo asfalt.

### **Radary (Elektromagnetické záření)**

Radarové měření hladiny pracuje na principu vysílání a příjmu elektromagnetických vln, jejichž existenci předpověděl J. C. Maxwell a experimentálně potvrdil H. Herz. Myšlenku radaru si nechal patentovat v roce 1904 Ch. Huelsmeyer. Zlomovým okamžikem byl vynález magnetronu v roce 1940, který umožnil generovat záření o cm délce. Pokrok v polovodičové technice v 60. letech umožnil vysílat a přijímat signály v pásmu 10 GHz. Kolem roku 1975 se objevují na trhu první komerční radarové hladinoměry.

Nejpoužívanější typy měření využívané pro měření hladiny jsou pulzní radary anebo FMCW radary. Pulzní radary pracují na principu vyslání krátkého EMG pulzu řádu GHz, odmlčí se a čekají na odražený pulz, tzv. ECHO. Změřený čas mezi vyslaným a přijatým pulzem odpovídá vzdálenosti mezi vysílačem – hladinou – přijímací anténou. Přibližný vztah vystihuje slovní výše uvedený popis:

$$L = \frac{c \cdot t}{2} \quad (1.8)$$

kde  $c$  je rychlost EMG pulzu (rychlost světla ve vakuu),  $t$  je změřená doba. Vztah je podělený dvěma, protože dráha je dvojnásobná, tedy vysílač – hladina, odraz od hladiny a zpět – anténa. Měříme vzdálenost mezi vysílačem/anténou a hladinou.

Poznámka k rychlosti EMG světla. Rychlost je dána vlastností prostředím. V prostředí s vyšší permitivitou nebo vyšší permeabilitou je rychlost EMG vlnění nižší podle vztahu. Pro rychlost EMG vlnění (světla) ve vakuu platí vztah:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} \quad (1.9)$$

kde  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$  a  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$  ve vakuu. Odtud pak rychlost EMG pulzu ve vakuu činí  $299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Pokud má prostředí vyšší relativní permitivitu, např. pro vodu platí  $\varepsilon_r = 80$ , pak je daný EMG pulz pomalejší a je třeba s tímto počítat při výpočtu vzdálenosti podle vztahu:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \cdot \varepsilon_r}} \quad (1.10)$$

FM-CW radary pracují na složitějším principu – frekvenční modulace. Vysílač generuje frekvenčně modulovanou spojitou vlnu v rozmezí 9 GHz až 10 GHz. Tvar modulačního průběhu je obvykle pilový. Signál je lineárně přeladován ve výše uvedeném rozmezí. Vyhodnocuje se frekvenční posun právě vysíleného a přijímaného signálu. Pokud je vysílaný a přijímaný signál stejný, je hladina u vysílače a přijímače. Když je rozdíl ve frekvenci mezi právě vysílaným a odraženým signálem, pak rozdíl frekvencí odpovídá vzdálenosti mezi vysílačem a anténou. Vzdálenost odpovídá vztahu:

$$\Delta f = \frac{F}{T} \cdot \Delta t = \frac{F}{T} \cdot \frac{2 \cdot L}{c} \quad (1.11)$$

kde zlomek  $\frac{F}{T}$  je rychlost přeladění o frekvenční zdvih  $F$ ,  $\Delta t$  je doba šíření odraženého vlnění k cíli a zpět a  $L$  je vzdálenost hladiny.

FM-CW radary poskytují přesnější měření. Jsou náročnější na výpočet a vlivem vyhodnocení pomocí FFT jsou náročnější na výpočetní výkon, a tedy i na spotřebu. Celkově je nákladnější.

Budoucnost měření hladiny pomocí EMG záření vede na vyšší frekvence. S vyšší frekvencí je potřeba menší anténa. Podle vztahu mezi frekvencí, vlnovou délkou a rychlostí světa:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.12)$$

kde  $c$  je rychlost světla,  $f$  je frekvence a  $\lambda$  je vlnová délka.

### **Hladinoměry využívající radioaktivní záření**

Fyzikální princip radioizotopových hladinoměrů se opírá o závislost poklesu zářivého toku se vzdáleností a o zákon absorpce zářivého toku skrz bariéru.

Závislost zářivého toku  $\phi$  na vzdálenosti mezi detektorem a zdroje platí pro  $\gamma$  záření:

$$\phi = \phi_0 \left( \frac{L_0}{L} \right)^2 \quad (1.13)$$

kde  $L$  je vzdálenost mezi detektorem a zdrojem  $\gamma$  záření.

Závislost zeslabení zářivého toku absorpcí záření do bariéry o tloušťce  $d$  mezi detektorem a zdrojem záření:

$$\phi = \phi_0 \cdot e^{-\alpha \cdot d} \quad (1.14)$$

kde  $\phi_0$  je zářivý tok odpovídající vzdálenosti  $L_0$ , tj. zářivý tok zdroje záření,  $\alpha$  je součinitel poměrné pohltivosti materiálu;  $d$  je tloušťka materiálu.

Zdroj radioaktivního záření se používá nejčastěji  $\text{Co}^{60}$  nebo  $\text{Cs}^{137}$ . Detektor záření se používá Geiger-Müllerův počítač, scintilační čítač nebo polovodičový snímač záření. Nejčastěji se používá polovodičový snímač, kde se využívá vlivu  $\gamma$  záření na PN přechod.

Zdroj záření se může umístit na plovák uvnitř nádrže a detektor na povrch nádrže. Jak klesá nebo stoupá hladina, tak se mění vzdálenost mezi zdrojem a detektorem. Tím klesá nebo naopak stoupá intenzita měřeného záření dle vztahu (1.13).

Další variantou je umístění zdroje záření pod nádrž. Jak se nádrž zaplňuje, tak se zvyšuje tloušťka bariéry mezi zdrojem a detektorem. Tím opět klesá nebo naopak stoupá intenzita měřeného záření (1.14).

Výhodou daného zařízení je, že nemusí být umístěno uvnitř nádrže. Platí to jak pro zdroj, tak i pro detektor. Mohou se jimi měřit plyny, kapaliny tak i sypké látky. Určitou nevýhodou je bezpečnost a manipulace se zdrojem záření, jeho skladování a ekologická likvidace.

## 1.5 Elektrické hladinoměry

### Hladinoměry s elektrodami

Princip spočívá ve spojení elektrického obvodu vodivou kapalinou v místě dotyku kapaliny a elektrody. Konstrukčně se jedná o jednoduchá zařízení, lze je používat v přetlakových nádržích. Nevýhodou je podmínka vodivosti měřeného media (kapalina, sypká látka). Nejčastěji se používají pro signalizaci stavu nádrže – min, max a několik hodnot uprostřed. Vyšší hustota elektrod umožňuje jemnější signalizaci.

### Kapacitní hladinoměry

Fyzikálním principem měření je kapacity kondenzátoru, do kterého zasunujeme nebo z kterého vytahujeme dielektrikum. Měřené medium tvoří dielektrikum mezi elektrodami kondenzátoru. Vnitřní elektroda umístěna ve válci a vozená do středu nádrže. Vnější elektroda může být použita i samotná kovová nádrž. Pokud měříme elektricky vodivé medium, je nutné izolovat vnitřní elektrodu. Pro modelový případ kovové nádrže válcového tvaru, jejíž plášť využíváme jako vnější elektrodu platí vztahy:

$$C = C_0 + C_1 + C_2 \quad (1.15)$$

$$C_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r1}}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot (H - h) \quad (1.16)$$

$$C_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r2}}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot h \quad (1.17)$$

kde  $C_0$  je kapacita kovové nádrže,  $C_1$  je kapacita nad hladinou (většinou vzduch) a  $C_2$  je kapacita zaplněné části měřeným mediem.  $H$  je výška celé nádrže,  $h$  je výška zaplavené části (tedy měřená výška hladiny),  $d_1$  je průměr vnitřní elektrody,  $d_2$  je průměr válcové nádrže,  $\epsilon_0$  je permitivita vakua,  $\epsilon_{r1}$  je relativní permitivita media nad hladinou (vzduchu),  $\epsilon_{r2}$  je relativní permitivita měřeného media.



Je-li relativní permitivita vzduchu a měřeného media konstantní, pak lze výsledný vzorec zjednodušit na:

$$C = k_1 + k_2 \cdot h \quad (1.18)$$

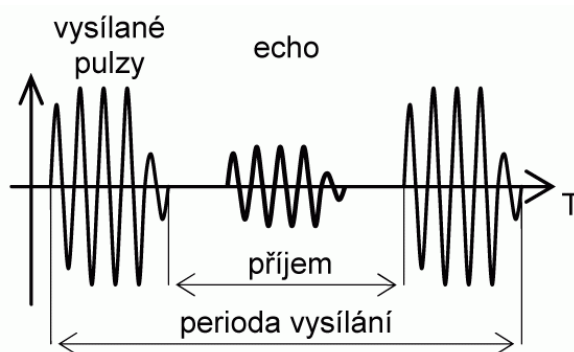
a odtud

$$h = \frac{C - k_1}{k_2} \quad (1.19)$$

Kapacita se měří pomocí střídavých můstků.

### **Ultrazvukové hladinoměry**

Ultrazvukové hladinoměry pracují na principu vyslání a příjmu ultrazvukové vlny. Měří se doba od vyslání vlny po její zachycení v detektoru. Při známé rychlosti zvuku a změřeném čase lze vypočítat vzdálenost mezi vysílačem, hladinou a přijímačem. Na obr. 1-1 je zobrazen průběh vysílání a příjmu. Vysílaný pulz se označuje jako trigger. A přijatý odražený pulz se označuje jako echo.



Obr. 1-1: Princip fungování vysílání a příjmu zvukové vlny [11]

Podstatou zvuku a ultrazvuku je vlnění, při kterém dochází ke stlačování a rozpínání zvuku. Oproti EMG záření jde o podélné vlnění. V principu pracují podobně jako pulzní radar. Klíčovaný impuls o frekvenci cca 1 ms ultrazvukové vlny o frekvenci několik desítek kHz je vyslán převodníkem. Čidlo čeká na vrácené echo. Vzdálenost je určena z doby návratu podle:

$$L = c \cdot \frac{t}{2} \quad (1.20)$$

kde L je měřená vzdálenost, c je rychlost zvuku a t je čas od vyslání po příjem signálu.

