

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky  
Obor: Elektronika a komunikace



**Autonomní meteorologická stanice**  
**Autonomous weather station**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Šimon Pitro  
Vedoucí práce: Ing. Vladimír Janíček, Ph.D.  
Rok: 2022



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pitro** Jméno: **Šimon** Osobní číslo: **483879**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Autonomní meteorologická stanice**

Název bakalářské práce anglicky:

**Autonomous Weather Station**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte průzkum trhu v oblasti inteligentních meteorologických stanic pro monitorování počasí.
- 2) Navrhněte koncept zařízení, které bude plnit funkce klasické meteostanice s měřením dalších nestandardních meteorologických veličin.
- 3) Zkonstruujte prototyp zařízení, postaveného na mikroprocesorovém jednočipu s externí jednotkou. Data zobrazujte na e-ink displeji. Minimalizujte spotřebu zařízení.
- 4) Vytvořte ovládací software pro vnitřní a vnější jednotku. Vytvořte případně mobilní aplikaci pro vzdálený monitoring.
- 5) Otestujte zařízení a vyhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- 1) Vedat O.O., Developing IoT Projects with ESP32: Automate your home or business with inexpensive Wi-Fi devices, ISBN 978-1838641160
- 2) Schindler, A., Air Quality: Measurement, Analysis and Monitoring Techniques, ISBN 978-1682867310
- 3) ESP32 for IoT: A Complete Guide, <https://www.nabto.com/guide-to-iot-esp-32/>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Vladimír Janíček, Ph.D. katedra mikroelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **01.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

\_\_\_\_\_  
Ing. Vladimír Janíček, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci s názvem Autonomní meteorologická stanice vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Praha 8. 8. 2022

.....  
Šimon Pitro

## **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu práce Ing. Vladimíru Janíčkoví, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady během tvorby této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Václavu Návrátílovi, Ph.D. za užitečné rady ohledně návrhu komponent k 3D tisku a za jejich následné vytištění na katedře radioelektroniky. V neposlední řadě děkuji své rodině za vytrvalou podporu nejen během tvorby této práce, ale zejména během celé doby studia bakalářského programu.

# Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem chytré meteorologické stanice. Úvodní část je věnována průzkumu trhu v oblasti domácích meteorologických stanic, přičemž jsou jednotlivé produkty zkoumány z mnoha hledisek zahrnujících komunikaci nebo sensoriku. Získané poznatky jsou aplikovány v praktické části práce, která se zabývá konstrukcí prototypu meteorologické stanice a návrhem ovládacího softwaru. Výstupem práce je funkční prototyp chytrého meteorologického zařízení, jehož externí modul pravidelně sbírá data z externích sensorů, posílá je serveru přes Wifi a následně je zobrazuje na displeji vnitřní jednotky. V závěru práce jsou hodnoceny dosažené výsledky a krátce jsou představeny možnosti dalšího rozšíření systému.

**Klíčová slova:** ESP32, internet věcí, meteorologická stanice, průzkum trhu, Thingspeak, Wifi

# Abstract

This bachelor's thesis deals with the design of a smart weather station. The introductory part is devoted to market research in the field of home weather stations. Individual products are examined from many points of view, including communication or sensors. The knowledge gained is applied in the practical part of the thesis, which deals with constructing the meteorological station prototype and designing the control software. The output of the work is a functional prototype of an intelligent meteorological device whose external module regularly collects data from external sensors, sends them to the server via Wifi, and then displays them on the indoor unit display. The prototype is then tested, and the achieved results are evaluated. At the end of the thesis, the options for further expansion of the system are briefly presented.

**Key words:** ESP32, internet of things (IoT), market research, weather station, Thingspeak, Wifi

# Obsah

Seznam použitých zkratk	ix
Seznam obrázků	xi
Úvod	1
<b>1 Průzkum trhu</b>	<b>3</b>
1.1 Analyzované meteorologické stanice . . . . .	3
1.2 Analýza produktů z hlediska měření meteorologických veličin . . . . .	4
1.3 Analýza produktů z hlediska dostupnosti různých funkcí . . . . .	6
<b>2 Představení použitých technologií</b>	<b>9</b>
2.1 ESP32 . . . . .	9
2.2 Komunikační protokol I <sup>2</sup> C . . . . .	11
2.3 API . . . . .	11
2.4 Li-ion baterie . . . . .	11
<b>3 Komunikace zařízení</b>	<b>13</b>
3.1 Možnosti bezdrátové komunikace . . . . .	13
3.2 Zvolená forma komunikace . . . . .	14
3.3 Thingspeak . . . . .	15
3.3.1 Struktura služby Thingspeak . . . . .	16
3.3.2 Čtení a nahrávání dat na Thingspeak . . . . .	16
3.3.3 Aplikace Thingview . . . . .	18
<b>4 Externí jednotka</b>	<b>19</b>
4.1 Požadavky na externí jednotku . . . . .	19
4.2 Řídicí modul . . . . .	20
4.3 Hardwarové komponenty . . . . .	22
4.3.1 Senzor tlaku, vlhkosti a teploty . . . . .	22
4.3.2 Senzor teploty . . . . .	23
4.3.3 Senzor intenzity světla a indexu UV záření . . . . .	25
4.3.4 Baterie . . . . .	26
4.3.5 Solární nabíjecí modul . . . . .	27
4.3.6 Solární panel . . . . .	29
4.3.7 Napěťový regulátor . . . . .	29

---

4.4	Návrh desky plošných spojů . . . . .	30
4.5	Pouzdro externí jednoty . . . . .	33
4.6	Programování jednotky . . . . .	33
4.6.1	Monitorování stavu baterie . . . . .	34
4.6.2	Programování senzorů . . . . .	35
4.6.3	Komunikace se serverem Thingspeak . . . . .	36
4.6.4	Životní cyklus programu . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Interní jednotka</b>	<b>39</b>
5.1	Výchozí požadavky na interní jednotku . . . . .	39
5.2	Vývojová deska . . . . .	40
5.3	Senzor teploty a vlhkosti . . . . .	42
5.4	Programování jednotky . . . . .	43
5.4.1	Získání meteorologických dat . . . . .	43
5.4.2	Grafika displeje . . . . .	45
5.4.3	Životní cyklus programu . . . . .	47
5.5	Ochranný obal jednotky . . . . .	49
<b>6</b>	<b>Testování prototypu</b>	<b>51</b>
6.1	Meteorologická sensorika . . . . .	51
6.2	Napájení . . . . .	52
6.3	Komunikace stanice . . . . .	53
6.3.1	Komunikace venkovního modulu . . . . .	53
6.3.2	Komunikace vnitřního modulu . . . . .	55
<b>7</b>	<b>Zhodnocení dosažených výsledků</b>	<b>57</b>
7.1	Náklady na výrobu prototypu . . . . .	57
7.2	Srovnání prototypu s komerčně dostupnými meteostanicemi . . . . .	58
7.3	Celkové zhodnocení . . . . .	59
	<b>Závěr</b>	<b>61</b>
	<b>Literatura</b>	<b>63</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>69</b>
A	Fotografie zařízení ve fázi montáže . . . . .	69
B	Snímky aplikace Thingview . . . . .	74



# Seznam použitých zkratek

Zkratka	Celá anglická nebo česká forma zkratky
ADC	Analog to Digital Converter
API	Application Programming Interface
AL	Ambient Light
ALS	Ambient Light Sensor
BLE	Bluetooth Low Energy
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CSV	Comma Separated Values
ČB	ČernoBílý
ČBM	Černo-Bílo-Modrý
DA	Digital to Analog
DCF	Deutsch long wave signal Frankfurt
DPS	Deska Plošných Spojů
DQ	Data in or Out
GND	Ground
GPIO	General Purpose Input/Output
HTTP	HyperText Transfer Protocol
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit
I <sup>2</sup> S	Inter-Integrated Sound
ID	IDentifier
IDE	Integrated Development Environment
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
JSON	JavaScript Object Notation
JST	Japan Solderless Terminal
LCD	Liquid Crystal Display
LDO	Low DropOut
LED	Light-Emitting Diode
Li-ion	Lithium-ion
LiPo	Lithium Polymer
MCU	MicroController Unit
METAR	MEteorological Terminal Air Report
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NTC	Negative Temperature Coefficient
OLED	Organic Light-Emitting Diode
PSRAM	Pseudo-Static Random Access Memory

---

PWM	Pulse-Width Modulation
RAM	Random Access Memory
REST	REpresentational State Transfer
ROM	Read Only Memory
RTC	Real-Time Clock
RV	Relativní Vlhkost
SDA	Serial Data
SDO	Serial Data Out
SCL	Serial Clock
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
SoC	System on a Chip
STEP	Standard for the Exchange of Product Data
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
ULP	Ultra Low Power
URL	Uniform Resource Locators
USB	Universal Serial Bus
USB-C	Universal Serial Bus Type-C
UV	Ultraviolet
UVI	UltraViolet Index
UVS	Ultraviolet Light Sensor
VA	Vertical Alignment
Vcc	Voltage collector collector
XML	eXtensible Markup Language

# Seznam obrázků

1.1	Popis úrovní UV indexu [32] . . . . .	6
1.2	Rozměry alkalických baterií [9] . . . . .	8
3.1	Využití HTTP v rámci IoT [20] . . . . .	17
3.2	MQTT a princip architektury Publish/Subscribe [21] . . . . .	18
4.1	Vývod pinů DevKit V1 [47] . . . . .	21
4.2	Přední strana BME280 [2] . . . . .	22
4.3	Zadní strana BME280 [3] . . . . .	22
4.4	Senzor DS18B20 v klasickém pouzdře [42] . . . . .	24
4.5	Přední strana LTR390 [61] . . . . .	25
4.6	Zadní strana LTR390 [62] . . . . .	25
4.7	Solární nabíjecí modul CN3791 [4] . . . . .	28
4.8	Ideální úhel náklonu solárního panelu v Praze [16] . . . . .	30
4.9	Schéma zapojení externí jednotky . . . . .	31
4.10	Finální design desky plošných spojů . . . . .	32
5.1	Náhled zadní strany LILYGO® TTGO T5-4.7 [38] . . . . .	40
5.2	Průřez e-ink displejem [63] . . . . .	41
5.3	DHT11 [7] . . . . .	43
5.4	Modul senzoru DHT11 [15] . . . . .	43
5.5	Vzhled velkých ikon v nočních hodinách . . . . .	46
5.6	Vzhled malých ikon během dne . . . . .	46
5.7	Kompletní zobrazení na displeji . . . . .	47
1	Venkovní pouzdro před uzavřením . . . . .	69
2	Spodní díl venkovního pouzdra . . . . .	70
3	Vrchní díl venkovního pouzdra . . . . .	70
4	DPS usazená ve venkovním pouzdru . . . . .	71
5	DPS před osazením senzory . . . . .	71
6	DPS osazená senzory . . . . .	72
7	Vnitřní pouzdro před uzavřením . . . . .	72
8	Vývojová deska interní jednotky . . . . .	73
9	Hardwarové části meteorologické stanice . . . . .	73

---

10	Sledované kanály . . . . .	74
11	Vizualizace dat v kanálu . . . . .	74

# Úvod

Cílem této bakalářské práce je v první fázi provést průzkum trhu na poli domácích meteorologických stanic, porovnat je z hlediska schopnosti měření meteorologických veličin a identifikovat jejich další funkce dostupné v různých cenových hladinách. Získané poznatky budou následně využity k realizaci dalšího cíle práce, kterým je návrh a sestavení vlastního prototypu chytré meteorologické stanice. Stanice bude tvořena vnitřním a vnějším modulem shodně ovládaných mikrokontrolérem ESP32. Úkolem vnějšího modulu bude v pravidelných intervalech získávat meteorologická data ze senzorů a posílat je vnitřní jednotce. Komunikace může být realizována přes serverového prostředníka prostřednictvím Wifi nebo přímým bezdrátovým spojením s vnitřní jednotkou, které lze navázat například přes Bluetooth. Vnitřní jednotka bude na přehledném displeji zobrazovat meteorologická data získaná vnějším modulem a také aktuální předpověď počasí získanou přes internet. Hotový prototyp bude následně otestován a budou zhodnoceny dosažené výsledky. V závěru práce mohou být nastíněny možnosti dalšího rozšíření vytvořeného systému.



# Kapitola 1

## Průzkum trhu

Tato kapitola se zabývá analýzou trhu v oblasti domácích meteorologických stanic dostupných v České republice. Kapitola zahrnuje výčet zkoumaných stanic a následnou analýzu vybavenosti jednotlivých produktů. Stanice jsou zprvu zkoumány z hlediska jejich hlavní funkce, tedy měření meteorologických veličin. Druhou oblastí analýzy je vybavenost stanice různými funkcemi.