### **Fyzikální popis šíření zvukové vlny<sup>[10]</sup>**

Zvuková vlna se šíří různou rychlostí. Závislost je dána typem prostředí, teplotou a tlakem. Slyšitelné zvuky se šíří rychlostí určenou Laplaceovým vzorcem:

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} \quad (1.21)$$

ze kterého plyne, že rychlost slyšitelných zvuků v plynu (i vícemolekulovém) a kapalině je nezávislá na frekvenci a intenzitě. Proto i zdálky lze slyšet současně vznikat a zanikat akordy. A nikoliv jejich jednotlivé tóny po sobě.

Z rovnice ideálního lze určit jeho poměr tlaku ku hustotě.

$$\frac{p}{\rho} = \frac{p_0}{\rho_0} \cdot \frac{T}{T_0} = \frac{p_0}{\rho_0} \cdot (1 + \gamma \cdot t) \quad (1.22)$$

kde  $p_0$  je zvolený základní tlak plynu při  $0^\circ\text{C}$  a  $\rho_0$  je příslušná hustota plynu. Součinitel teplotní rozpínivosti a roztažnosti má hodnotu  $\gamma \approx \frac{1}{273}^\circ\text{C}^{-1}$ . To platí pro všechny plyny, které se svými vlastnostmi podobají ideálnímu plynu. Pro rychlost zvuku lze úpravami získat vzorec (1.23).

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p_0}{\rho_0} \cdot (1 + \gamma \cdot t)} \quad (1.23)$$

Z uvedeného vzorce (1.23) plyne, že rychlost zvuku je závislá na teplotě. Uvedený vzorec bude modifikován pro normální podmínky a suchý vzduch. Pro normální podmínky, tedy  $p_0 = 131325,15 \text{ Pa}$ , suchý vzduch  $\gamma = 0,001293 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a  $\kappa = 1,405$  platí při  $0^\circ\text{C}$  vtaž:

$$c = c_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{2}\gamma t\right) = 331,82 \cdot (1 + 0,00183 \cdot t) \quad (1.24)$$

kde  $c_0 = 331,82 \text{ ms}^{-1}$  je rychlost zvuku v suchém vzduchu za normálních podmínek. Pak po úpravě

$$c = (331,82 + 0,61 \cdot t) \text{ ms}^{-1}. \quad (1.25)$$

Reálný vzduch v přírodě obsahuje vzdušnou vlhkost. Rychlost šíření zvukových vln ve vlhkém vzduchu je vyšší, protože hustota vlhkého vzduchu je za stejných podmínek je menší než hustota suchého vzduchu za stejných podmínek. Vodní páry ve vzduchu zmenší Poissonovu konstantu  $\kappa$ , protože vodní pára je tříatomová molekula ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Po dosazení tabulkových hodnot a dostaneme vyjádření poměrů v následující vztahu, kde  $c$  je rychlost zvuku v suchém vzduchu,  $c'$  je rychlost zvuku ve vlhkém vzduchu,  $\kappa$  je Poissonova konstanta pro suchý vzduch,  $\kappa'$  je Poissonova konstanta pro vlhký vzduch,  $\rho$  je hustota suchého vzduchu a  $\sigma$  je hustota vlhkého vzduchu. Dosazené tabelované hodnoty<sup>1</sup> jsou pro teplotu  $t = 20^\circ\text{C}$  a pro relativní vlhkost vzduchu 50 %. Pro poměr relativních vlhkostí platí vztah (1.26)

$$\frac{\rho}{\sigma} = 1,004 \quad (1.26)$$

a pro poměr Poissonových konstant, platí vztah (1.27)

$$\frac{\kappa'}{\kappa} = \frac{1,402}{1,405} = \frac{1}{1,002} \quad (1.27)$$

<sup>1</sup> Tabelované hodnoty jsou z [10] tabulka 4.4 hlava VII.

a po dosazení a úpravě získáme vztah vyjadřující poměr rychlosti mezi suchým a vlhkým vzduchem při relativní vlhkosti 50 % a normální teplotě.

$$\frac{c'}{c} \cdot \sqrt{\frac{\kappa'}{\kappa} \cdot \frac{\rho}{\sigma}} = 1,001 \quad (1.28)$$

Ze vztahu (1.26) vyplývá, že vliv vlhkosti vzduchu na celkovou rychlost je malý, tedy přibližně 1 ‰. Výpočtem lze ukázat, že rychlost zvuku při 100 % relativní vlhkosti stoupne o 2 ‰. Výpočet koresponduje s praktickým měřením. Dosazením korekčních hodnot pro vlhký vzduch do rovnice (1.24) pro  $t = 20^\circ\text{C}$  a pro relativní vlhkost vzduchu 50 % dostaneme následující vztah pro výpočet rychlosti zvukové vlny:

$$c' = 1,001 \cdot c_{20^\circ\text{C}} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (t - 20) \right] \quad (1.29)$$

a po vyčíslení konstant dostaneme

$$c' = [344,36 + 0,63 \cdot (t - 20)] \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1.30)$$

### **Intenzita zvuku a výkon**

Je-li zdroj zvuku v klidném prostředí (např. vzduch), šíří se zvuk ve vlnoplochách, které mají přibližný tvar soustředných koule. Proto se zvuk přibližně zeslabuje úměrně se čtvercem vzdálenosti od zdroje zvuku.

V uzavřeném prostředí může být rozdělení intenzity zvuku různé. Důvodem jsou stěny, kde může docházet k odrazům nebo naopak k absorpci zvukových vln. Odraz nastává na překážkách větších, než jsou rozměry vlny. Naopak na menších překážkách dojde k ohybu zvukové vlny.

Intenzita zvuku klesá s druhou mocninou vzdálenosti. Dále je ovlivňován atmosférickým útlumem. Modelově mějme zdroj zvuku, který vysílá stejně do všech stran, tedy opisuje tvar koule, pak platí:

$$I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (1.31)$$

kde  $I$  je intenzita zvuku [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $P$  je akustický výkon [ $\text{W}$ ] a  $R$  je vzdálenost od zdroje, pokud zdroj vysílá do všech stran stejně. Tento fakt je kompenzován v přijímači, kdy dochází k proměnlivému zesílení odraženého signálu.

Z výše uvedeného popisu fyzikálních vlivů na rychlost zvukové vlny je nejvíce dominantním parametrem teplota vzduchu. Teplotu je potřeba měřit a kompenzovat její vliv vnitřním termistorem. K chybě měření může docházet špatným umístěním termistoru (např. zahřátí čidla slunečními paprsky). Proto jsou ultrazvuková čidla doplňována externím teploměrem.

Jiné řešení kompenzace všech vlivů na rychlost zvukové vlny spočívá v umístění referenčního bodu uvnitř nádrže ve známé vzdálenosti. Ultrazvukový senzor se zkalibruje na tuto vzdálenost a provede potřebné korekce ve výpočtu.

### **Ultrazvukový převodník (zdroj zvukové vlny)**

Nejčastěji se používají piezoelektrické převodníky a elektrostatické. Pro jiné účely, než je měření vzdálenosti se používají magnetostrikční převodníky.

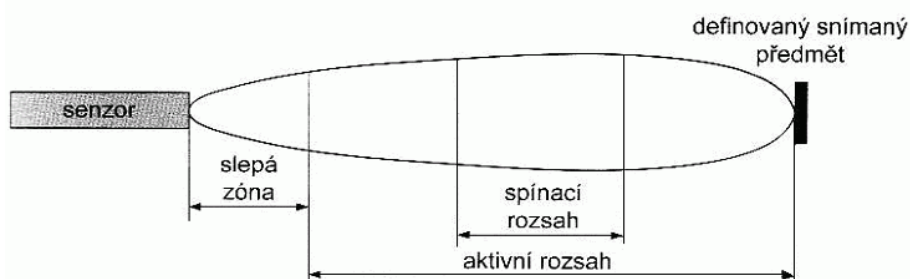
Elektrostatické převodníky vytvářejí zvukovou vlnu pomocí pružné membrány z pokoveného plastu. Ta funguje jako pohyblivá elektroda, která je rozkmitávána od pevné elektrody uvnitř převodníku.

Piezoelektrické převodníky využívají piezoelektrického jevu. Je-li krystal vystaven mechanickému tlaku, pak generuje elektrické napětí. Opačný jev, kdy je krystal vystaven změnám elektrického napětí, na které reaguje deformací se nazývá nepřímý piezoelektrický jev. Pro příjem zvukové vlny se využívá piezoelektrický jev a pro vyslání zvukové vlny se využívá nepřímý piezoelektrický jev. Převodník je ve tvaru disku a je buzen elektrickým napětím o amplitudě 200 V až 400 V. K buzení se využívá rezonanční obvod.

Pro správné měření je důležité optimální působení zvukových vln. K tomu jsou stanoveny parametry směrovost a vyřazovací charakteristika. Úhel hlavního vyřazovacího laloku je nepřímo úměrný průměru převodníku a frekvenci. Rozměrnější převodník nebo vyšší frekvence vytvoří užší paprsek. Příjímá charakteristika je shodná s vyřazovací. Příklad vyřazovacího laloku je na obr. 1-2.

Úhel dopadu nesmí být příliš velký, jinak hrozí odraz zvukových vln mimo přijímač. Tento úhel je většinou definován výrobcem.

Rušení ultrazvuku může být způsobeno dalšími zdroji ultrazvukových vln např. vodní trysky nebo vzduchové trysky. Dalším významným zdrojem rušení je vzájemné rušení ultrazvukových vysílačů. Je potřeba zajistit, aby současně nevysílali dva a více vysílačů najednou. To se realizuje pomocí synchronizace.



Obr. 1-2: Definice základních dosahů ultrazvukového senzoru [11]

Poslední omezením je práce nemožnost práce ve vakuu. Také prach a páry způsobují útlum zvukových vln, proto je nutné jejich přítomnost kompenzovat silnějším zdrojem.

### ***Umístění ultrazvukových čidel***

Při umístění senzoru by měla být dodržena následující pravidla:

- zvuková vlna nesmí zasahovat do vestavěných překážek (příčky, ostatní čidla, žebříky...),
- do pracovního pole senzoru nesmí zasahovat přítok měřeného média,
- není vhodné umístit senzor doprostřed symetrické nádoby. Může docházet k mnohonásobným odrazům od stěn. Senzor se umísťuje mimo střed nádoby,
- senzory jsou doplněny systémy pro potlačení ozvěny (adaptivní filtrace, fuzzy metody, průměrování výsledků),
- mapa prázdné nádoby je používána pro potlačení falešných odrazů.

Nejčastěji jsou čidla zavěšena na stropě nádoby, odkud vysílají vlny kolmo dolů k hladině. Vyhodnocuje se doba od vyslání pulzu po jeho příjem. Méně častější je vysílání ode dna nádoby k hladině a vyhodnocení odrazu od hladiny zpět ke dnu.

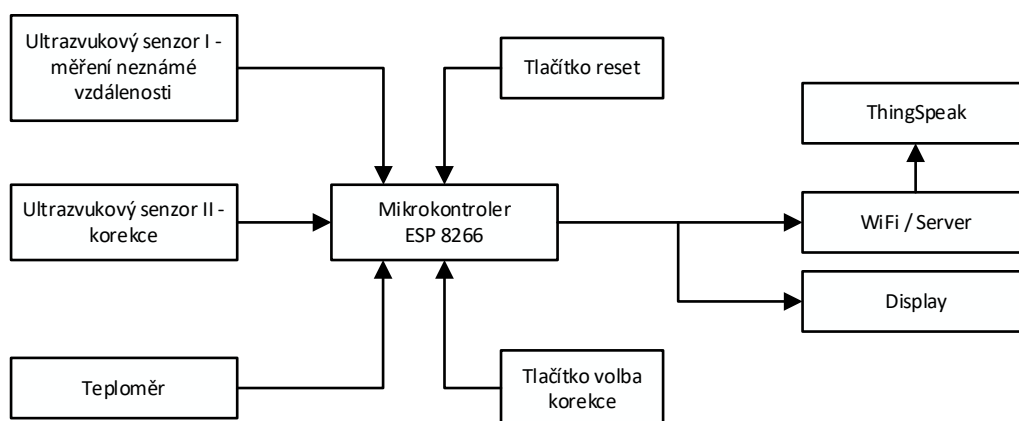
Ultrazvukové hladinoměry lze používat pro měření kapalin i sypkých látek. Výhodou je, že nemusí být instalovány do nádrže. Přijímač a vysílač může být mimo nádrž.

## 2 Praktická část

Základní konstrukce zařízení se odvíjí od vlivu teploty a vlhkosti vzduchu na rychlost šíření zvukové vlny. Z fyzikálního popisu akustiky vyplynuly dvě možná základní řešení. Buď budeme měřit jednu pomocnou veličinu (teplotu) a pomocí korekčního vzorce budeme dopočítávat rychlost zvukové vlny. Nebo budeme korigovat měřenou neznámou vzdálenost, měřením známé vzdálenosti druhým ultrazvukovým čidlem. Stávající zařízení kombinuje oba přístupy do jednoho funkčního celku.

### 2.1 Základní ideové schéma přístroje

Celý přístroj obsahuje dvě měřicí ultrazvuková čidla a teplotní čidlo pro korekci rychlosti zvukové vlny. Přístroj bude komunikovat přes WiFi modul s domácí WiFi sítí. Data posílá do databáze ThingSpeak. Přístroj obsahuje display, který zobrazuje technické údaje a naměřenou vzdálenost. Pro řízení obsahuje přístroj dvě tlačítka. První spouští přístroj z módu deep sleep a druhé volí typ kalibrace. Na obr. 2-1 je blokové schéma celého přístroje. Výpočet vzdálenosti bude volitelně korigován buď vzorcem pro rychlost vlny jako funkci teploty pro 50 % relativní vlhkost nebo pomocí druhého ultrazvukového senzoru. Ultrazvukový senzor II bude měřit předem známou vzdálenost. Naměřená vzdálenost bude porovnána s předem známou a bude takto dopočtena skutečná rychlost zvuku. Ta bude použita pro výpočet neznámé – měřené vzdálenosti hladiny ultrazvukovým senzorem I.



Obr. 2-1: Blokové schéma přístroje pro měření výšky hladiny

### 2.2 Výběr senzorů

Čidlo bude snímat hladinu dešťové vody v uzavřené betonové nádrži. Tato nádrž je již postavena a je vyhloubena pod budovou. Není tedy možné provést dodatečné průrazy pro zabudování stavoznaku nebo a manometrů. U důvodu složité manipulace a skladování radioaktivních látek odpadly senzory na bázi snímání radioaktivního gama záření. Dalším požadavkem je cena. Tím je vyloučeno použití radarového snímače hladiny.

Pro kontinuální měření bez nutnosti zásahu do stavby zbývá ultrazvukový a laserový senzor. Laserový senzor potřebuje plovák s reflexní vrstvou, která není bezúdržbová.

Proto bylo rozhodnuto použít ultrazvukový senzor pro kontinuální snímání hladiny vody v nádrži. Senzor je konstrukčně malý, není energeticky náročný, není potřeba stavebních úprav a nepotřebuje přídatná zařízení, je provozně bezpečný a jeho provozování a likvidace je ekologická.

### **Výběr ultrazvukového senzoru**

Cílem je vybrat optimální řešení z pohledu ceny a požadované přesnosti měření. Cena by měla být co nejnižší, přesnost stačí v řádu centimetrů. Důležité ještě bude vytvořit takový obal, který bude mít krytí IP 65.

K testování jsou zatím vybrána tato čidla:

- modul ultrazvukového měřiče vzdálenosti HY-SFR05,
- ultrasonic Module JSN-SR04T Water Proof,
- MB1040 LV-MaxSonar-EZ4.

Tabulka porovnání parametrů senzorů ultrazvukových měřidel vzdálenosti 2-1

	<b>HY-SFR05</b>	<b>JSN-SR04T</b>	<b>MB1040 LV</b>
<b>Pracovní napětí</b>	5 V	3 – 5,5 V	2,5 – 5,5 V
<b>Rozsah měření</b>	2 cm – 450 cm	20 cm – 600 cm	15 cm - 645 cm
<b>Rozlišení</b>	0,2 cm	1 mm	2,5 cm
<b>Vstupní signál</b>	10 $\mu$ s TTL impuls	1,10 $\mu$ S TTL impuls	20 $\mu$ s TTL impulse
<b>Výstupní signál</b>	TTL PWL impuls	TTL impuls	Serial, Analog, PWM
<b>Cena<sup>2</sup></b>	50 Kč	451 Kč	760 Kč



Obr. 2-2: Čidlo HY-SFR05    Obr. 2-3: Čidlo JSN-SR04T    Obr. 2-4: Čidlo MB1040 LV

Byl vybrán modul JSN-SR04T. Modul má integrované zpracování signálu a vysílá impuls v logice TTL (5V). V rámci adaptace senzoru je převod na standardní CMOS napětí 3,3V. A to

<sup>2</sup> Ceny jsou k 5.11.2019 (Arduino shop, GME, TME)

pro vstup i výstup. Součástí senzoru je kabel s ultrazvukovým vysílačem a přijímačem ve vhodném krytí pro venkovní použití IP65.

### Výběr pomocného teplotního senzoru

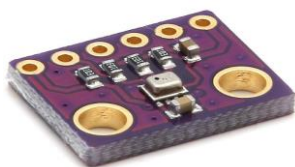
Dle výše uvedené teoretické části má teplota vzduchu značný vliv na rychlost šíření zvukových vln. Proto je nutné provést teplotní korekci. K měření bude vhodné čidlo teploty ve venkovním provedení. Opět se bude jednat o kompromis mezi cenou, přesností a rychlostí odezvy.

K testování jsou zatím vybrána tato čidla:

- modul meteočidla s čipem BMP 280,
- LM35DZ TO92 TEXAS INSTRUMENTS,
- PT100 teplotní senzor.

Tabulka porovnání parametrů senzorů teploty 2-2

	<b>Modul BMP 280</b>	<b>LM35DZ</b>	<b>PT100</b>
<b>Pracovní napětí</b>	1,2 - 3,3 V	4 – 30 V	0,2 V
<b>Rozsah měření</b>	- 40 – 80 °C	0 – 100 °C	20 °C – 450 °C
<b>Přesnost</b>	± 0,01 °C	1,5 °C	± 0,3 °C <sup>3</sup>
<b>Výstupní signál</b>	Digitální I2C nebo SPI	Analogový	Analogový
<b>Cena<sup>4</sup></b>	62 Kč	52 Kč	50 Kč



Obr. 2-5: Modul BMP 280

Obr. 2-6: Čidlo LM35DZ

Obr. 2-7: Čidlo PT100

Nakonec by vybrán modul BMP 280. Největší výhodou je komunikace po sběrnici. Tím lze ušetřit čas na vývoj sw pro zpracování analogového signálu. Modul komunikuje po sběrnici I2C stejně jako komunikuje display.

<sup>3</sup> Pro třídu B

<sup>4</sup> Ceny jsou k 5.11.2019 (Arduino shop, GME, TME)



## 2.3 Výběr zobrazovací jednotky

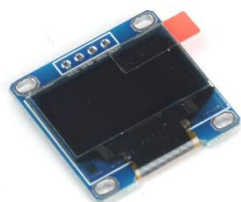
Požadavky na zobrazovací jednotku jsou komunikace po I2C a čitelný display. Opět se bude jednat o kompromis mezi cenou a technologickými parametry.