### 1.1 Analyzované meteorologické stanice

Průzkum trhu je proveden od nejlevnějších produktů s minimem funkcí přes produkty střední kategorie až po zařízení nejdražší a nejkomplexnější. Vybráno je celkem 10 výrobků různých značek. Výčet analyzovaných meteorologických stanic spolu s jejich cenou<sup>1</sup> je zachycen v tabulce 1.1.

**Tabulka 1.1:** Analyzované meteostanice

Celý název zařízení	Výrobce	Cena (Kč)	Dále pod názvem
Sencor SWS 3000 W [55]	Sencor	549	SWS 3000 W
EMOS E0352 [23]	EMOS	619	EMOS E0352
Hyundai WS 2244B [36]	Hyundai	799	WS 2244B
TFA 35.1145.54 LARGO [59]	TFA	999	TFA LARGO
TFA 35.1140.01 Spring Breeze [58]	TFA	2390	Spring Breeze
GARNI 735 [29]	GARNI	2595	Garni 735
Hyundai WSP 3080RWIND [37]	Hyundai	2649	3080RWIND
Sencor SWS 12500 WiFi [56]	Sencor	4799	SWS 12500
EMOS Smart profi E5059 [24]	EMOS	5499	EMOS E5059
GARNI 2055 Arcus [30]	GARNI	8899	2055 Arcus

Všechny stanice jsou bezdrátové a skládají se z vnějšího modulu vybaveného

<sup>1</sup>Uvedená cena nezahrnuje baterie potřebné k napájení stanice.

senzory a vnitřního modulu, který funguje jako uživatelské rozhraní schopné vizualizovat data zprostředkovaná externím modulem.

## 1.2 Analýza produktů z hlediska měření meteorologických veličin

Venkovní senzory analyzovaných stanic nabízejí měření dvou až osmi meteorologických veličin. Vybavenost jednotlivých stanic meteorologickými senzory vizualizuje tabulka 1.2. Položka AL je anglická zkratka pro okolní světlo.

**Tabulka 1.2:** Meteostanice z hlediska měřených meteorologických veličin

Zařízení	Meteorologické veličiny							
	Teplota	Vlhkost	Tlak	Vítr		Srážky	Elm. záření	
				Rychlost	Směr		AL	UV
EMOS E0352	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
SWS 3000 W	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
WS 2244B	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
TFA LARGO	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
Spring Breeze	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne
Garni 735	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne
3080RWIND	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne
EMOS E5059	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
SWS 12500	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
2055 Arcus	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano

### Teplota

Stanice nižší cenové relace měří venkovní teplotu v minimálním rozsahu  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  s přesností okolo  $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teplotní senzory produktů v cenové relaci nad 2000 Kč mají typický rozsah  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  s přesností  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  a lepší. Nejdražší stanice Garni Arcus využívá k měření teploty čidlo značky Sensirion. Toto čidlo měří v rozsahu  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , přičemž v rozsahu  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  dosahuje přesnosti  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při nižších teplotách je přesnost zhruba třikrát nižší.

Stanice jsou zpravidla vybaveny i čidlem zajišťujícím měření vnitřní teploty, které mívá rozsah zhruba  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Přesnost měření vnitřní teploty nebývá lepší než  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Všechny analyzované meteorologické stanice zobrazují teplotu s rozlišením  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



## Vlhkost

Všechny stanice zobrazené v tabulce 1.2 jsou schopny měřit relativní vlhkost. Levnější produkty mívají zpravidla rozsah měření mezi 20 % RV až 95 % RV a toleranci kolem  $\pm 5$  % RV. Stanice v cenové relaci nad 2000 Kč zpravidla měří v rozsahu 1 % RV až 99 % RV. Tolerance se u dražších stanic příliš neliší a zpravidla se nejedná o hodnotu nižší než  $\pm 3,5$  % RV při relativní vlhkosti 20 % až 80 %. Mimo tento rozsah bývá uváděná tolerance až dvakrát vyšší.

Některé stanice jsou vybaveny vnitřním senzorem pro měření vlhkosti. Přesnost tohoto senzoru mezi 20 % RV až 80 % RV je  $\pm 3,5$  % RV u dražších stanic. Levnější stanice mají zpravidla v tomto rozsahu přesnost  $\pm 5$  % RV.

Jednotné rozlišení měření vnitřní i venkovní vlhkosti je 1 %.

## Barometrický tlak

Senzor barometrického tlaku je typický pro meteorologické stanice dražší než 900 Kč. Minimální rozsah měřených hodnot uváděný v hektopascalech (hPa) bývá 700 hPa až 1050 hPa. Uvedená přesnost v daném rozsahu nebývá lepší než  $\pm 5$  hPa. Je-li vzat v potaz fakt, že na základě změn barometrického tlaku meteorologické stanice realizují předpověď počasí, výše uvádaná přesnost není nijak vysoká. Stanice často také zobrazují symbolovou indikaci trendu tlaku se symboly pro klesající, stabilní a zvyšující se tlak.

## Rychlost a směr větru

Jak lze vidět v tabulkách 1.2 a 1.1, u stanic se senzory schopnými měřit rychlost a směr větru nastává velký cenový skok. Tyto meteorologické stanice najdeme v cenové relaci nad 2000 Kč. Drtivá většina produktů schopných měřit tyto veličiny je vybavena senzorem směru i rychlosti větru současně. Minimální rozsah senzoru rychlosti větru uváděný v kilometrech za hodinu (km/h) je 0 až 120 km/h s přesností  $\pm 6$  %. Senzor směru větru je typicky schopen detekovat 16 poloh. Senzory větru jsou již prostorově poměrně náročné a vyžadují výrazně větší venkovní pouzdra, která často integrují i srážkoměry.

## Úhrn srážek

Stanice vyšší cenové kategorie v sobě často integrují také srážkoměry. Jednotkou úhrnu srážek jsou mm/h. Senzory jsou schopny měřit v minimálním rozsahu 0 až 999,9 mm s typickou relativní přesností  $\pm 6$  %. Ty nejlepší meteostanice jsou vybaveny vyhřívanými srážkoměry, které umožňují měřit úhrn sněhových srážek. Touto funkcí disponují profesionální meteorologické stanice, které nejsou předmětem této analýzy.

## UV index a intenzita světla

Měření UV indexu a intenzity světla je záležitostí těch nejdražších meteostanic. Odečítání těchto veličin často zajišťuje společný senzor. Tyto senzory musí být integrovány na povrchu pouzdra pod průsvitným krytem, aby byly chráněny a zároveň na ně dopadalo světlo. UV index je bezrozměrný a je nejčastěji měřen v rozsahu 0 až 16. Jednotlivé úrovně UV indexu spolu s bezpečnostním doporučením popisuje obrázek 1.1.



Obrázek 1.1: Popis úrovní UV indexu [32]

Intenzita světla se udává v kiloluxech (klx). Její rozsah u analyzovaných produktů je 0 až 200 klx. Senzory intenzity světla disponují rozlišením na dvě desetinná místa, což z nich v rámci této analýzy činí senzory s nejvyšším rozlišením.

## 1.3 Analýza produktů z hlediska dostupnosti různých funkcí

Další funkce meteostanic, jak je zachycuje tabulka 1.3, zahrnují přesnost předpovědi počasí, kompatibilitu s různými operačními systémy, možnosti bezdrátové komunikace a kvalitu displeje.

### Předpověď počasí

Nezákladnější funkcí většiny meteostanic je realizovat a zobrazovat předpověď počasí. V nějaké podobě touto funkcí disponuje většina stanic dražších než 600 Kč. Meteorologické stanice předpovídají počasí na základě změn barometrického tlaku a teploty vzduchu. Předpověď se zpravidla vztahuje na následujících 24 hodin. Výrobci upozorňují, že přesnost předpovědi počasí založené na změnách barometrického

**Tabulka 1.3:** Meteostanice z hlediska dalších funkcí

Zařízení	Další funkce						
	Předpověď	Wifi	Podpora		Displej		
			Android	iOS	Rozměr (in)	Typ	Barva
EMOS E0352	Ano	Ne	Ne	Ne	3,8	LCD	ČBM
SWS 3000 W	Ano	Ne	Ne	Ne	4,4	LCD	ČBM
WS 2244B	Ano	Ne	Ne	Ne	4,8	LCD	ČB
TFA LARGO	Ano	Ne	Ne	Ne	4,9	LCD	ČB
Spring Breeze	Ano	Ne	Ne	Ne	7,6	LCD	Bar.
Garni 735	Ano	Ne	Ne	Ne	5,6	LCD	ČB
3080RWIND	Ano	Ne	Ne	Ne	5,5	LCD	ČB
EMOS E5059	Ano	Ano	Ne	Ne	7,96	LED	ČBM
SWS 12500	Ano	Ano	Ano	Ano	8,4	LCD	Bar.
2055 Arcus	Ano	Ano	Ano	Ano	7,96	VA	Bar.

tlaku je zhruba 70 % a aktuální situace nemusí dané předpovědi odpovídat. Meteorologické stanice zobrazují předpověď počasí formou jedné velké grafické ikony. Ikon popisujících stav počasí bývá k dispozici zhruba pět.

### Datum a čas

Jednou ze základních funkcí meteostanic je zobrazení aktuálního data a času. U drtivé většiny stanic je čas aktualizován přes rádiový signál DCF. Meteostanice Garni Arcus čas aktualizuje prostřednictvím Wifi. Vnitřní moduly dražších stanic mívají funkci budíku. Produkty vyšší cenové kategorie často na displeji zobrazují časy východu a západu slunce. U stanic s větším displejem je typické grafické zobrazení aktuální fáze měsíce.

### Wifi a bezdrátová komunikace

Podpora Wifi je divizou těch nejdražších stanic. Stanice vybavené touto technologií stojí zpravidla přes 4000 Kč. Tato funkce s sebou nese možnost naměřená data v pravidelných intervalech odesílat na internetové servery, které poskytují prostředí pro uchování a analýzu dat.

Meteorologické stanice s podporou Wifi často nabízejí zobrazení dat v mobilní aplikaci. Chytrá aplikace dává uživateli flexibilitu a možnost data monitorovat kdykoli a kdekoli. Nejdražší stanice 2055 Arcus využívá dedikovanou aplikaci určenou pouze pro chytré meteostanice značky Garni.

K bezdrátovému přenosu dat mezi venkovní a vnitřní jednotkou je využívána rádiová komunikace. Jedná se o vysokofrekvenční signál na frekvenci 433 MHz nebo 868 MHz. Uváděný dosah signálu bývá minimálně 50 m.

## Displej

Velkou roli v ceně meteorologické stanice hraje velikost, rozlišení a typ displeje vnitřní jednotky. Velikost displeje je přímo úměrná množství dat, které stanice sbírá a následně zobrazuje. Levnější produkty jsou vybaveny menšími LCD displeji, které občas mají funkci podsvícení. Technologie LCD je využívána i u displejů dražších meteostanic. LED displeje se objevují u nejdražších produktů, ale celkově je jejich výskyt výjimečný. Nejdražší stanice 2055 Arcus je vybavena inverzním barevným VA (Vertical Alignment) displejem, což může být jeden z hlavních důvodů velkého cenového skoku oproti stanicím EMOS E5059 a SWS 12500.

## Napájení a solární dobíjení

Nabíjení meteostanic je zpravidla zajištěno 1,5V bateriemi rozměru AA, AAA nebo výjimečně C. Jednotlivé typy používaných baterií zachycuje obrázek 1.2. Množství potřebných baterií je přímo úměrné vybavenosti stanice. Levnější stanice vystačí s dvojicí baterií pro vnitřní modul a další dvojicí pro externí modul. Stanice s více funkcemi a větším displejem zpravidla vyžadují dvě trojice tužkových baterií a další dvě baterie za každou přídatnou měřicí jednotku.



Obrázek 1.2: Rozměry alkalických baterií [9]

Solární dobíjení zpravidla dostupné nebývá. V této analýze možností solárního dobíjení disponují pouze dvě nejdražší meteostanice, přičemž je v dostupných návodech doporučeno externí jednotku napájet lithiovými akumulátory Li-ion.

# Kapitola 2

## Představení použitých technologií

Tato kapitola představuje v práci používané technologie a postupy. Velká část kapitoly se věnuje mikrokontroléru ESP32, který řídí vnitřní i venkovní modul výsledného zařízení. Právě technologie a postupy používané při realizaci jak vnitřní, tak vnější jednotky jsou hlavní součástí této kapitoly. Komunikační technologie jsou představeny v kapitole 3.

### 2.1 ESP32

ESP32 je rodina SoC mikrokontrolérů vyvíjených od roku 2016 firmou Espressif Systems sídlící v Šanghaji. Výrobce je tchajwanská společnost TSMC, která k výrobě těchto čipů využívá 40nm technologii. ESP32 je nástupcem mikrokontroléru ESP8266. ESP32 se vyznačuje nízkou spotřebou, cenovou dostupností a slušným výpočetním výkonem. Mikrokontrolér je k dispozici v provedení se dvěma nezávislými procesory.