K testování byly vybrány tyto display:

- IIC I2C OLED display 1,3" 128x64 Bílý
- Arduino display modrý 16x2 znaků
- IIC I2C Displej OLED 0.91" 128x32 Modrý 3,3 V 5 V Pro IOT Arduino Raspberry

Tabulka porovnání parametrů display 2-3

	OLED display 1,3"	LCD Module 1602A-1 (V1.2)	Displej OLED 0.91"
<b>Pracovní napětí</b>	3,3 V – 5 V	4,7 V – 5,5 V	3 V – 5 V
<b>Pracovní proud</b>	24,2 mA	1,1 mA	24,2 mA
<b>Rozlišení</b>	128x64 bodů	16 znaků na 2 řádky	128x32 bodů
<b>Připojení</b>	I2C nebo SPI	I2C	I2C
<b>Cena<sup>5</sup></b>	165 Kč	118 Kč	148 Kč



Obr. 2-8: OLED display 1,3"

Obr. 2-9: Display modrý  
16x2 znaků

Obr. 2-10: Displej OLED  
0.91"

Nakonec byl vybrán OLED display 1,3". Jeho display je největší a umožňuje tvorbu grafického rozhraní. LCD displej má sice menší spotřebu, ale komunikuje na napětí 5 V, což by si vyžádalo napěťové přizpůsobení. Spotřeba OLED 1,3" a 0,91" není tak velká, proto s výhodou využívám většího OLED displeje. Ani cena není tak rozdílná. Čas na vývoj SW urychlují knihovny Adafruit.

## 2.4 Výběr vyhodnocovací jednotky

Vyhodnocovací jednotka musí zvládnout vypočítat požadovanou vzdálenost a vysílat online data dle standardu Wi-Fi. Zároveň je požadovaná co největší výdrž, tedy nízký příkon.

<sup>5</sup> Ceny jsou k 5.11.2019 (Arduino shop, GME, TME)

Jako testovací platformy, které se hodí pro rychlý vývoj byly zvoleny chipy rodiny ATMEL ATMEGA328-PU a Espressif ESP 8266EX.

Srovnávaly se parametry výpočetní výkon, spotřeba, integrované periferie v základním provedení a cena.

Tabulka porovnání parametrů mikrokontrolerů 2-4

	<b>ATMEGA328-PU</b>	<b>ESP 8266EX</b>
<b>Operating Voltage</b>	1.8–5.5 V	3.0~3.6 V
<b>Operating Current</b>	0.2 mA (at 1 MHz)	80 mA
<b>Integrované Wi-Fi</b>	Ne	Ano
<b>CPU clock speed</b>	20 MHz	80 MHz – 160 MHz
<b>Šířka sběrnice</b>	8 bit	32 bit
<b>RAM</b>	2 KB	50 KB
<b>Flash</b>	32 kB	16 MB
<b>Cena (velkoobchod TME)<sup>6</sup></b>	44 Kč	51 Kč

Volba padla na chip rodiny ARM ESP 8266EX, který je na obr. 2-12. Jedná se o architekturu RISC. Chip se vyznačuje nižší spotřebou a vyšším výkonem oproti mikrokontrolerům ATmega328PU na obr. 2-11. Chip ESP 8266EX má v sobě integrovanou Wi-Fi.



Obr. 2-11: Atmel ATmega328-PU 28 PIN  
DIP



Obr. 2-12: ESP8266EX

### **Chip ESP8266EX**

Jedná se o vysoce integrovaný procesor SoC s WiFi vysílačem a přijímačem. WiFi podporuje protokoly 802.11 b/g/n. Jádro chipu se je Tensilica L106 32-bit RISC. Architekturu se jedná o low power, což je jeden z hlavních důvodů, proč byl vybrán. Velikost vnitřní paměti je 50 kB. Pro programy využívá externí flash paměť až 16 MB.

Základní frekvence daná vnitřním krystalem je v rozmezí 24 MHz až 52 MHz. Chip podporuje externí hodiny.

Základní výkonové módy chipu jsou [12]:

<sup>6</sup> Ceny jsou s DPH ze dne 04.11.2019

- aktivní mód, kde chip může přijímat, vysílat a poslouchat. Podle vysílacího módu má chip spotřebu od 56 mA až po 170 mA.
- Modem sleep mód, funguje samotný procesor, PWM, I2S a WiFi modem je vypnutý. V tomto režimu má chip spotřebu 15 mA.
- Light sleep mód, kde dojde k částečnému usnutí. Probuzení trvá 3 ms. V tomto režimu je spotřeba procesoru 0,9 mA.
- Deep-sleep mód, kde dojde k úplnému spánku. Chip se probouzí každých 300 s. Probuzení trvá od 0,3 s po 1 s. Zde je spotřeba 20  $\mu$ A.

Chip obsahuje výstup na externí anténu, PWM, analogový převodník, komunikační interface I2C, UART, IR dálkové ovládání, sériovou linku.

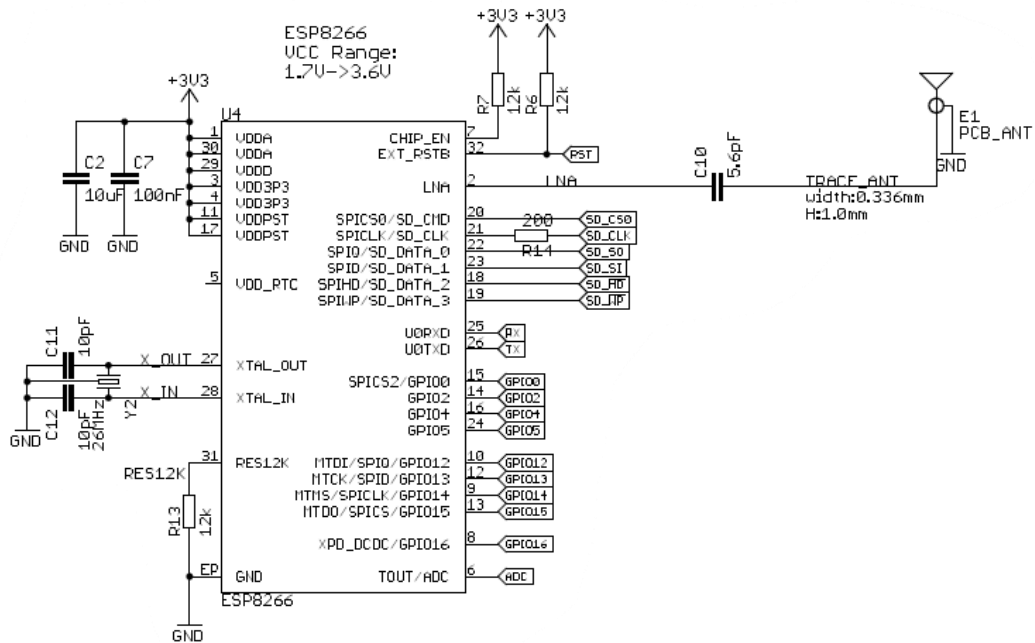
Vlastnosti toho chipu jako vysoký výpočetní výkon, nízká spotřeba (volbou pracovního módu), integrovaná WiFi a pull up/down rezistory rozhodli o volbě tohoto chipu proti jednoduššímu Atmel ATmega328-PU 28 PIN DIP.

### ***Testovací základní deska***

Jako testovací platforma byla vybrána deska Weemos NodeMcu LUA D1 mini WIFI ESP-12F modul s ESP 8266EX [5]. Zobrazena je na obr. 2-13. Deska obsahuje převodník UART – USB, resetovací tlačítko, spínatelnou diodu se zápornou logikou a sadu svorkovnic. Schéma zapojení jednotlivých vstupně/výstupních PINů je na obr. 2-14.



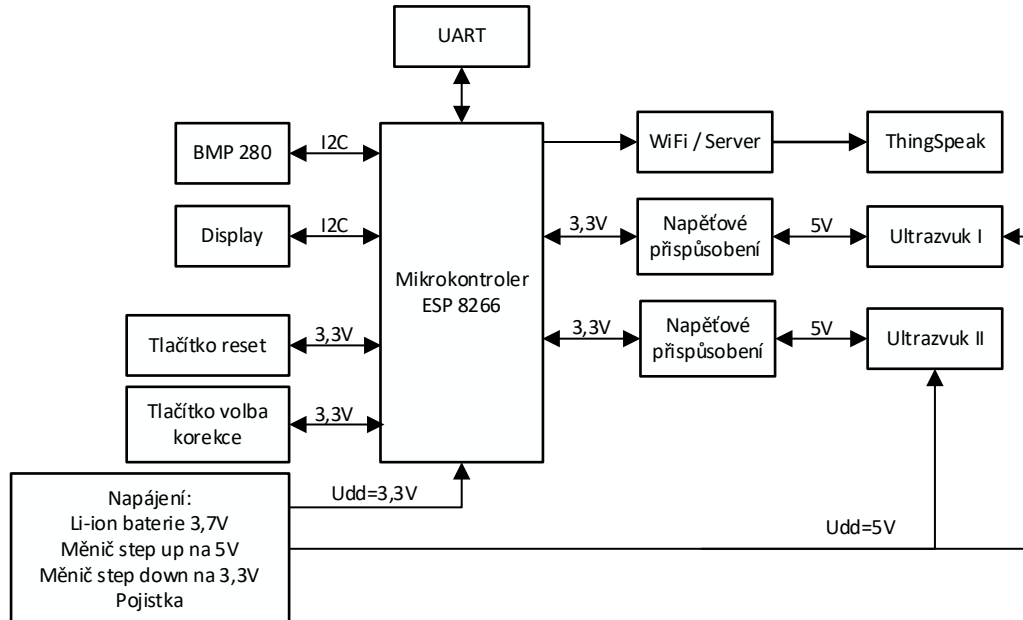
Obr. 2-13: Deska Weemos LUA D1 mini s procesorem ESP 8266



Obr. 2-14: Zapojení desky Weemos LUA D1 mini ESP 8266 [6]

## 2.5 Zapojení a princip funkce čidla měření hladiny

Základní schéma vnitřního zapojení čidla pro měření hladiny je Obr. 2-15.

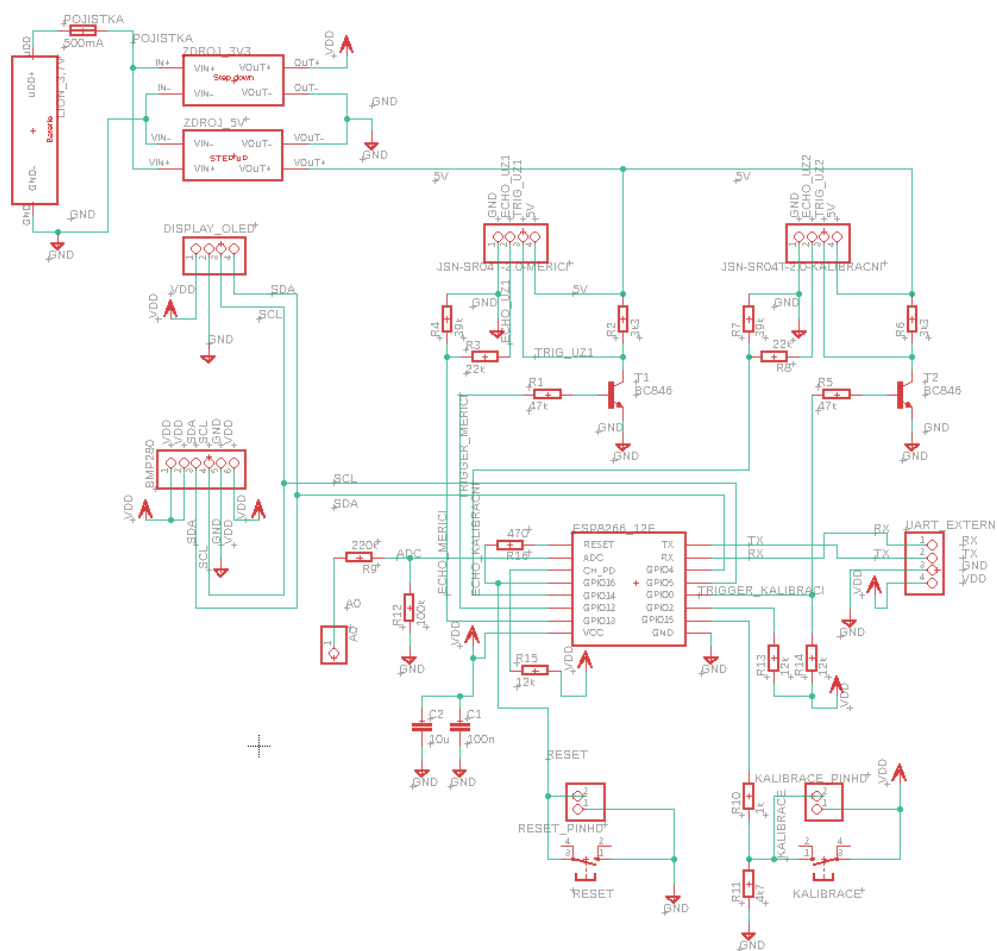


Obr. 2-15: Blokové zapojení jednotlivých modulů

Čip ESP8266 EX je založen na CMOS technologii 3,3 V. Pro komunikaci s displejem a meteočidlem BMP 280 využívá sběrnici I2C s napájením 3,3 V. Tlačítka taktéž pracují na

napětí 3,3 V. Obě ultrazvuková čidla pracují na napětí 5 V. Proto zařízení obsahuje napěťové přizpůsobení. Nižší napětí 3,3 V z 5 V je realizováno napěťovým děličem. Jedná se o část ve směru komunikace Ultrazvukový modul -> ESP8266. Vyšší napětí 5 V ze vstupního signálu 3,3 V je realizováno tranzistorem v zapojení jako spínač. Jedná se o směr komunikace ESP8266 -> Ultrazvukový modul.

Základním principem měření vzdálenosti ultrazvukovým senzorem je měření času potřebného k uražení měřené vzdálenosti zvukovou vlnou. Nejprve se vyšle vlna a začne se počítat čas, dokud se nezachytí zpět odražená vlna od hladiny vody. Čas se musí podělit dvěma protože, se jedná o vzdálenost od zdroje k překážce a od překážky k senzoru. Vyslaná vlna se spouští pinem trigger změnou logické 0 a na logickou 1. Po vyslání signálu začne odpočítávat časovač do doby, než přijde impuls z modulu ultrazvuku na pin Echo. Pro doplnění je nutné zmínit přítomnost tranzistorů T1 a T2, které zvyšují napěťovou úroveň z 3,3 V na 5 V, ale invertují výstup. Tomu se musí přizpůsobit program, kdy na pinu trigger se musí vytvořit sekvence 1-0-1, aby se vytvořil spouštěcí impuls 0-1-0. Obvodové schéma je na obr. 2-16.



Obr. 2-16: Obvodové schéma zapojení

### **Dimenzování součástek pro správný chod čidla**

Základem výpočtu součástek je proud, který proteče jednotlivými prvky obvodu. ESP8266EX je struktura CMOS pracující na napětí 3,3 V. Senzor JSN-SR04T je struktura TTL pracující na napětí 5 V. Daná napětí lze vypočítat pro různé proudy. Protože se jedná o CMOS, musí být proudy v řádu jednotek mA.

### **Výpočet napěťového přizpůsobení 3,3 V na 5 V pomocí tranzistoru**

Jsme ve struktuře CMOS, proto proudy mají být malé [8]. Proto byl vybrán tranzistor BC846B, jehož pracovní bod je okolo 2 mA. Z datasheetu vyčteme tyto parametry:

$$h_{21E} = \beta = 200 \approx 450$$

$$I_{c \max} = 100 \text{ mA}$$

Odpor  $R_b$  byl zvolen tak, aby se tranzistor otevřel. Výpočet provedeme pro zapojení tranzistoru jako spínače [9].

1. Smyčka – výpočet  $I_b$  a  $I_c \max$  (kdyby nebyl proud  $I_c$  omezen větším  $R_c$ )

$$R_b \cdot I_b + U_{BE} = U_{D \text{ pin } 6} \quad (2.1)$$

A z toho vyjádřím  $I_b$

$$I_b = \frac{U_{D \text{ pin } 6} - U_{BE}}{R_b} = \frac{3,3 - 0,7}{47 \cdot 10^3} = 55 \mu A \quad (2.2)$$

Pro kolektorový proud platí:

$$I_{c \max} = \beta \cdot I_b = 200 \cdot 55 \cdot 10^{-6} = 11,06 \text{ mA} \quad (2.3)$$

2. Smyčka – výpočet skutečného maximálního  $I_c$

$$U_{cc} = R_c \cdot I_c + U_{CE} \quad (2.4)$$

Napětí  $U_{CE}$  je malé a ve výpočtu nezahraje významnou roli, a proto je zanedbáno.

$$I_c = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_c} = \frac{5}{3300} = 1,5 \text{ mA} \quad (2.5)$$

Tranzistor je zapojen se společným emitorem. To znamená, že výsledná fáze napětí je otočená o  $180^\circ$  proti vstupnímu napětí. K tomu je přihlédnuto při tvorbě startovacího pulzu v programu.

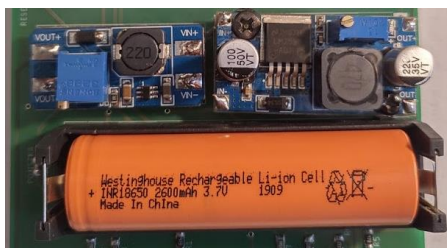
### **Výpočet děliče napětí: přizpůsobení z 5 V – 3,3 V**

Zde se musí navrhnout takový dělič, aby poměr odporů nejen provedl dělení napětí, ale také i zajistil co nejmenší proud do CMOS struktury. Proto byly zvoleny velké odpory.

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 5 \cdot \frac{39 \cdot 10^3}{(22 + 39) \cdot 10^3} = 3,19 \text{ V} \quad (2.6)$$

### Popis napájecí části

Na obr. 2-17 je detail napájení, které se skládá z baterie Li-ion 2600 mAh, modulů Step-up a Step-down a pojistky.



Obr. 2-17: Detail DPS napájecí části čidla hladiny

Tabulka spotřeby jednotlivých modulů daných výrobcí 2-5

Část zařízení	proud [mA]
Display	24,2 mA
ESP8266 v režimu WiFi	170 mA
JSN-SR04T (UZ I)	8 mA
JSN-SR04T (UZ II)	8 mA
BMP 280	0,012 mA
<b>Celkem</b>	<b>210,2 mA</b>

### Pojistka

Celková spotřeba je 210 mA. Pojistku jsem dimenzoval na 1 A vzhledem k přítomnosti velkých cívek v budičích. Při počátečním spuštění, kdy se začnou tyto cívky nabíjet, poteče obvodem velký proud.

### Dimenzování baterie

Činnost čidla hladiny bude cyklická 20 s za 1 hod. V tomto čase se provede měření a data se odešlou do databáze ThinkSpeak.

Požadovaný teoretický příkon bude

$$P = I \cdot t = 210 \text{ mA} \cdot 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ h} = 1,155 \text{ mAh} \quad (2.7)$$

Požadavek na baterii byl co nejdelší doba provozu. Limitem jsou rozměry obalu čidla a také typ baterie. Pro své vhodné vlastnosti (cena a akumulace náboje) byla vybrána baterie Li-ion 2600 mAh. Z hlediska rozměrů obalu byla vybrána pouze jedna baterie. Ta je umístěna v pouzdře, které umožňuje její výměnu.