Základní informace o mikrokontroléru vycházejí z článku *ESP32 for IoT: A Complete Guide* [35] a stránky ESP32 na anglické wikipedii [64].

#### Specifikace funkcí ESP32

Jádrem mikrokontroléru je 32bitový mikroprocesor Tensilica Xtensa LX6 v jednojádrovém či dvoujádrovém provedení pracující na frekvenci až 240 MHz. Mikrokontrolér obsahuje ULP koprocesor, který může vykonávat různé funkce, zatímco je zbytek jednotky v režimu spánku.

ESP32 disponuje 520 kB interní paměti SRAM, 448 kB interní paměti ROM a pamětí RTC, která se využívá k uchování instrukcí a dat v režimu spánku. K dispozici je také podpora externí paměti flash, která uchovává data i při restartu zařízení nebo při odpojení napájení.

Bezdrátovou komunikaci zajišťují integrované technologie Wifi ve standardu 802.11 b/g/n a Bluetooth ve verzi 5.0. K dispozici je také Bluetooth Low Energy

(BLE). Další možností bezdrátové komunikace je protokol s názvem ESP-NOW vyvinutý přímo firmou Espressif. Tento protokol se může využít ke vzájemné komunikaci více zařízení řízených mikrokontrolérem ESP32.

### **ESP32 je vybaven následujícími periferiemi:**

- 34 univerzálních vstupně-výstupních pinů (GPIOs)
- až 18 12bitových AD převodníků s postupnou aproximací
- dva 8bitové DA převodníky
- 4× sériové periferní rozhraní (SPI)
- 2× rozhraní I<sup>2</sup>S (rozhraní pro digitální audio)
- 2× rozhraní I<sup>2</sup>C
- 3× UART
- 10 kapacitních dotykových senzorů

ESP32 obsahuje interní LDO napěťový regulátor a individuální napájecí linku pro paměť RTC.

### **Režim hlubokého spánku**

Moduly s mikrokontrolérem ESP32 jsou jedny z nejlépe vybavených na trhu. S množstvím funkcí je ale také spojena vyšší spotřeba zařízení, která v aktivním módu<sup>1</sup> přesahuje 100 mA a ve špičkách dosahuje i 500 mA. Proto jsou mikrokontroléry ESP32 vybaveny režimem hlubokého spánku. Článek *Insight Into ESP32 Sleep Modes & Their Power Consumption* [43] uvádí, že v tomto režimu zůstává aktivní pouze RTC ovladač, RTC periferie (včetně koprocesoru ULP) a RTC paměť. V módu hlubokého spánku se spotřeba samotného čipu pohybuje mezi 0,15 mA a 10  $\mu$ A. Probuzení čipu může být zajištěno třemi způsoby: časovačem, dotykovým tlačítkem nebo externím probuzením.

### **Programování ESP32**

Jazyky využívané k programování systémů založených na ESP32 jsou zejména C, C++ a MicroPython.

Nejčastěji využívané prostředí k programování ESP32 je Arduino IDE. Toto prostředí nabízí množství knihoven k programování jak samotného mikrokontroléru,

---

<sup>1</sup>Aktivní mód označuje stav zařízení, kdy jsou všechny jeho funkce aktivovány. Mezi tyto funkce patří zejména Wifi, Bluetooth a digitální periferie. Spotřeba je v tomto módu na maximu.

tak připojených senzorů i dalších připojených zařízení. Mnoho knihoven obsahuje zkušební kódy, na kterých se dají vytvářet vlastní projekty. Další výhodou tohoto prostředí je široká uživatelská komunita, která produkuje programovací návody, zkušební kódy a poskytuje rychlou pomoc při řešení problémů na četných internetových fórech.

Další využívané prostředí je VS code s rozšířením PlatformIO. Toto prostředí nabízí silné zázemí pro tvorbu kódu, které zahrnuje třeba autokompletační nebo detekci a opravu chyb v kódu. Oproti Arduino IDE se jedná o pokročilejší prostředí, jež se uplatní zejména ve velkých projektech. Komunita uživatelů a internetová podpora tohoto prostředí však zatím není tak široká.

## 2.2 Komunikační protokol I<sup>2</sup>C

Inter-integrated circuit zkráceně I<sup>2</sup>C, jak ho popisuje článek *Basics of the I<sup>2</sup>C communication protocol* [17], je synchronní sériová komunikační sběrnice původně vyvinutá firmou Phillips. Tato sběrnice je označována jako Multi-master Multi-slave. To znamená, že může pracovat v režimech jednoho řídícího (master) s jedním až mnoha řízených (slave) zařízení a naopak v režimu jednoho až mnoha řídících zařízení s pouze jedním řízeným. Výhodou této sběrnice je, že realizuje přenos dat pouze po dvou linkách. Linka označená SCL (Serial clock) je nositelem hodinového signálu, zatímco linka s označením SDA (Serial Data) slouží k obousměrnému přenášení dat mezi řídícím a řízeným zařízením. Sběrnice I<sup>2</sup>C disponuje čtyřmi módy přenosové rychlosti. Přenosová rychlost ve standardním režimu dosahuje 100 kb/s a v nejrychlejším módu až 5 Mb/s.

## 2.3 API

Application programming interface (API), jak ho popisuje článek *What is an API key?* [1], je softwarové rozhraní, které umožňuje dvěma aplikacím spolu komunikovat, vyměňovat si data a informace. Toto rozhraní se uplatňuje v mnoha technických odvětvích, mezi které patří IoT, robotické systémy nebo strojové učení. Autorizace tohoto rozhraní se provádí skrze unikátní klíč API. Klíč API je dlouhý textový řetězec náhodně vygenerovaných znaků, který slouží jako unikátní identifikátor.

## 2.4 Li-ion baterie

Lithium-iontová (Li-ion) baterie patří do skupiny lithiových akumulátorů. Do této skupiny také patří lithium polymerové baterie. Baterie se skládá ze tří hlavních

částí: kladné elektrody, záporné elektrody a elektrolytu mezi nimi. Kladná elektroda je zpravidla vyrobena z oxidu kobaltito-litného ( $\text{LiCoO}_2$ ) nebo lithium-železitého fosfátu ( $\text{LiFePO}_4$ ), který se používá v novějších výrobcích. Záporná elektroda je nejčastěji vyrobena z grafitu.

Mezi výhody Li-ion baterií patří vysoké množství uložené energie, absence paměťového efektu a nižší cena. Li-ion baterie také mají poměrně dlouhou životnost a vysokou odolnost. Zpravidla se uvádí, že baterie by měla vydržet okolo 2000 nabíjecích cyklů. Li-ion patří do skupiny baterií, které lépe odolávají změnám teplot okolního prostředí.

Nevýhodou těchto baterií může být větší šance na vznícení nebo vytečení elektrolytu. Válcové Li-ion baterie na rozdíl od konkurenčních LiPo baterií neobsahují integrované ochranné obvody a ochranu baterie je nutné zajistit externě. Válcové Li-ion baterie zabírají poměrně hodně fyzického prostoru.

Základní informace o lithiových bateriích byly převzaty z článků *Lithium Ion vs. Lithium Polymer Batteries – Which Is Better?* [57] a *Lithium-ion batteries* [65].



# Kapitola 3

## Komunikace zařízení

Tato kapitola představuje možnosti bezdrátové komunikace zařízení. Zvýšená pozornost je věnována komunikaci přes Wifi, na které bude celý systém pracovat. Představen je také server Thingspeak a s ním spojená aplikace Thingview.

### 3.1 Možnosti bezdrátové komunikace

Možnosti bezdrátové komunikace tvořeného systému vycházejí z možností komunikace mikrokontroléru ESP32, který je řídicí jednotkou vnitřní i vnější jednotky meteorologického zařízení.

#### Bluetooth a BLE

Bluetooth je bezdrátová komunikační technologie používaná k přenosu dat na krátké vzdálenosti. Pracuje na frekvenci 2,4 GHz. K zahájení komunikace je třeba prvotní spárování zařízení. Původní technologie Bluetooth byla navržena ke kontinuálnímu přenosu většího množství dat, což však mělo negativní vliv na výdrž baterie bezdrátových zařízení. Společnost SIG, která dohlíží na vývoj této technologie, tedy v roce 2010 představila nízkoenergetickou variantu Bluetooth low energy (BLE). Jak uvádí článek *Bluetooth Vs. Bluetooth Low Energy: What's The Difference?* [52], BLE na rozdíl od klasického Bluetooth zůstává v režimu spánku, dokud není iniciováno spojení. Spojení trvá pouze krátkou dobu a poté se zařízení vrací do režimu spánku. BLE je tedy navržen k cyklickému přenosu menšího množství dat, což ho činí vhodným pro použití v IoT systémech.

#### ESP-NOW

ESP-NOW je komunikační technologie vytvořená samotnou firmou Espressif pro použití v systémech založených na ESP8266 a ESP32. Samotná firma Espressif ji popisuje [26] jako rychlou bezdrátovou komunikační technologii založenou na

přenosu krátkých paketů. Protokol pracuje na frekvenci 2,4 GHz a je podobný energeticky úspornému bezdrátovému spojení, které používají například chytré myši. Technologie vyžaduje před započítím přenosu spárování zařízení.

## Wifi

Wifi, jak je popsána v článku *Wi-Fi* [10], je bezdrátová síťová technologie, která využívá rádiové vlny k poskytování vysokorychlostního přístupu k internetu. Tato technologie poskytuje připojení k internetu prostřednictvím lokálního přístupového bodu (AP), kterým je nejčastěji router. Organizace Wifi Alliance, která v současnosti vlastní ochrannou známku této technologie, definuje Wifi jako jakýkoli bezdrátový lokální síťový produkt založený na standardu IEEE 802.11. Technologie využívá nelicencované frekvence 2,4 GHz a 5 GHz.

## 3.2 Zvolená forma komunikace

Pro zachování rozumné energetické spotřeby celého systému je třeba, aby obě jednotky trávily většinu času v režimu spánku, kdy je ale nelze probudit externím signálem a je třeba použít časovač. Pakliže má vnitřní a vnější modul komunikovat přímo, je pro úspěšné přenášení dat v delším časovém horizontu esenciální přesná časová synchronizace obou zařízení.

V rané fázi práce se nabízelo využít technologii BLE určenou pro systémy IoT. ESP-NOW byl však přímo navržen pro komunikaci dvou systémů řízených ESP32, proto byl otestován právě tento protokol. Výsledky však byly rozporuplné. Hlavním problémem byla zmíněná synchronizace probouzení obou modulů.

Souběžně s technologií ESP-NOW byla testována technologie Wifi. Prostřednictvím Wifi byla data odesílána na server Thingspeak, který nabízí možnost automatické analýzy a úschovy dat. Data uchována na serveru Thingspeak také mohou být snadno zobrazena v mobilní aplikaci. Vizualizace, analýza a vzdálený monitoring jsou faktory, které rozhodly, že zařízení bude ke komunikaci využívat pouze technologii Wifi, přičemž server Thingspeak bude fungovat jako prostředník mezi vnitřním a venkovním modulem.

### Výhody a nevýhody zvolené komunikace

Synchronizace buzení obou jednotek je i v případě použití Wifi důležitá. Je to ale zejména z důvodu aktuálnosti dat zobrazených vnitřní jednotkou. Z hlediska fungování celého systému není souběžné probouzení jednotek nutné. Přesto je v ovládacím programu vnitřní i vnější jednotky implementován shodný budící mechanismus založený na aktuálním čase, který zajišťuje přesnou synchronizaci dat získaných a zobrazených. Právě možnost získat aktuální čas z internetu je výhodou použití

Wifi a umožňuje systému pružně reagovat na různě dlouhou dobu strávenou v aktivním režimu. Použití serveru Thingspeak jako prostředníka s sebou nese výhodu uchování a vizualizace dat. Celá řada mobilních aplikací také nabízí možnost zobrazení dat uchovaných na Thingspeak, což dává uživateli možnost meteorologická data vzdáleně monitorovat. Celkově tento způsob komunikace přináší nezávislost obou jednotek.

Nevýhodou komunikace přes Wifi je určitě její dosah, přičemž velmi závisí na konkrétním prostředí, ve kterém se signál pohybuje a samozřejmě také na zdroji Wifi signálu, kterým je nejčastěji router. Typický dosah, jak uvádí například článek *What Is the Range of a Typical Wi-Fi Network?* [51], je zhruba 45 metrů uvnitř a dvojnásobek venku. Další nevýhodou může být bezpečnost spojení, jejíž míra ale znovu závisí na konkrétní síti. Nevýhodou může být i delší proces navazování spojení a nahrávání dat na server.