Přepokládaný čas provozu čidla hladiny na jedno nabití z teoretických hodnot je

$$t = \frac{P_{\text{baterie}}}{P_{\text{zařízení}}} = \frac{2600 \text{ mAh}}{1,155 \text{ mAh}} = 2251 \text{ hod} \cong 94 \text{ dní} \quad (2.8)$$

## Měření reálné spotřeby

Měření reálné spotřeby ukázalo, že hodnota odebírané spotřeby bude  $P_{změřená} = 1,19 \text{ mA}$ . Reálná výdrž na baterii bude tedy nižší oproti projektované.

$$P_{změřený} = I_{změřený} \cdot t = 210 \text{ mA} \cdot 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ h} = 1,155 \text{ mAh} \quad (2.9)$$

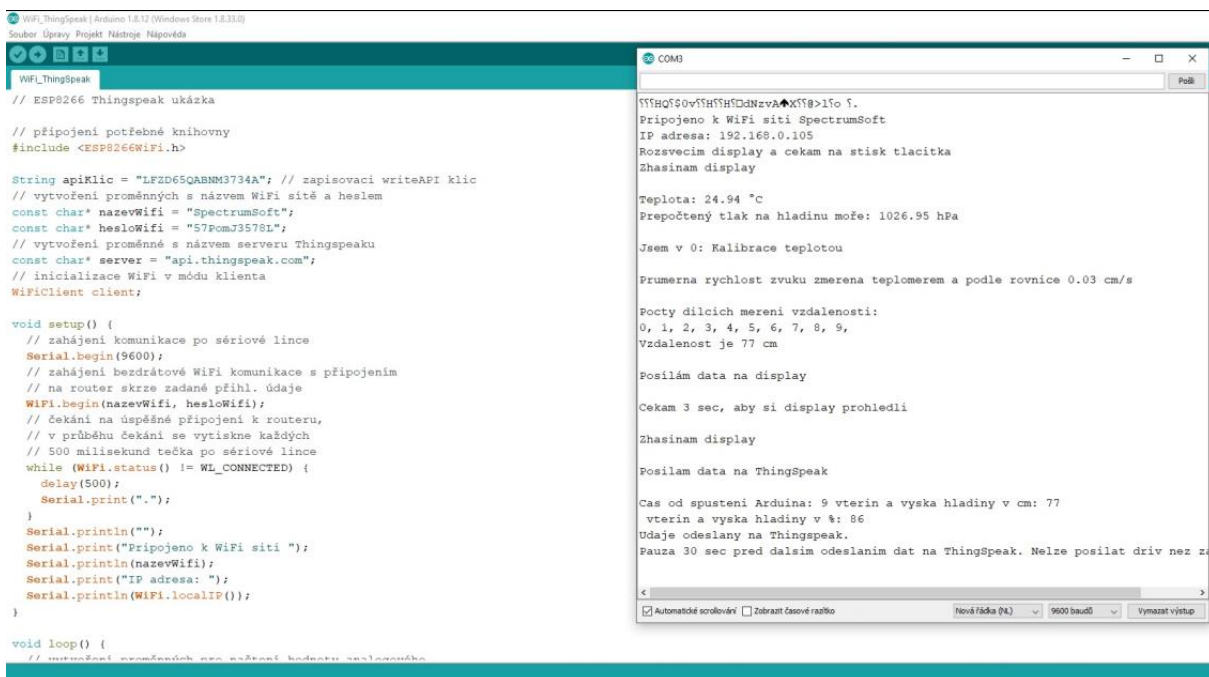
$$t = \frac{P_{baterie}}{P_{změřený}} = \frac{2600 \text{ mAh}}{1,19 \text{ mAh}} = 2184,9 \text{ hod} \cong 91 \text{ dní} \quad (2.10)$$

Reálný čas výdrže baterie je tedy 91 dní. Do návodu na k použití přístroje bych tuto hodnotu ještě zmenšil, abych získal rezervu. Tedy například 80 dní.

## 2.6 Schematický popis ovládacího SW

Pro programování chipu ESP 8266 EX bylo využito programovacího jazyku Wiring v prostředí Arduino IDE. Syntaxe jazyka Wiring vychází ze syntaxe C/C++ jazyka. Původním autorem jazyka je Hernando Barragán. Ten jej vytvořil v roce 2003 ve své diplomové práci na italském institutu IDII (Interaction Design Institute Ivrea). Cílem práce bylo ulehčení práce umělců a designérů pracujících s elektronikou [7].

Na obr. 2-18 je příklad vývojového SW Wire. Na obrázku je zobrazena komunikace po seriové lince, kde se k ladění SW využíval přenos textového pole. Tím jsem měl jistotu, že tato část kódu byla vykonána. Nahrazuje to možnost ladění pomocí krokování programu.



```
WiFi_ThingSpeak | Arduino 1.8.12 (Windows Store 1.8.12)
Soubor Úpravy Projekt Nástroje nápověda

WiFi_ThingSpeak
// ESP8266 Thingspeak ukáзка

// připojení potřebné knihovny
#include <ESP8266WiFi.h>

String apiKey = "LFZD65QABNM3734A"; // zapisovací writeAPI klíč
// vytvoření proměnných s názvem WiFi sítě a heslem
const char* nazevWifi = "SpectrumSoft";
const char* hesloWifi = "57PomJ3578L";
// vytvoření proměnné s názvem serveru Thingspeaku
const char* server = "api.thingspeak.com";
// inicializace WiFi v módu klienta
WiFiClient client;

void setup() {
  // zahájení komunikace po sériové lince
  Serial.begin(9600);
  // zahájení bezdrátové WiFi komunikace s připojením
  // na router skrze zadané přihl. údaje
  WiFi.begin(nazevWifi, hesloWifi);
  // čekání na úspěšné připojení k routeru,
  // v průběhu čekání se vytiskne každých
  // 500 milisekund tečka po sériové lince
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("");
  Serial.print("Připojeno k WiFi síti ");
  Serial.println(nazevWifi);
  Serial.print("IP adresa: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
}

void loop() {
  // nastavení proměnných pro sdělení hodnoty na lince
```

```
COM3
Připojeno k WiFi síti SpectrumSoft
IP adresa: 192.168.0.105
Rozsvěcím display a čekám na stisk tlačítka
Zhasinám display

Teplota: 24.94 °C
Prepočtený tlak na hladinu moře: 1026.95 hPa

Jsem v 0: Kalibrace teplotou

Průmerná rychlost zvuku zmerena teploměrem a podle rovnice 0.03 cm/s

Počty dílcích měření vzdalenessi:
0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,
Vzdaleness je 77 cm

Posílám data na display

Čekám 3 sec, aby si display prohlédli

Zhasinám display

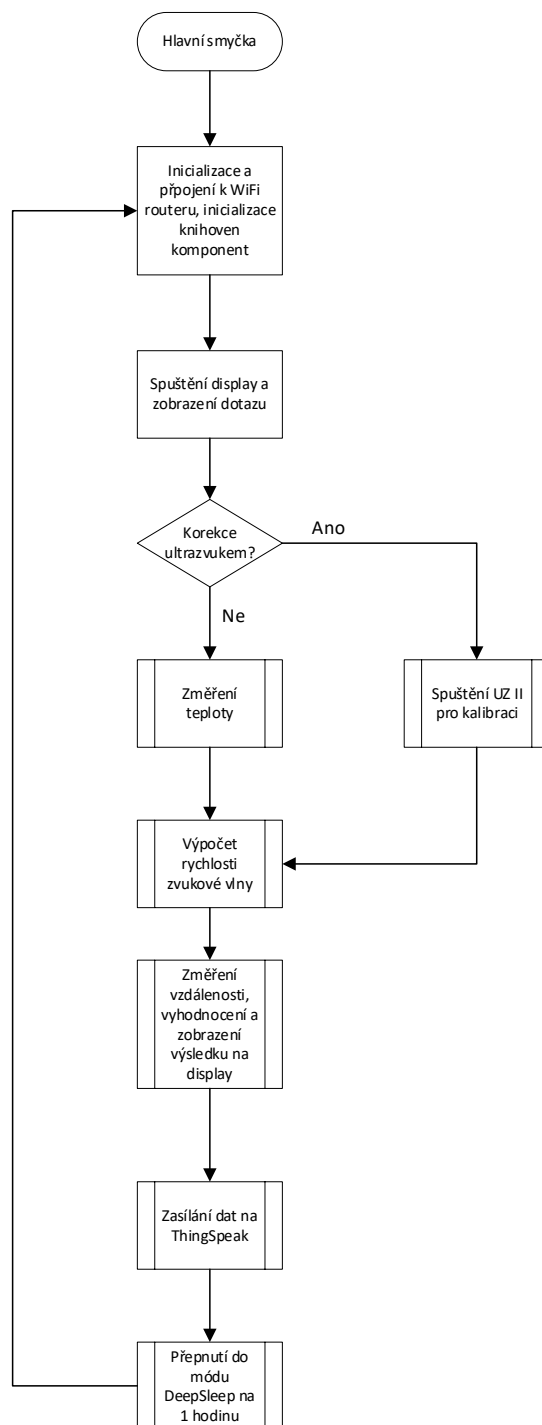
Posílám data na ThingSpeak

Čas od spuštění Arduina: 9 vteřin a výška hladiny v cm: 77
Vteřin a výška hladiny v #: 86
Udaje odeslány na Thingspeak.
Pauza 30 sec před dalším odesláním dat na ThingSpeak. Nelze posílat dřív než z
```

Obr. 2-18: Vývojové prostředí Wire s oknem výpisu komunikace po sériové lince

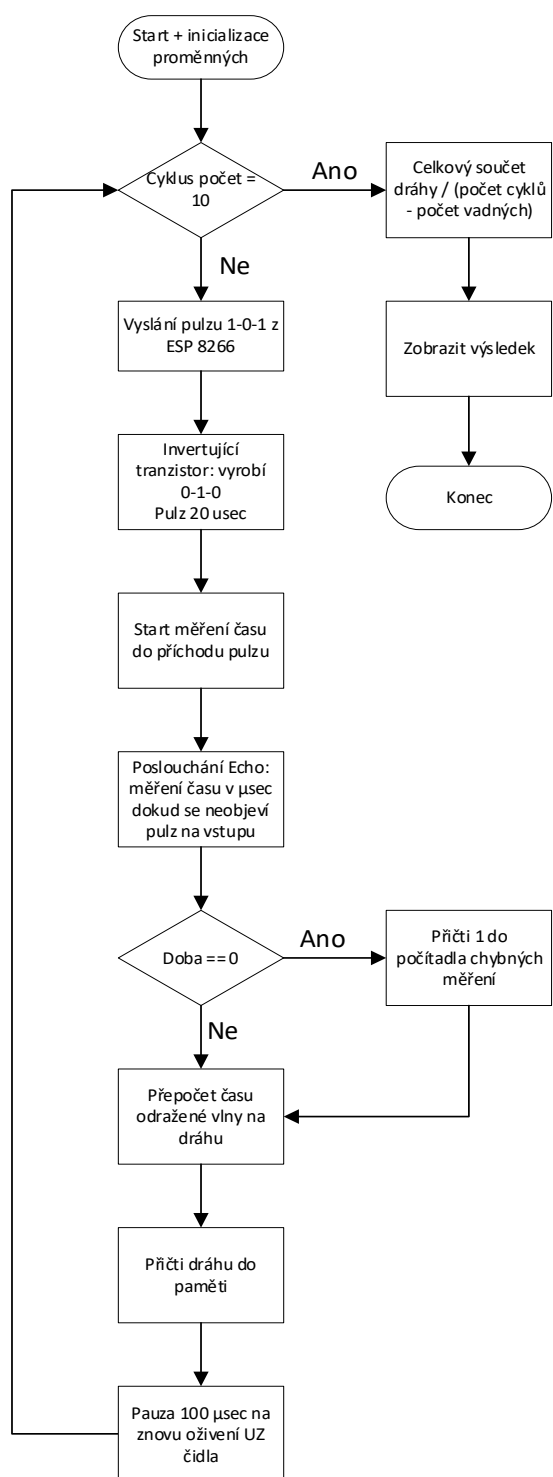


## Vývojový diagram hlavní smyčky programu



Obr. 2-19: Vývojový diagram hlavní smyčky programu

## Část kódu pro ovládání ultrazvukového čidla I a II



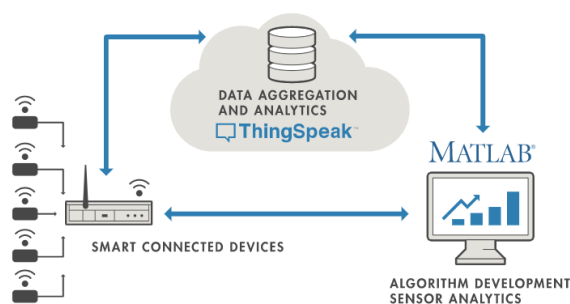
Obr. 2-20: Vývojový diagram ovládání modulů JSN-SR04T s následným vyhodnocením