### Připojení na Wifi

Připojení na Wifi probíhá tím nejjednodušším způsobem. Přístupové údaje se zadají přímo do kódu jako proměnné. Knihovna *WifiManager* nabízí elegantnější řešení. ESP32 se nastaví jako přístupový bod (AP) a umožní okolním zařízením se připojit. Zadání přístupových údajů následně probíhá přes počítač nebo přes mobil. Implementovat tento způsob připojení v kombinaci s režimem spánku se ukázalo jako složité. V základním nastavení by režim spánku vždy zahodil přístupové údaje a ty by nebyly uchovány do dalšího cyklu. Byla testována implementace kódu, kdy se zadané přístupové údaje v prvním cyklu uloží do flash paměti ve formátu JSON a v každém dalším cyklu jsou z flash paměti vyvolávány. Test nedopadl úspěšně. Nicméně je velmi pravděpodobné, že zanedlouho budou k dispozici vzory kódů nebo celé knihovny, které problém řeší a tento způsob připojení bude snazší implementovat pro širší spektrum projektů.

## 3.3 Thingspeak

Thingspeak je open-source IoT platforma umožňující agregaci, vizualizaci a analýzu živých datových toků v rámci cloudu, která umožňuje uživateli komunikovat s množstvím zařízení připojených k internetu [60]. V online prostředí je prováděna okamžitá vizualizace dat. Služba velmi úzce spolupracuje s prostředím Matlab, které může sloužit jako nástroj pro analýzu v reálném čase.

### 3.3.1 Struktura služby Thingspeak

K používání Thingspeak je nutné mít založený účet u MathWorks, což je automaticky splněno, pokud uživatel někdy používal například programové prostředí Matlab.

Jednotlivé skupiny dat uchovávají takzvané kanály, které mohou mít až 8 položek. Tyto kanály mají unikátní číselný identifikátor (ID). Kanál může být buď soukromý nebo veřejný, přičemž veřejné kanály je možné prohlížet přímo na stránce <https://thingspeak.com/channels/public>. Je možnost kanál definovat jako soukromý i veřejný současně, přičemž tvůrce kanálu určuje, jaký výstup poskytne veřejné zobrazení. Kanál zobrazující data poskytovaná externím modulem byl zpřístupněn veřejnosti na odkazu <https://thingspeak.com/channels/1711912>.

Jak je zvykem u většiny podobných služeb, možnosti Thingspeak definuje stupeň uživatelské licence. Typy licence jsou Standard, Academic, Student a Home. Tento projekt pracuje na základní licenci. Ta umožňuje založit až 4 kanály. Roční počet odeslaných zpráv je omezen na tři miliony, což vychází na 8213 zpráv za den. Služba také umožňuje odesílat emailová upozornění (alerts), jejichž počet je omezen na 800 ročně.

Interakci s ostatními službami provádí Thingspeak přes klíče API, které jsou více popsány v sekci 2.3. Každý uživatel má svůj unikátní API klíč, který se využívá například ke spravování kanálů přes REST API. Upozornění (alerts) mají také svůj API klíč. Při založení každého kanálu jsou definovány dva API klíče. Jeden slouží k zapisování dat do kanálů (Write API Key) a druhý ke čtení dat z kanálu (Read API Key). Každý z těchto klíčů může být aktualizován. V případě aktualizace dojde k vymazání starého klíče a jeho nahrazení klíčem novým.

### 3.3.2 Čtení a nahrávání dat na Thingspeak

Ke čtení a nahrávání dat do kanálů jsou využívány zejména protokoly HTTP a MQTT. Data je zároveň možné importovat nebo exportovat jako soubor ve formátech CSV, XML nebo JSON.

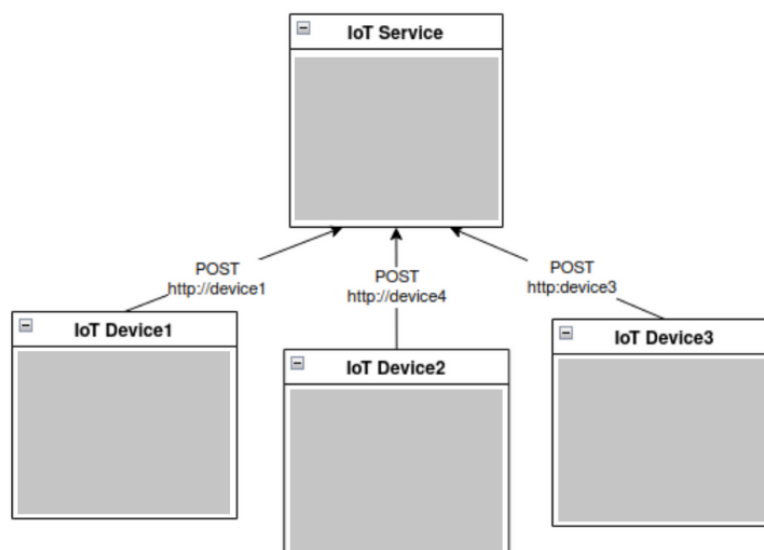
#### Import a export dat jako souboru

Kanály umožňují nahrát a stahovat data ve formátu CSV. Nahrání dat musí mít specifickou strukturu, k čemuž je k dispozici šablona. Je možné stáhnout celou historii provozu kanálu ve formátu CSV. K dispozici je i možnost stažení posledních 100 vstupů ve formátech JSON, XML a CSV.

## HTTP

HyperText Transfer Protocol (HTTP) je všeobecně známý jako jedna z technologií umožňujících fungování webových prohlížečů. Funguje na principu požadavku (request) od klienta a odpovědi (response) serveru. Servery obsahují prostředky, které jsou identifikovány adresami URL. Na adresy URL mohou klienti HTTP zadávat požadavky. V normálním webovém prostředí je jednoduchým modelem webový prohlížeč, který načítá webové stránky ze serveru metodou GET. Z hlediska IoT, jak je popsáno v článku MQTT Vs. HTTP for IoT [19], je běžným použitím HTTP umožnit zařízením využít dotazovací metodu POST k nahrání dat na IoT server. Tento proces ilustruje obrázek 3.1.

Jednodušší využití protokolu HTTP pro spojení s Thingspeak zajišťuje knihovna *thingspeak-arduino* [40], kterou zprostředkovává přímo MathWorks.



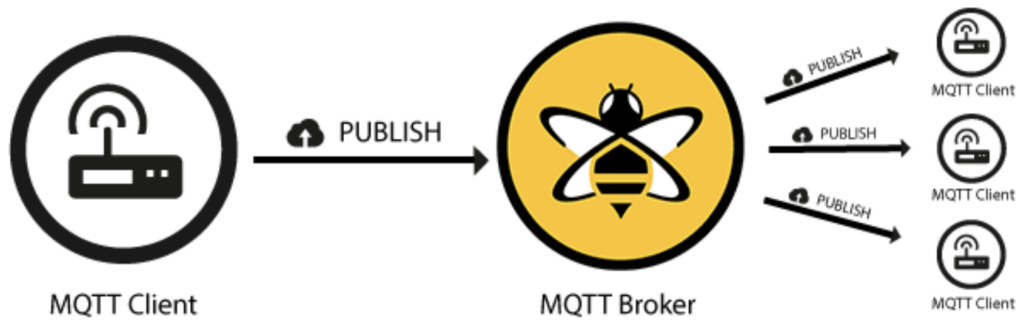
Obrázek 3.1: Využití HTTP v rámci IoT [20]

## MQTT

MQTT je na základě popisu v článku *MQTT Essentials* [34] nejběžněji používaný protokol pro zasílání zpráv v rámci internetu věcí (IoT). MQTT se často používá pro zasílání zpráv a výměnu dat mezi IoT a průmyslovými IoT (IIoT) zařízeními, jako jsou vestavěná zařízení, senzory nebo průmyslové logické automaty. Protokol je řízen událostmi a propojuje zařízení pomocí vzoru publikovat a předplatit (pub/sub), což vizualizuje obrázek 3.2. Odesílatel (publisher) a příjemce (subscriber) komunikují prostřednictvím takzvaných Témat (Topics) a jsou od sebe navzájem odděleni. Propojení mezi nimi má na starosti broker MQTT. Broker má roli

zprostředkovatele, přičemž filtruje všechny příchozí zprávy a správně je distribuuje předplatitelům. Tento protokol ke svému provozu potřebuje TCP/IP.

Ke zprovoznění MQTT v rámci Thingspeak je nutné přidat MQTT zařízení v záložce **devices**. Pro konkrétní zařízení jsou vygenerovány unikátní identifikační údaje zahrnující jméno, heslo a klientské ID. Tyto údaje jsou nutné k úspěšnému zprovoznění komunikace s Thingspeak přes MQTT.



Obrázek 3.2: MQTT a princip architektury Publish/Subscribe [21]

### 3.3.3 Aplikace Thingview

Thingview je jednoduchá mobilní aplikace, která umožňuje vizualizovat kanály vytvořené v rámci služby Thingspeak. K prohlížení veřejných kanálů stačí zadat identifikační číslo kanálu a data jsou zpřístupněna, přičemž prostředí respektuje uživatelské nastavení. Soukromé kanály je možné zpřístupnit zadáním unikátního čtecího klíče API (Read API Key). Při prohlížení soukromých kanálů je prostředí definováno nastavením tvůrce kanálu. Aplikace zabírá necelých 40 MB a k jejímu provozu je třeba Android 4.1 nebo novější. V prostředí Android Thingview využívá přes 50 000 uživatelů. Aplikace je dostupná i pro systém iOS. Vzhled aplikace zachycují snímky 10 a 11 v příloze B.

# Kapitola 4

## Externí jednotka

Tato kapitola se zabývá realizací venkovního modulu meteostanice. Objasňuje volbu řídicí jednotky, použitých senzorů a dalších hardwarových komponent. Představuje ochranné pouzdro jednotky. Kapitola také mapuje tvorbu programovacího softwaru pro danou jednotku.

### 4.1 Požadavky na externí jednotku

Primárním úkolem venkovní jednotky je v pravidelných intervalech sbírat data z připojených meteorologických senzorů a následně je odeslat internetovému serveru, ze kterého si vnitřní jednotka data stáhne. Tyto úkony musí realizovat za minimální energetické spotřeby, kterou může podpořit alternativní napájení.

#### Řídicí jednotka

Řídicí jednotka musí být vybavena možnostmi bezdrátové komunikace a sběrnici pro připojení externích senzorů. Nejčastější připojení senzorů je buď po sběrnici SPI nebo I<sup>2</sup>C. Součástí původního zadání bakalářského projektu je požadavek na použití mikrokontroléru ESP32, který je pro tento účel vhodnou volbou a výše uvedené technické požadavky beze zbytku splňuje. ESP32 je popsán v úvodu kapitoly 2.

#### Provoz zařízení

K zachování optimální spotřeby by měla řídicí jednotka trávit maximum času v režimu spánku, kdy je k jejímu provozu zapotřebí minimum energie. Do aktivního režimu by se měla pravidelně probouzet, co nejrychleji vykonat potřebné úkony a znovu se vrátit do režimu spánku. Během času stráveném v aktivním režimu by měla odečíst data z připojených senzorů, zkalibrovat je a převést na uživatelsky čitelný formát. Jednotka následně odešle data internetovému serveru prostřednictvím Wifi.

## Baterie

V externím modulu je od baterie potřeba zejména dlouhá životnost a odolnost. Jednat se musí o nabíjecí baterii s vysokým maximálním počtem nabíjecích cyklů. Baterie bude vystavena konstantnímu odběru malého proudu v režimu spánku a nárazovému odběru vyššího proudu (až 500 mA) v aktivním režimu, ke kterému bude docházet zhruba 40× za den. Baterie bude konstantně nabíjena solární nabíječkou. Venkovní modul spolu s baterií bude také vystaven celoročním teplotním změnám, které by neměli výrazně snižovat životnost baterie.

## Venkovní pouzdro

Pouzdro externí jednotky má především ochrannou funkci. Musí v něm být bezpečně uložen celý elektronický systém spolu se senzory a baterií. Materiál by měl být odolný proti nepříznivým klimatickým podmínkám, jako jsou déšť, mráz nebo vítr. Zároveň by prostředí uvnitř pouzdra mělo do jisté míry kopírovat klimatické podmínky vně pouzdra, aby bylo dosaženo maximální věrohodnosti dat snímaných senzory. Toho lze docílit integrováním cirkulačních otvorů, kterými by ale zároveň neměla vnikat voda nebo hmyz.

## 4.2 Řídicí modul

Řízení vnější jednotky zajišťuje vývojová deska ESP32 DevKit V1. Jedná se zřejmě o komerčně i finančně nejdostupnější vývojovou desku s ESP32. Deska DevKit V1 je vystavěna okolo čipu ESP32-WROOM-32. Je dostupná ve verzi se 30 nebo 36 piny. Použita je prostorově úspornější verze se 30 piny, jejichž funkce zachycuje obrázek 4.1.

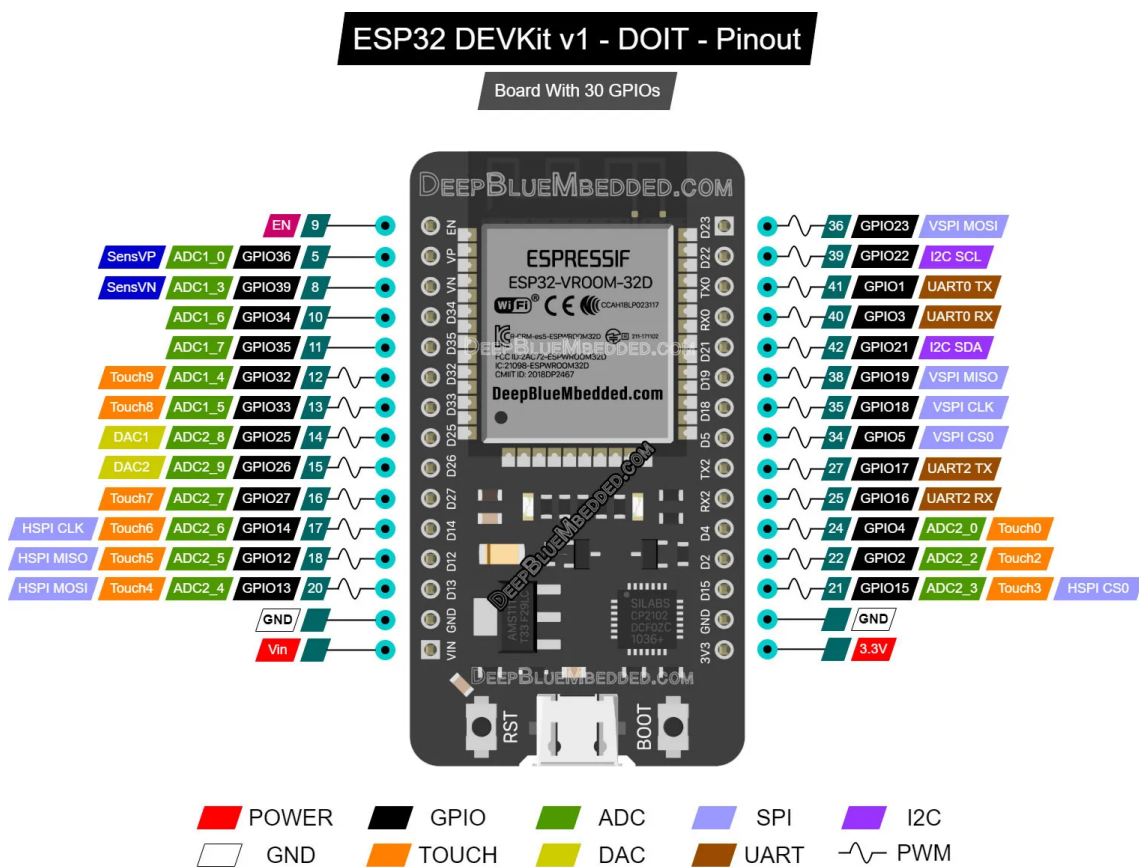
Vývojové deska je vybavena USB - sériovým převodníkem CH9102X, který přináší integrovanou programovací kompatibilitu. Převodník zajišťuje komunikaci typu full-duplex. Desku je možné kabelem propojit s počítačem přes micro USB konektor.

K regulaci vstupního napětí je deska vybavena lineárním napěťovým regulátorem AMS1117. Ten je potřebný k regulaci stejnosměrného napájecího napětí generovaným při připojení USB. Napětí USB činí 5 V a je regulováno na hodnotu 3,3 V vyžadovanou vstupně výstupními piny. Na provozním napětí 3,3 V pracuje i množství dostupných senzorů, které lze k desce připojit.

Na vývojové desce jsou integrovány dvě LED diody. Jednu je možné softwarově ovládat. Druhá dioda je zapojena přímo v napájecí cestě a nelze ji softwarově ovládat. Tato dioda je v provozu, kdykoli je deska napájena, což je v mé aplikaci nepřetržitě. V zájmu snížení spotřeby byla druhá dioda manuálně odebrána. Článek *ESP32 Active Mode and Deep Sleep Mode Power Consumption Comparison* [33],



který podrobně mapuje měření spotřeby této vývojové desky, poznamenává, že dioda může trvale odebírat až 2 mA. Odstranění této diody napomáhá optimalizaci spotřeby celého systému.



Obrázek 4.1: Vývod pinů DevKit V1 [47]

## ESP32-WROOM-32

Dle informací obsažených v katalogovém listu [25] se jedná se o výkonnou kontrolní jednotku (MCU). Jádrem této jednotky je čip s označením ESP32-D0WDQ6. Modul je vybaven dvěma nezávislými procesory. Z modulu je vyvedeno 38 pinů. K dispozici jsou 4 MB paměti flash. WROOM-32 je nejrozšířenějším modulem mikrokontroléru ESP32.

## Komunikace senzorů s řídicím modulem

Většina připojených senzorů využívá ke komunikaci s vývojovou deskou sběrnici I<sup>2</sup>C, která je detailněji popsána v sekci 2.2. Této sběrnici jsou dedikovány vstupně-výstupní piny GPIO21 a GPIO22. GPIO21 slouží k zapojení linky SDA (Serial Data) a na GPIO22 je připojena linka SCL (Serial Clock). Na tyto piny je možné připojit více senzorů, které jsou odlišeny svou unikátní I<sup>2</sup>C adresou. V případě potřeby<sup>1</sup> je

<sup>1</sup>Například při zapojení více totožných senzorů

možné tuto adresu softwarově změnit.

## 4.3 Hardwarové komponenty

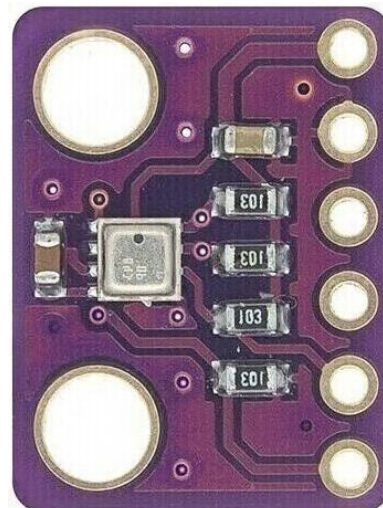
Tato podkapitola představuje vybrané senzorové moduly a způsob jejich integrace v systému. Dále jsou představeny komponenty určené k napájení externí jednotky, která zahrnuje systém solárního dobíjení.

### 4.3.1 Senzor tlaku, vlhkosti a teploty

Jednotné měření tlaku, vlhkosti a teploty zajišťuje modul senzoru BME280. Zásadním kritériem pro volbu tohoto senzoru byla jeho nízká spotřeba a snadná programovatelnost. Senzor je také možné uvést do režimu spánku. Na trhu je dostupná verze se šesti vývody a verze se čtyřmi vývody, která nemá vyvedeny piny označené CSB a SDO. Náhled přední a zadní strany senzoru zachycují obrázky 4.2 a 4.3.



Obrázek 4.2: Přední strana BME280 [2]



Obrázek 4.3: Zadní strana BME280 [3]

### BME280

BME280 je senzor integrující měření tlaku, vlhkosti a teploty. Katalogový list výrobce [14] ho popisuje jako vhodný pro baterií napájené aplikace, kdy je zásadní jeho nízká spotřeba. Při měření všech tří veličin udávaná spotřeba dosahuje  $3,6 \mu\text{A}$ . V režimu spánku by měla klesnout pod  $0,3 \mu\text{A}$ . Senzor pracuje na operačním napětí  $1,71 \text{ V}$  až  $3,6 \text{ V}$ . Komunikovat může přes sběrnice SPI a I<sup>2</sup>C.

- Senzor vlhkosti nabízí měření s vysokou přesností v širokém teplotním rozsahu. Relativní vlhkost měří v kompletním rozsahu 0 % RV až 100 % RV. V rozsahu 20 % RV až 80 % RV je uváděná tolerance senzoru  $\pm 3 \%$  RV.

- Senzor tlaku je senzor absolutního barometrického tlaku se skvělou přesností a vysokým rozlišením. Hodnotu odečtenou tímto senzorem je třeba kalibrovat. Tlak měří v rozsahu 300 hPa až 1100 hPa. Uváděná absolutní přesnost v daném rozsahu je  $\pm 1,7$  hPa.
- Teplotní senzor je optimalizovaný pro vysoké rozlišení a nízký šum. Jeho výstup je určen především k teplotní kompenzaci senzorů vlhkosti a tlaku. Může být použit k estimaci okolní teploty. Teplotu lze měřit v rozsahu  $-40$  °C až  $65$  °C, ve kterém je uváděná absolutní přesnost  $\pm 1$  °C.

Všechny senzory dosahují nejvyšší přesnosti v teplotním rozsahu  $0$  °C až  $65$  °C, mohou však pracovat v maximálním teplotním rozsahu  $-40$  °C až  $85$  °C.

### Kalibrace senzoru tlaku

Senzor barometrického tlaku v základním nastavení je třeba kalibrovat. To lze provést prostým přičtením určité hodnoty k hodnotě čtené senzorem. Tato hodnota závisí na elevaci dané lokality. K zjištění hodnoty tlaku ve zkoumané lokalitě byly použity vysoce přesné údaje letištního systému METAR vztahující se k letišti v těsné blízkosti lokality měření. Hodnoty byly kontrolovány v průběhu několika dní, přičemž se hodnota čtená senzorem a hodnota určená systémem METAR lišila vždy o zhruba 25 hPa. Konstanta 25 je tedy přičtena k hodnotám čteným senzorem.

### Zapojení a umístění senzoru

Modul senzoru má vyvedeno 6 pinů, přičemž pouze 4 jsou v zapojení využity. Komunikace s mikrokontrolérem probíhá přes sběrnici I<sup>2</sup>C na adrese  $0 \times 76$ . Pin s označením SCL je připojen na pin GPIO22. Pin SDA je připojen na GPIO21. Napájení senzoru je zajištěno připojením na výstup napěťového regulátoru, který generuje napětí v požadovaném operačním rozsahu. Zemnicí vývod senzoru s označením GND je připojen na vývod mikrokontroléru se stejným označením. Senzor je zapojen na okraji desky plošných spojů z důvodu minimálního ovlivňování jím měřených parametrů ostatními komponentami na desce. Umístěn je hluboko v pouzdře těsně nad spodním dílem, aby byl maximálně stíněn. Tato opatření by měla zajistit optimální podmínky pro odečet meteorologických hodnot, zejména teploty.

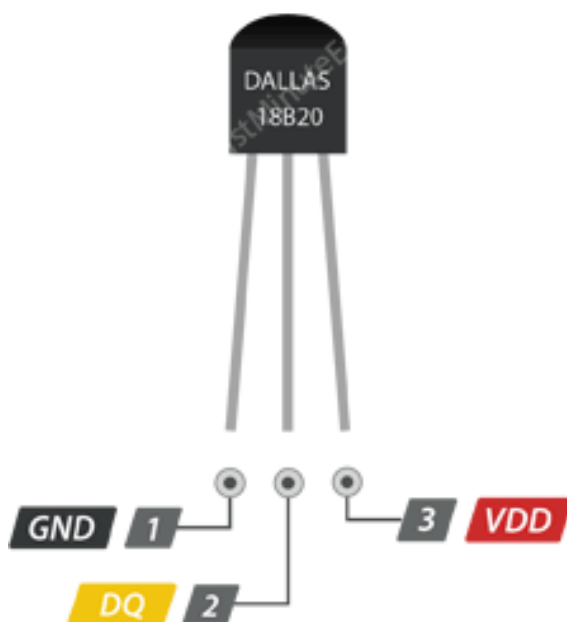
### 4.3.2 Senzor teploty

Senzor BME280 zajišťuje měření teploty. Nicméně BME280 je zejména přesný senzor barometrického tlaku a vlhkosti, přičemž integrované teplotní čidlo slouží především k teplotní kompenzaci zmíněných dvou senzorů. Výrobce v katalogovém listu BME280 [14] uvádí, že teplotní čidlo je možné použít k estimaci okolní teploty.

K zajištění spolehlivějšího měření teploty byl do systému přidán dedikovaný teplotní senzor DS18B20.