Výpočet měření vzdálenosti je založen na průměrování naměřených hodnot, aby se vyloučily pohyby hladiny. Dále jsou z průměru vyloučeny hodnoty, které jsou měřeny mimo rozsah. Celý zdrojový kód je uveden v příloze.

## 2.7 WiFi komunikace a sběr dat na server

Čip ESP8266 umožňuje komunikovat pomocí bezdrátové komunikace dle standardu IEEE 802.11 známe pod termínem WiFi. Tímto lze získat pomocí WiFi přístup k jakémukoliv serveru ukládajícímu data. Pro svou bakalářskou práci jsem si vybral ThingSpeak, protože umožňuje v rámci studentské licence uložit 33 milionů záznamů ročně nebo 90 000 záznamů denně. Dále je umožněno připojit 10 kanálů na zařízení, ze kterých lze sbírat data. Čas ukládání je každou sekundu [14].

ThingSpeak pro IoT projekty je cloudové úložiště dat, které obsahuje pokročilou datovou analýzu na jádře systému MATLAB. Licenci využívám studentskou v rámci fakulty VUT FEKT.



Obr. 2-21: Schéma fungování ThingSpeak [13]

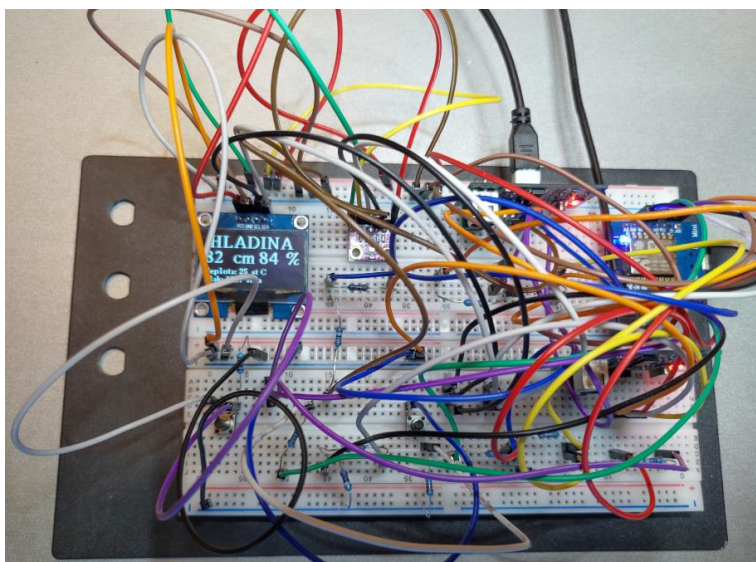
Data jsou dostupná pomocí webového rozhraní nebo pomocí aplikací v prostředí Android nebo Apple. Samotná registrace je obvyklý proces, kde se musí zadat emailový účet fakulty a pak z interního emailu potvrdit přístupový email.

Samotné posílání dat z ESP8266 se skládá z vytvoření klienta serveru, z tvorby zprávy s přesně definovanou hlavičkou, která obsahuje proměnné typu pole, kde jsou uloženy odesílané hodnoty. Poté se ukončí spojení na minimální dobu 30 sec, kdy nelze do ThingSpeak odeslat další data. Toto je provozní omezení dané licencí.

## 2.8 Prototyp čidla měření výšky hladiny

Všechny součástky, kromě napájení, jsou umístěny v nepájivém kontaktním poli. To umožňuje zkoušet různé varianty zapojení a testování senzorů. Na tomto prototypu byl naprogramován a plně odladěn SW celého čidla měření hladiny. Na kontaktním nepájivém poli

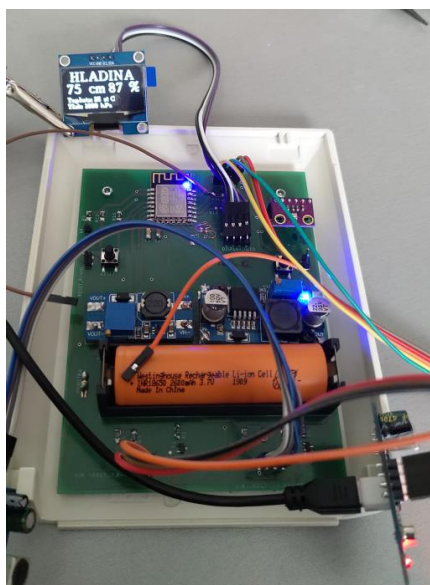
je vidět testovací karta Weemos LUA D1 mini s čipem ESP8266. Dále jsou zde oba ultrazvukové senzory a meteo čidlo BMP280. Display ukazuje aktuální vzdálenost. Podpůrné odpory a tranzistory slouží k napět'ovému přizpůsobení mezi 3,3 V a 5 V. Další součástky jako svodové kondenzátory, tlačítka a odpory pro automatický režim probuzení není potřeba blíže vysvětlovat.



Obr. 2-22: Prototyp čidla měření hladiny v nepájivém poli

## **2.9 Realizace, ožívování a testování v provozu**

Osazená DPS čidla měření hladiny je na Obr. 2-23. Velkou část desky zabírá napájení s dvěma měniči a pojistkou. Na DPS jsem ponechal tlačítka, pro pohodlnější ožívování. Vedle tlačítek jsou vyvedeny svorky pro externí tlačítka na krabici. V horní části je čip ESP8266 a okolo jsou svodové kondenzátory. Vedle čipu je svorkovnice pro připojení převodníku UART – USB. Display je fyzicky připevněn na víčku krabičky. Na DSP jsou připraveny svorky, do kterých je připojen pomocí vodičů v rámci ožívování zařízení. DPS má dále vyvedený analogový PIN, který v tuto chvíli není využíván. Meteo čidlo BMP 280 je osazeno v připravené svorkovnici.



Obr. 2-23: DPS

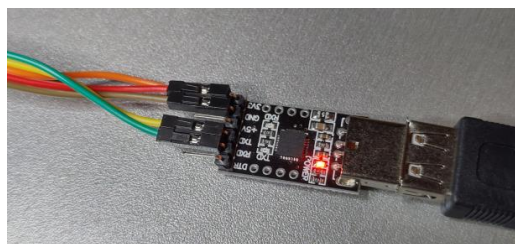


Obr. 2-24: Vnější pohled

Při ožiování zařízení jsem nejdříve proměřil hodnoty všech součástek, zda odpovídají hodnotám ve schématu na Obr. 2-16. Poté jsem vložil baterii a nastavil hodnoty na měničích (5 V a 3,3 V). Znovu jsem proměřil základní cesty. Zkontroloval místa na DPS, kde má být napětí 3,3 V nebo 5 V. Až poté jsem dopájel velké součástky jako je ESP8266 a karty s ultrazvukovým senzorem. Na Obr. 2-26 je vidět převodník USB – UART při komunikaci s čipem ESP8266. Na Obr. 2-25 je vidět propojení desky a USB – UART převodníku.

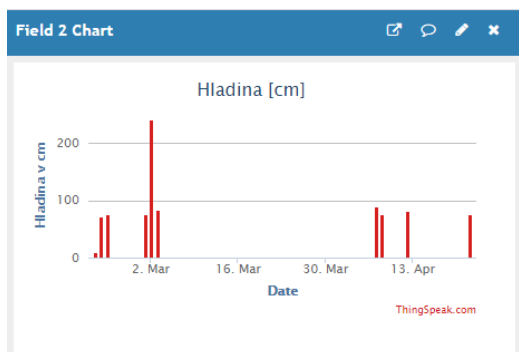


Obr. 2-25: Zapojení převodníku

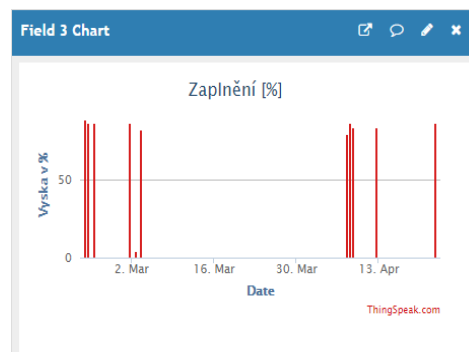


Obr. 2-26: Převodník USB-UART

Testování zatím probíhá v laboratorním (pokojevém) prostředí. Zde příkládám zpracovaná data ve formě grafu z prostředí ThingSpeak.