## DS18B20

DS18B20 je digitální teplotní senzor, který nabízí 9bitové až 12bitové měření teploty. Čidlo komunikuje pouze přes jednu datovou linku označenou DQ. Výrobce v katalogovém listu uvádí [49], že senzor je schopen měřit v teplotním rozsahu  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , přičemž v rozmezí  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  dosahuje přesnosti  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Čidlo je k dispozici ve standardním plastovém pouzdře nebo v masivnějším voděodolném provedení. Použito je standardní provedení senzoru, které je spolu s popisem jednotlivých vývodů zachyceno na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Senzor DS18B20 v klasickém pouzdře [42]

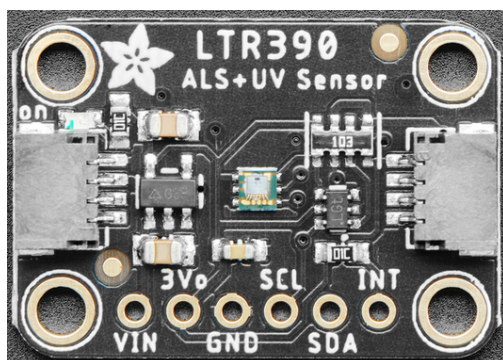
## Zapojení a umístění senzoru

Z pouzdra jsou vyvedeny 3 linky s označením Vcc, DQ a GND. Senzor je možné napájet standardně nebo parazitně. V parazitním módu je čidlo napájeno z pinu DQ a k zapojení stačí pouze dvě linky. Vlastní zapojení je provedeno standardně, kdy jsou třeba všechny 3 linky, přičemž výrobce doporučuje zapojit mezi DQ a Vcc  $4,7\text{k}\Omega$  rezistor, což je v zapojení provedeno. Vývody Vcc a GND jsou přivedeny na piny řídicí jednotky se stejným značením. Linka DQ je přivedena na vstupně výstupní pin s označením GPIO4.

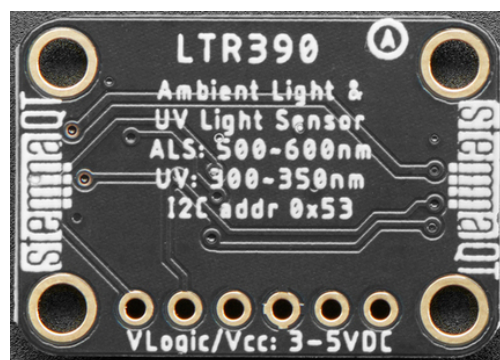
Senzor je na DPS umístěn pod vývojovou deskou blíže okraji desky. Stejně jako u senzoru BME280 by měla tato poloha zajistit optimální stínění senzoru pro odečítání teploty.

### 4.3.3 Senzor intenzity světla a indexu UV záření

Měření intenzity světla a indexu UV záření zajišťuje modul senzoru LTR390 od firmy Adafruit. Modul je vystavěn okolo optického senzoru LTR-390UV-01. Na modulu jsou vyvedeny dva čtyřpinové JST-PH konektory, které jsou dedikovány sběrnici I<sup>2</sup>C. Další možností zapojení senzoru je šestice pinů připravených pro samostatné zapájení. Přítomnost napájení indikuje zelená LED dioda nad jedním z konektorů, která byla v rámci snížení spotřeby systému manuálně odebrána. Rozměry modulu jsou 3×2 cm. Přední a zadní stranu senzoru zachycují obrázky 4.5 respektive 4.6.



Obrázek 4.5: Přední strana LTR390 [61]



Obrázek 4.6: Zadní strana LTR390 [62]

#### Optický senzor LTR-390UV-01

Katalogový list [46] představuje LTR-390UV-01 jako senzor, který integruje senzory pro měření intenzity okolního světla (ALS) a ultrafialového záření (UVS) na ploše 2×2 mm. Přesnost ALS je přes všechny světelné zdroje  $\pm 25\%$ . Přesnost UVS je pro UV index nižší než pět  $\pm 1\%$  a pro UV indexy vyšší než pět  $\pm 20\%$ . Senzor přeměňuje vstupní veličinu, kterou je intenzita záření, na digitální výstupní signál, což umožňuje přímou komunikaci po sběrnici I<sup>2</sup>C s mikrokontrolérem. Senzor je vhodný k použití za vysokého jasů. Provozní napětí je 1,7 V až 3,6 V. Rozlišení senzorů lze nastavit na hodnotu 13 až 20 bitů. Výrobce vyzdvihuje velmi nízkou spotřebu a možnost uvést senzor do režimu spánku.

#### Kalibrace senzoru

Z důvodu ochrany před deštěm a dalšími vnějšími vlivy je senzor umístěn pod ochrannou vrstvou integrovanou ve vnějším obalu. Tuto vrstvu tvoří pevná plastová

fólie. Tato modifikace samozřejmě mění hodnoty získané senzorem, které je třeba kalibrovat.

Kalibrační měření bylo provedeno za denního světla při různých intenzitách slunečního světla. Měření probíhalo na přímém slunci, stínu a polostínu. Ve velmi krátkém časovém sledu byly odečítány dvojice hodnot. Jednou byl senzor překryt fólií a poté byla folie odebrána.

Výpočet hodnoty intenzity okolního světla je v katalogovém listu [46] popsán vztahem

$$Lux_{calc} = \frac{0.6 \cdot ALS_{DATA}}{GAIN \cdot INT} \cdot W_{FAC}. \quad (4.1)$$

Pro účely kalibrace je podstatná multiplikativní konstanta  $W_{FAC}$ , která závisí pouze na použitém krytu senzoru. Bez použití krytu je tato konstanta rovna 1. Poměr odečítaných hodnot intenzity okolního světla bez fólie a s fólií vycházel na přímém slunci 1,16, v polostínu byl poměr 1,13 a ve stínu 1,2. Poměr všech sesbíraných hodnot za všech podmínek vyšel zhruba 1,15. Konstantou 1,15 jsou odečítané hodnoty násobeny.

Výpočet hodnoty UV indexu z hodnoty získané senzorem je v katalogovém listu [46] popsán vztahem

$$UVI_{calc} = \frac{UVSensorCount}{UVSensitivity} \cdot W_{FAC}. \quad (4.2)$$

Role konstanty  $W_{FAC}$  je stejná jako v předchozím případě, její hodnoty pro měření UV indexu a intenzity okolního světla však nejsou totožné! Poměr hodnot UV indexu bez fólie a s fólií vycházel na přímém slunci a ve stínu 1,56. V polostínu byl poměr 1,45. Poměr všech sesbíraných hodnot za všech podmínek byl zhruba 1,5, což je konstanta, kterou jsou odečítané hodnoty kalibrovány.

## Zapojení a umístění senzoru

Pro provoz senzoru je nutné, aby na něj přímo dopadalo okolní světlo. Jeho přímé zapojení na desku plošných spojů tedy není možné. Ve vrchním krytu pouzdra vnější jednotky je integrován prostor pro uchycení tohoto senzoru dvěma krátkými šroubky rozměru M2.5. Senzor je proti vnějším vlivům kryt plastovou fólií. Ke komunikaci s řídicí jednotkou je využita sběrnice I<sup>2</sup>C. Spojení senzoru s DPS zajišťují integrované konektory, z nichž vede čtyřvodičový (Vcc, GND, SCL a SDA) kabel do vývodů integrovaných v DPS.

### 4.3.4 Baterie

V rámci splnění požadavků definovaných v sekci 4.1 byla pro napájení externího modulu zvolena baterie typu Li-ion, které se vyznačují vysokou kapacitou, odolností

a dlouhou životností. Tento typ baterie je blíže popsán v sekci 2.4.

Venkovní modul je napájen akumulátorem GeB Li-ion 18650 3000mAh 3.7 V. Tuto baterii vyrábí čínská společnost General Electronics Technology a v Česku ji distribuuje firma Laskakit. Uváděná kapacita baterie je 3000 mAh. Nominální napětí je pro tento typ klasických 3,7 V a nabíjecí napětí 4,2 V. Standardní nabíjecí i vybíjecí proud výrobce v katalogovém listu [31] definuje na 600 mA s maximálními hodnotami 1,5 A. Výrobce dále uvádí, že baterie je schopna pracovat v teplotním rozmezí -10 až 45 °C, což jsou zhruba teplotní hranice, ve kterých by se měl systém celoročně pohybovat.

### Ochrana baterie

Válcové lithium-iontové baterie nedisponují integrovanými ochrannými obvody. Určitou ochranu baterie poskytuje solární nabíjecí modul CN3791 popsáný v následující sekci 4.3.5. Pro zajištění maximální ochrany baterie byl k pouzdru připojen ochranný obvod od firmy Laskakit, viz [41]. Tento obvod zajišťuje ochranu proti zkratu a přetížení. Dále obvod chrání před přebitím nad  $(4,25 \pm 0,05)$  V a podbitím pod 2,54 V. Zajištěna je také nadproudová ochrana s limitem 3 A, přičemž maximální pracovní proud je stanoven na 2 A. Provozní teplota obvodu je -40 °C až 50 °C.

### Monitorování stavu baterie

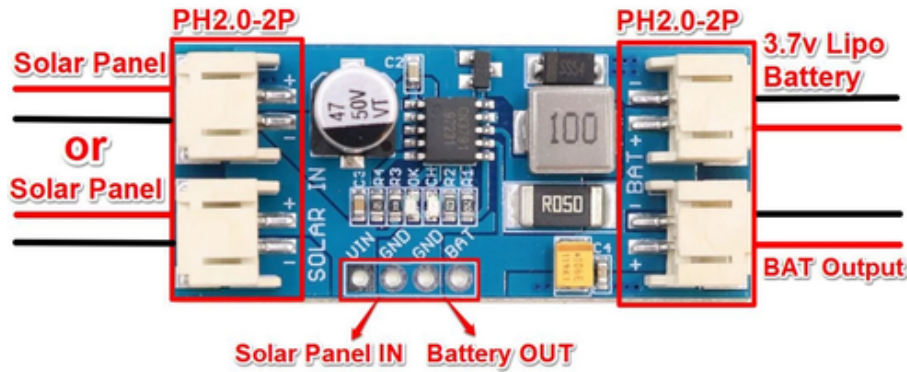
Pro monitorování stavu baterie slouží jednoduchý odporový dělič. Toto řešení má nevýhodu, že do děliče bude neustále odtékat nějaký proud. Tento fakt by měly kompenzovat mimořádně vysoké hodnoty odporů. Odpor  $R_1$  má hodnotu 3,6 M $\Omega$  a odpor  $R_2$  10 M $\Omega$ . Při těchto odporech by se děličem trvale odebíraný proud měl pohybovat ve řádu stovek nA. Vůči proudu trvale odebíraném vývojovou deskou<sup>2</sup> je tento proud zanedbatelný. Výstup 10M $\Omega$  rezistoru je připojen na GPIO33 řídicího modulu, kde je napětí měřeno 12bitovým analogově digitálním převodníkem.

### 4.3.5 Solární nabíjecí modul

Solární napájení systému řídí solární nabíjecí modul CN3791 MPPT, jež je spolu s popiskem zachycen na obrázku 4.7. CN3791 MPPT je vystavěn kolem regulátoru CN3791. Tento modul umožňuje zapojení jednoho až tří solárních panelů, přičemž optimalizuje jejich výkon, což zajišťuje technologie MPPT. Modul umožňuje nabíjet lithiovou baterii a její výstup přivést do systému. Z desky jsou vyvedeny čtyři konektory typu JST-PH 2.0. Dva slouží k zapojení solárních panelů, jeden k zapojení baterie a poslední lze použít jako výstup baterie. Připravena je i čtveřice pájecích

<sup>2</sup>V aktivním režimu se jedná o stovky mA a v režimu spánku o jednotky mA.

vývodů, z nichž dva se dají použít k zapojení dalšího solárního článku a zbylé dva slouží k zapojení baterie. Na modulu jsou dvě diody indikující průběh nabíjení respektive úplné nabití připojené baterie.



Obrázek 4.7: Solární nabíjecí modul CN3791 [4]

V systému je použit modul optimalizovaný pro 6 V solární články.

## CN3791

Výrobce definuje CN3791 [18] jako PWM spínaný regulátor určený pro nabíjení lithium-iontových baterií v režimu konstantního proudu a konstantního napětí. CN3791 může být napájen solárním článkem, přičemž pro zajištění maximálního výkonu je regulátor vybaven funkcí MPPT.

V režimu konstantního napětí může být regulační napětí pevně nastaveno na 4,2 V s přesností  $\pm 1\%$ . Konstantní nabíjecí proud je programovatelný pomocí jediného snímacího rezistoru. Regulátor snese nabíjecí proud až 4 A.

CN3791 je vybaven ochrannými mechanismy, které zahrnují ochranu proti přepětí a nízkému napětí. Regulátor automaticky přejde do režimu spánku, když je vstupní napětí nižší než napětí baterie. Součástí je také vybavena funkcí soft start zajišťující plynulý začátek nabíjecího cyklu.

## MPPT

Maximum power point tracking (MPPT), jak ho popisuje diplomová práce Regulátor pro nabíjení NiMH akumulátorů z fotovoltaického panelu [39], je metoda sledování bodu maximálního výkonu, která má za úkol zajistit maximální efektivitu přeměny slunečního záření na elektrickou energii. Volt-ampérová charakteristika fotovoltaického panelu je nelineární a výstupní výkon se mění v závislosti na intenzitě



dopadajícího záření a teplotě. MPPT regulátory mají za úkol automaticky přizpůsobit napětí a proud těmto změnám za účelem dosažení maximálního výkonu za daných podmínek.

### Zapojení modulu

K zapojení modulu do systému jsou využity kruhové pájecí vývody. Modul je připojen na desku plošných spojů čtyřpinovým konektorem, přičemž pouze dva piny jsou využity. Pin GND je připojen na zem. Pin s označením BAT je připojen na kladný pól baterie, monitorovací napěťový dělič a vstupní pin napěťového regulátoru. Solární panel je připojen dvou vodičovým kabelem na jeden z integrovaných konektorů typu JST-PH 2.0.

#### 4.3.6 Solární panel

Systém využívá polykrystalický solární panel s jmenovitým napětím 5 V. Dle stránek prodejce je tento panel schopen dodat výkon až 1 W. K produktu není k dispozici katalogový list, ale pouze informace na stránkách prodejce, viz[5]. Zde je vyzdvížena odolnost článku proti vnějším vlivům, zejména mrazu a větru. Článek by měl být efektivní i za nižší intenzity světla. Rozměry panelu jsou 60×110 mm.

Nezatížený solární panel byl krátce otestován za několika podmínek. Při testování na přímém slunci za nejlepších možných podmínek bylo změřeno napětí 6,6 V a proud 150 mA. Tyto hodnoty skutečně odpovídají výkonu 1 W. Mimo přímé slunce bylo změřeno napětí 5 V a proud okolo 25 mA. Ve stínu napětí na panelu kleslo pod 2 V a proud se pohyboval v nižších jednotkách mA.

### Nastavení úhlu panelu

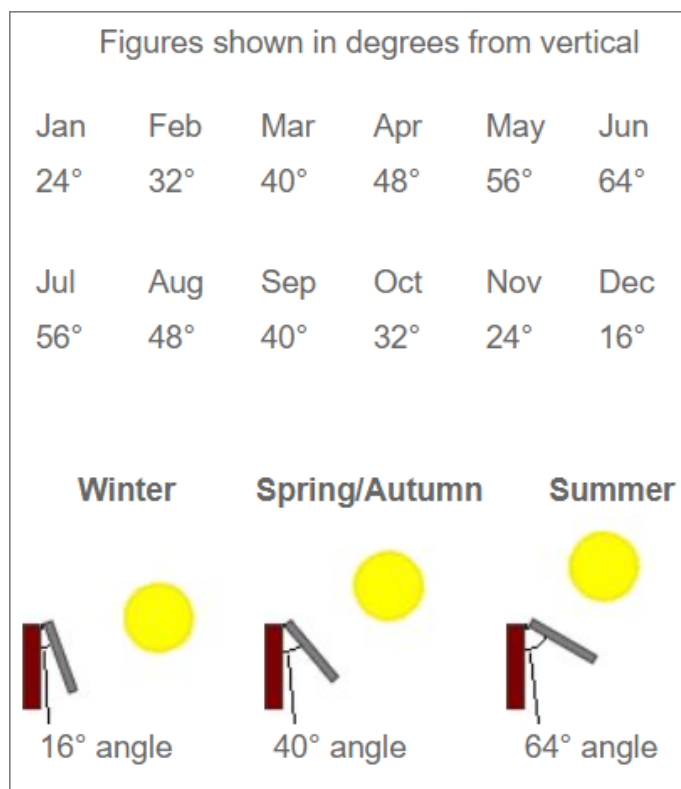
Na základě kalkulačky publikované v článku *Solar Angle Calculator* [16] se vhodný náklon<sup>3</sup> solárního panelu v ČR pohybuje mezi 64° a 16° v závislosti na ročním období. Jak ukazují výsledky kalkulace pro Prahu zachycené v obrázku 4.8, v zimě je vhodná vertikálnější poloha a v létě horizontálnější. Úhel solárního panelu je optimalizován na podzim a zimu, protože v tomto období bude celý systém náchylnější k vybíjení. Náklon panelu je pevně nastaven 60°.

#### 4.3.7 Napěťový regulátor

Výstupní napětí solárního modulu CN3791 je shodné s výstupním napětím baterie Li-ion. Může tedy dosahovat až 4,2 V. K napájení modulu DevkitV1 i senzorů

---

<sup>3</sup>Úhel náklonu je v práci počítán od horizontální polohy panelu (ležícího na zemi). V článku je úhel odečítán od svislé polohy.



**Obrázek 4.8:** Ideální úhel náklonu solárního panelu v Praze [16]

je tedy třeba napětí regulovat na konstantní hodnotu 3,3 V. K tomuto účelu je použit napěťový regulátor MCP1700.

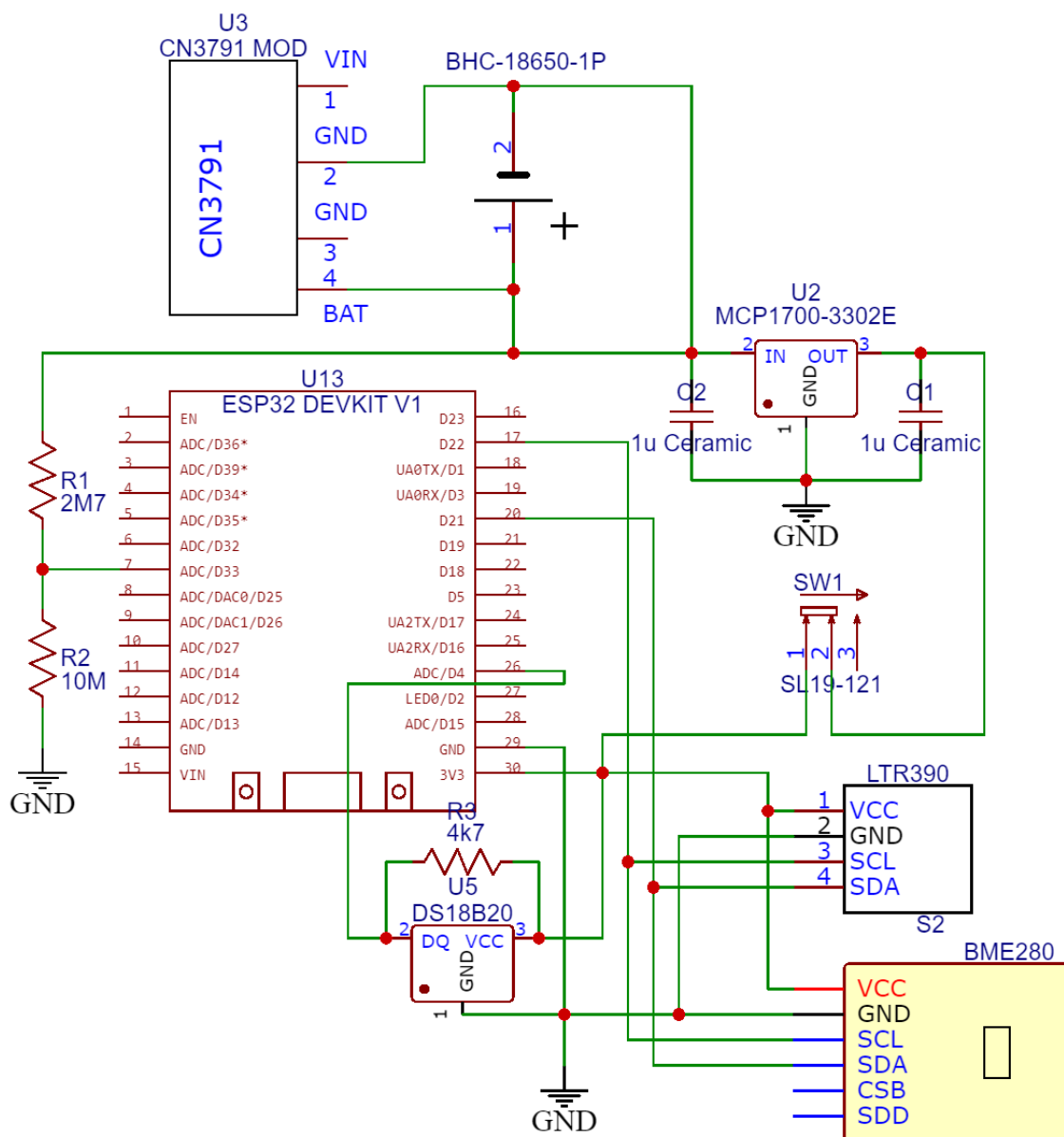
Katalogový list výrobce [50] definuje MCP1700 jako rodinu regulátorů s nízkým napěťovým výstupem založených na technologii CMOS. Jako jejich hlavní výhoda je uváděn nízký klidový proud, jehož typická hodnota je 1,6  $\mu\text{A}$ . Tato součástka umožňuje regulovat vstupní napětí v rozsahu 2,3 až 6 V, což ji činí vhodnou pro použití v bateriích napájených aplikacích. Výstupní napětí dodává v rozsahu 1,2 V až 5 V. Regulátor v sobě integruje nadproudovou ochranu a ochranu před vysokou teplotou. K zajištění stabilního výstupu je doporučeno zařadit keramické, tantalové nebo hliníkové kondenzátory s kapacitou 1  $\mu\text{F}$ .

V zapojení je využít model regulátoru s konkrétním označením MCP1700-3302e-TO, který reguluje vstup na konstantní výstupní napětí 3,3 V, na kterém celé zařízení pracuje. Regulátor je uzavřen v standardním pouzdru se třemi vývody s označením GND, IN a OUT. Za vstupní i výstupní pin je zařazen keramický kondenzátor s kapacitou 1  $\mu\text{F}$ , jak je doporučeno výrobcem.

## 4.4 Návrh desky plošných spojů

Schematické zapojení i následný návrh desky plošných spojů byl realizován online v editoru EasyEda. Editor umožňuje hotový návrh předat k výrobě firmě

JLPCB, která během 24 hodin zahájí výrobu.



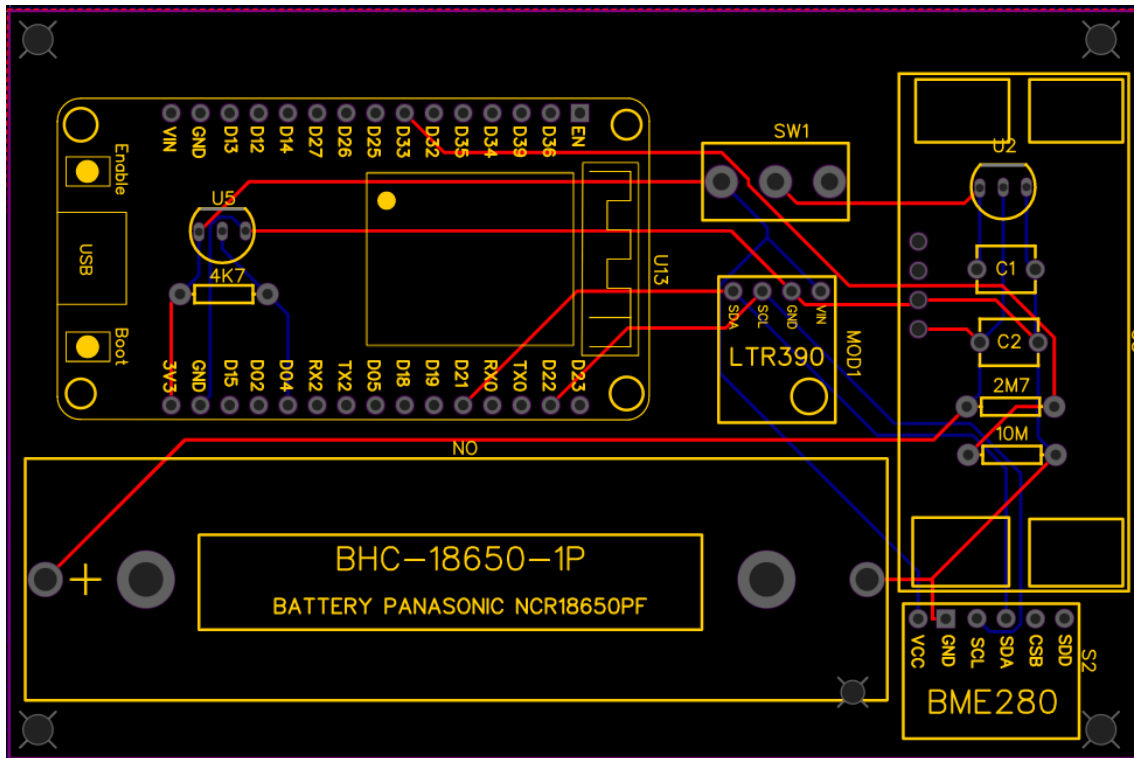
Obrázek 4.9: Schéma zapojení externí jednotky

### Schéma obvodového zapojení

K realizaci obvodového zapojení bylo využito množství uživatelských modelů součástek. Databáze nabízela modely většiny použitých komponent. U některých byla upravena rozteč pinů nebo byla komponenta zrcadlově otočena, aby přesně odpovídala konkrétnímu provedení použitých součástek. Schéma zapojení je zachyceno na obrázku 4.9.