Obr. 2-27: Vzdálenost hladiny od čidla [cm]



Obr. 2-28: Zaplněnost nádrže [%]

Podle požadavků zadavatele se má zobrazovat % zaplnění nádrže. Tyto jsou definována jako 250 cm pro 0 % a 50 cm je 100 %. Vzorec pro výpočet zaplnění nádrže (2.11) je odvozen z rovnice přímky pro zadané hodnoty horní a dolní hranice hladiny vody v nádrži.

$$\text{Zaplnění [\%]} = -\frac{1}{2} \cdot h_{\text{průměrná}}[\text{cm}] + 125 \quad (2.11)$$

## 2.10 Cenová kalkulace

Kalkulace výrobku z hlediska použitých součástek je 2687 Kč. Tabulka cenové kalkulace jednotlivých komponent 2-6 obsahuje soupisku použitého materiálu.

Tabulka cenové kalkulace jednotlivých komponent 2-6

Součástka	Cena [Kč]
Display OLED	165
ESP8266 12F	114
2 x JSN-SR04T	902
BMP 280	62
Odpory SMD, tranzistory, kondenzátory, pojistka, tlačítka, svorkovnice, pouzdro na baterii	208
Baterie LI-ION	179
Měnič Step-up	35
Měnič Step-down	49
GATEMA – výroba desky	973
<b>Celkem</b>	<b>2687 Kč</b>

### 3 Závěr a shrnutí výsledků:

Cílem bakalářské práce bylo vyzkoušet si moderní vývoj elektronického zařízení. V rámci bakalářské práce jsem se zaměřil na návrh, výběr komponent, optimalizace součástek, tvorbu prototypu a naprogramování řídicího SW. Nakonec jsem vytvořil finální výrobek.

V práci došlo ke spojení teoretických znalostí s praktickou náplní. Při návrhu zařízení jsem si uvědomil sílu jednoduchých zapojení jako je dělič napětí nebo tranzistor jako spínač. Získané znalosti jsou během studia celkem jasné. Člověk bez zkušeností a praxe mnohdy nedocení jejich eleganci a účinnost, dokud se nezačne zabývat praktickým návrhem a konstrukcí.

Během vývoje jsem si uvědomil další možnosti, jak dané zařízení vylepšit. Do budoucna by bylo vhodné doplnit napájení o nabíjecí modul pro LION baterii. Zařízení by šlo doplnit o další čidla, která by nás informovala o kvalitě vody (např. měření pH).

Další cestou bude využití velké výpočetní kapacity čipu ESP8266. Zařízení by mohlo ovládat čerpadlo pomocí jednoduchých řídicích algoritmů (např. PSD regulátor nebo fuzzy regulátor). Případně zařízení mohlo provádět predikci stavu nádrže na základě změny počasí, tj. např. změny tlaku vzduchu. Při klesajícím trendu tlaku by mohlo začít vypouštět nádrž pro případ záchyty čerstvé vody. Stávající čidlo BMP 280 obsahuje měření tlaku. Pro lepší predikci by se mohlo vyměnit kus za kus za čidlo obsahující i měření vlhkosti. To by zvýšilo predikci nastávajícího deště.

Během praktických zkoušek se ukázala kalibrace pomocí teploty jako přesnější. Proto by bylo vhodné do budoucna kalibraci pomocí druhého ultrazvuku úplně vypustit a získat takto nevyužitě I/O piny pro další zařízení (např. ovládání stykače čerpadla).

Zařízení bylo testováno v laboratorních podmínkách. Výsledky byly uspokojivé z hlediska konzistence měření stejné vzdálenosti. Bude nutné zařízení otestovat ve skutečném provozu, kdy jej budou ovlivňovat klimatické změny a přítomnost vodních par.

## 4 Seznam použitých zdrojů

- [1] ĎAĎO Stanislav, BEJČEK Ludvík, PLATIL Antonín: *Měření průtoku a výšky hladiny*, Nakladatelství BEN – technická literatura, Praha, 2005, 447 stran, ISBN 80-7300-156-X
- [2] KOROPECKÁ H., *Měřicí technika*, Pardubice, Vysoká škola chemicko-technologická v Pardubicích, 1983, 253 stran, VŠ skriptum
- [3] Beam characteristic MB1010 [cit. 2019-11-04]. Dostupné z [https://www.maxbotix.com/Ultrasonic\\_Sensors/MB1010.htm](https://www.maxbotix.com/Ultrasonic_Sensors/MB1010.htm)
- [4] Ultrazvukový dálkoměr – skoro jako netopýr, [cit. 2019-11-19] Dostupné z <https://robotika.vosrk.cz/exercises/index.php?page=11>
- [5] Popis desky Wemos LUA D1 mini [cit. 2019-11-04]. Dostupné z [https://wiki.wemos.cc/products:d1:d1\\_mini](https://wiki.wemos.cc/products:d1:d1_mini)
- [6] Datasheet k desce Wemo LUA D1 mini Schematic V3.0.0 [cit. 2019-11-04]. Dostupné z [https://wiki.wemos.cc/products:d1:d1\\_mini](https://wiki.wemos.cc/products:d1:d1_mini)
- [7] SELECKÝ M.: *Arduino Uživatelská příručka*, Computer press, Brno, 2016, 344 stran, ISBN 978-80-251-4840-2
- [8] ŠTEFFAN P.: *Návrh systémů s digitálními integrovanými obvody a mikroprocesory pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*, Brno, 2014, 132 stran, ISBN 978-80-214-5072-1
- [9] BOUŠEK J., KOSINA P., MOJROVÁ B.: *Elektronické součástky*, Brno, 2015, 209 stran, VŠ elektronické skriptum
- [10] HORÁK Z., KRUPKA F., ŠINDELÁŘ V.: *Technická fyzika*, SNTL, Praha, 1961, 1436 stran, Vydání třetí.
- [11] Ultrazvukové senzory přiblížení - funkce, provedení, použití [cit. 2019-12-04]. Dostupné z <https://automatizace.hw.cz/ultrazvukove-senzory-priblizeni-funkce-provedeni-pouziti.html>
- [12] Datasheet EPS8266EX [cit. 2019-12-04]. Dostupné z <https://www.espressif.com/en/support/download/documents/> soubor 0a-esp8266ex\_datasheet\_en.pdf
- [13] Learn more about ThingSpeak [cit. 2020-05-26]. Dostupné z [https://thingspeak.com/pages/learn\\_more](https://thingspeak.com/pages/learn_more)
- [14] Student licence [cit. 2020-06-03]. Dostupné z [https://thingspeak.com/prices/thingspeak\\_student](https://thingspeak.com/prices/thingspeak_student)



## 5 Seznam použitých zkratek a symbolů.

Symbol	Veličina	Jednotka
f	frekvence	Hz
$\lambda$	vlnová délka	m
t	čas	s
$\omega$	úhlová rychlost	rad.s <sup>-1</sup>
$\mu_r$	relativní permeabilita	kg.mA <sup>-2</sup> .s <sup>-2</sup>
$\epsilon_r$	relativní permitivita	s <sup>4</sup> .A <sup>2</sup> .m <sup>-3</sup> .kg <sup>-1</sup>
g	gravitační zrychlení	m.s <sup>-2</sup>
$\rho$	hustota	kg.m <sup>-3</sup>
p	tlak	Pa
c <sub>0</sub>	rychlost světla ve vakuu	299 792 458 ms <sup>-1</sup>
R	univerzální plynová konstanta	8,314 J.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup>
T	termodynamická teplota	K
$\kappa$	Poissonova konstanta	-
$\phi$	zářivý tok	W
C	kapacita	F
U	napětí	V
I	proud	A
R	odpor	$\Omega$

### Matematické symboly

$\pi$	Ludolfovo číslo
$\Delta$	odchylka; diference

## **6 Seznam příloh.**

Všechny přílohy jsou uvedeny v souboru ZIP jako samostatná příloha této práce.

## 7 Seznam obrázků

Obr. 1-1: Princip fungování vysílání a příjmu zvukové vlny [11] .....	20
Obr. 1-2: Definice základních dosahů ultrazvukového senzoru [11] .....	23
Obr. 2-1: Blokové schéma přístroje pro měření výšky hladiny.....	25
Obr. 2-2: Čidlo HY-SFR05 .....	26
Obr. 2-3: Čidlo JSN-SR04T .....	26
Obr. 2-4: Čidlo MB1040 LV .....	26
Obr. 2-5: Modul BMP 280 .....	27
Obr. 2-6: Čidlo LM35DZ .....	27
Obr. 2-7: Čidlo PT100.....	27
Obr. 2-8: OLED display 1,3".....	28
Obr. 2-9: Display modrý 16x2 znaků .....	28
Obr. 2-10: Displej OLED 0.91".....	28
Obr. 2-11: Atmel ATmega328-PU 28 PIN DIP .....	29
Obr. 2-12: ESP8266EX .....	29
Obr. 2-13: Deska Weemos LUA D1 mini s procesorem ESP 8266.....	30
Obr. 2-14: Zapojení desky Weemos LUA D1 mini ESP 8266 [6].....	31
Obr. 2-15: Blokové zapojení jednotlivých modulů .....	31
Obr. 2-16: Obvodové schéma zapojení .....	32
Obr. 2-17: Detail DPS napájecí části čidla hladiny .....	34
Obr. 2-18: Vývojové prostředí Wire s oknem výpisu komunikace po sériové lince.....	35
Obr. 2-19: Vývojový diagram hlavní smyčky programu .....	36
Obr. 2-20: Vývojový diagram ovládání modulů JSN-SR04T s následným vyhodnocením ....	37
Obr. 2-21: Schéma fungování ThingSpeak [13].....	38
Obr. 2-22: Prototyp čidla měření hladiny v nepájivém poli .....	39
Obr. 2-23: DPS .....	40
Obr. 2-24: Vnější pohled .....	40
Obr. 2-25: Zapojení převodníku .....	40

Obr. 2-26: Převodník USB-UART .....	40
Obr. 2-27: Vzdálenost hladiny od čidla [cm] .....	41
Obr. 2-28: Zaplněnost nádrže [%] .....	41

## 8 Seznam tabulek

Tabulka porovnání parametrů senzorů ultrazvukových měřidel vzdálenosti 2-1.....	26
Tabulka porovnání parametrů senzorů teploty 2-2.....	27
Tabulka porovnání parametrů display 2-3.....	28
Tabulka porovnání parametrů mikrokontrolerů 2-4.....	29
Tabulka spotřeby jednotlivých modulů daných výrobcí 2-5.....	34
Tabulka cenové kalkulace jednotlivých komponent 2-6.....	41