## Vlastní návrh plošného spoje

Deska plošných spojů se skládá ze dvou vrstev. Zavedení cest provedl automatizovaný software, přičemž šířka cest byla definována na 0,3 mm a ochranná oblast na 0,2 mm. Na celou desku byla zavedena oblast mědi (copper area) vztažená k zemi, což zlepšuje impedanční, tepelné i další vlastnosti desky. Rozměry DPS jsou 98×65 mm. V rozích a v oblasti baterie byly připraveny otvory pro montáž. Design desky je zachycen na obrázku 4.10.



Obrázek 4.10: Finální design desky plošných spojů

## Osazení desky

Pro zapojení většiny součástek byly využity dutinkové, případně kolíkové lišty. Ve fázi testování dodává tento způsob zapojení flexibilitu a umožňuje komponenty snadno odebrat, aniž by došlo k poškození. Levnější součástky byly na desku zapájeny přímo. Pouzdro na baterii je navíc upevněno dvěma plastovými šroubky rozměru M3, aby nebyly bateriové konektory namáhány. Ochranný obvod je k pouzdru baterie připájen externě. Na desce je také integrován posuvný spínač mezi baterií a řídicí jednotkou, který slouží k případnému odpojení baterie od systému. K zajištění ochrany součástek proti vnějším vlivům je na konektory kompletně osazené desky nanesen pasivační sprej, jehož aplikace by měla prodloužit životnost elektronických součástek.

Desku plošných spojů ve dvou fázích osazení zachycují fotografie 5 a 6 v příloze A.

## 4.5 Pouzdro externí jednoty

Jako pouzdro externí jednotky slouží hojně používaný radiační štít typu Stevenson screen. Na webu Thingiverse jsou volně dostupné stovky návrhů radiačních štítů. Pro své pouzdro využívám některé komponenty z projektu *Stevenson screen for Solar Weather Station V2* [45]. Většina těchto komponent je ve formátu STL, který neumožňuje snadnou softwarovou editaci. Autor nicméně přidal návrh klíčového vrchního dílu ve formátu STEP, který lze snadno převést do editovatelného stavu.

Z původního návrhu je v práci využít spodní díl, 5 nasazovacích kruhů a plastový úchyt. Vrchní díl byl upraven pro nasazení solárního panelu pod úhlem 60°. Byl odebrán otvor pro připojení antény a přidán prostor pro uchycení senzoru LTR390. Byla vytvořena zcela nová vnitřní přepážka pro DPS, která je masivnější a umožňuje pevnější uchycení ve vnitřku pouzdra. Přepážka obsahuje čtvercové cirkulační otvory a otvory pro umístění šroubků velikosti M2.5, jejichž vzdálenost přesně odpovídá vzdálenosti děr v navržené desce plošných spojů. Návrhy byly tvořeny a editovány v programu Autodesk Fusion 360, viz [8].

Výslednou podobu částí venkovního pouzdra zachycují fotografie v příloze A.

### Montáž pouzdra

Pro spojení jednotlivých vrstev je využita kovová závitová tyč rozměru M6 namísto původních plastových tyček, což vede k větší bytelnosti pouzdra. Čtyři tyče dlouhé zhruba 6 cm vedou skrze rohy montážních kruhů a pod spodním dílem jsou upevněny čtveřicí matek. Šroubky, kterými je uchycena deska plošných spojů na vnitřní přepážce mají délku 2 cm, a na druhé straně přepážky jsou uchyceny matkou. Prostor pro integraci senzoru LTR390 je shora krytý plastovou fólií rozměru 2×1 cm, jak uvádí sekce 4.3.3.

## 4.6 Programování jednotky

Ovládací software pro externí jednotku byl vytvořen ve vývojovém prostředí Arduino IDE s využitím zde dostupných knihoven, případně několika knihoven dostupných na stránce GitHub.

### 4.6.1 Monitorování stavu baterie

Lithiová baterie je přes dělič připojena na vstupní pin modulu s označením GPIO33. Hodnota na pinu se získá přímočaře funkcí `analogRead()`, přičemž tuto hodnotu je třeba vztáhnout k referenčnímu napětí 3,3 V a vydělit konstantou 4095, která představuje rozlišení 12bitového analogově digitálního převodníku. Následně je třeba hodnotu vynásobit konstantou, která byla určena vydělením hodnoty napětí na baterii změřené voltmetrem a hodnoty generované převodníkem.

#### Chyba převodníku

Jak uvádí první příspěvek ve vlákně *Fixing the non linear ADC of an ESP32* [53], AD převodník je jedním z nejslabších článků modulů ESP32. Aby byla minimalizována chyba převodníku, je v krátkém sledu odečítané 10 hodnot, které jsou následně průměrovány. První z odečítaných hodnot je však vždy zatížena chybou 0,21 V. Tato chyba byla odstraněna kompenzováním první hodnoty konstantou -260. Tato konstanta byla určena přepočtením poměru 0,21 ku 3,3 na rozlišení převodníku 4095, což ilustruje jednoduchý vzorec

$$Komp = -\frac{V_{err}}{V_{ref}} \cdot Res = -\frac{0,21}{3,3} \cdot 4095. \quad (4.3)$$

Tato metoda poskytuje zásadně lepší výsledky, než odečítání jediné nekalibrované hodnoty v každém cyklu, kdy hodnoty oscilovaly kolem reálné hodnoty napětí s chybou až 0,1 V.

Níže je zobrazen použitý úsek kódu, jehož výstupem je aproximace napětí na baterii externí jednotky.

```

1  float voltage, batvoltage;
2  float adc = -260;
3
4  for(int i = 0; i < 10; i++) { // read 10 values
5      adc += float(analogRead(33));
6      delay(100);
7  }
8
9  GPIO33 = adc/10.00f; // arithmetic mean
10 voltage = (GPIO33*3.30f)/4095.00f;
11 batvoltage = voltage*1.63f;

```

## 4.6.2 Programování senzorů

### Senzor BME280

Pro senzor BME280 je v Arduino IDE připraveno mnoho knihoven. V programu jsou využity funkce z integrované knihovny Adafruit, která nabízí velmi přímočaré odečtení dat. Senzor komunikuje s mikrokontrolérem přes sběrnici I<sup>2</sup>C, kde má adresu 0×76. Po ukončení sběru dat je senzor uveden do režimu spánku, čehož je dosaženo funkcí **BME280\_Sleep** [12].

### Senzor DS18B20

K naprogramování senzoru DS18B20 je využit úsek kódu obsažený v článku *ESP32 DS18B20 Temperature Sensor with Arduino IDE (Single, Multiple, Web Server)* [54]. Výrobce Dallas semiconductor poskytuje pro tento senzor ovládací knihovnu dostupnou v Arduino IDE. Datový vývod senzoru s označením DQ je připojen na GPIO4. Pin, na který je senzor připojen musí být pro úspěšnou inicializaci senzoru v kódu specifikován. Specifikum tohoto ovládacího softwaru je, že v případě neúspěšného odečtení teploty se může na výstupu objevit hodnota -127 nebo 85. Tato skutečnost je v kódu ošetřena prostou podmínkou a dané hodnoty se na výstupu nebudou objevovat.

### Senzor LTR390

Pro programování senzoru LTR390 jsou použity prvky z knihovny *LTR390* [44] dostupné na GitHub. Tato knihovna nabízí přímočaré odečtení hodnot UV indexu a intenzity světla. Senzor komunikuje s mikrokontrolérem přes sběrnici I<sup>2</sup>C, kde má adresu 0×53.

Je třeba, aby senzor v jednom cyklu změřil hodnoty intenzity světla i UV záření. Knihovna pro tento účel definuje dva módy. První mód s označením ALS uvádí senzor do režimu měření intenzity okolního světla. Druhý mód s označením UVS je určen pro měření UV indexu. V běhu programu je vhodné před změnou módu přenastavit parametry zisku a rozlišení na hodnoty vhodné pro konkrétní režim. V režimu ALS je zisk nastaven na hodnotu 1 a rozlišení na 18 bitů. V režimu UVS má zisk hodnotu 18 a rozlišení je nastaveno na 20 bitů. Po nastavení těchto parametrů je zvolen mód a odečtena hodnota. Nejdříve je odečtena hodnota intenzity okolního světla, poté UV index. Při testování byla odhalena nutnost po zvolení měřicího módu vyčkat nějaký čas. Po uvedení do prvního režimu (ALS) program vyčkává 200 ms a po přepnutí do druhého módu (UVS) čeká 500 ms.

### 4.6.3 Komunikace se serverem Thingspeak

Klíčovou fází běhu programu je nahrání získaných dat na server Thingspeak, kde jsou data vizualizována a v pravidelných intervalech stahována vnitřním modulem. Celkem je odesláno 8 položek: 6 jsou meteorologická data, další je stav baterie a poslední je čas běhu předchozího cyklu.

Komunikace s Thingspeak probíhá prostřednictvím protokolu HTTP, jež je více popsán v sekci 3.3.2. Část programu realizující nahrání dat na Thingspeak byla vytvořena na základě jednoho z demonstračních příkladů, který je součástí knihovny *thingspeak-arduino* [40]. Tato část programu je zobrazena níže.

```
1 int publish = 0;
2 int rebootCount = 0;
3 String myStatus = "";
4
5 while(publish != 200 && rebootCount < 5) {
6     ThingSpeak.begin(client); // Initialize ThingSpeak
7
8     ThingSpeak.setField(1, temperature);
9     ThingSpeak.setField(2, tempC);
10    ThingSpeak.setField(3, humidity);
11    ThingSpeak.setField(4, pressure);
12    ThingSpeak.setField(5, UVI);
13    ThingSpeak.setField(6, AL);
14    ThingSpeak.setField(7, batvoltage);
15    ThingSpeak.setField(8, AwakeTime);
16
17    ThingSpeak.setStatus(myStatus);
18    publish = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber,
19                                     myWriteAPIKey);
20
21    if(publish == 200) {
22        rebootCount = 5;
23    } else {
24        rebootCount++;
25        delay(1000);
26    }
27    client.stop();
28 }
```



Výhodou použití protokolu HTTP je možnost okamžitého získání zpětné vazby. Pakliže je nahrání dat úspěšné, položka **publish** je rovna 200. Pokud má tato položka jakoukoli jinou hodnotu, nahrání dat úspěšně neproběhlo a pokus se opakuje. Počet těchto pokusů je však omezen 5, aby nedošlo ke vstupu programu do nekonečné smyčky. V případě 5 neúspěšných pokusů zařízení míří do režimu spánku, aniž by byla data nahrána a další pokus následuje za 30 nebo 60 minut. Tato situace ale nastává pouze v minimu případů, viz druhý odstavec v sekci 6.3.1.

#### 4.6.4 Životní cyklus programu

Mikrokontrolér se během dne probouzí zhruba každých 30 minut. Mezi desátou hodinou večerní a šestou hodinou ranní se probouzí pouze každých 60 minut. Důvodem je úspora baterie. Buzení je realizováno formou časovače, přičemž délka spánku se nepatrně mění v závislosti na množství času stráveném v aktivním režimu. Běh programu je rozdělen do tří fází.

V první fázi je spuštěn časovač, který na konci běhu programu poskytne informaci o čase stráveném v aktivním režimu. Je zjištěn stav napětí na baterii. Následně dochází k inicializaci senzorů BME280, DS18B20 a LTR390. Pakliže je inicializace úspěšná, dojde k odečtení meteorologických hodnot a jejich uložení do globálních proměnných.

Na začátku další fáze se zařízení pokusí připojit k Wifi. Není-li pokus o připojení úspěšný, program odečte čas běhu aktuálního cyklu a uloží se do režimu spánku na pevně nastavených 30 minut. Pokud je připojení úspěšné, klient se pokusí připojit k Thingspeak a odeslat aktuální data. Jsou-li data úspěšně odeslána, dojde k odečtení přesného času. Poté je spojení ukončeno a Wifi odpojena.

V závěrečné fázi je odečten čas běhu aktuálního cyklu<sup>4</sup> a zařízení se uloží do režimu hlubokého spánku. Doba spánku není v tomto případě konstantní, ale upravuje ji algoritmus vycházející z aktuálního času získaného v předchozím kroku.

---

<sup>4</sup>Doba trvání aktuálního cyklu se na server odešle až v následujícím běhu programu. Důvodem je, že se celkový čas trvání programu odečítá až na úplném konci kódu, zatímco odeslání hodnot probíhá dříve. Položka Doba strávená v aktivním režimu na serveru Thingspeak je tedy o jeden cyklus pozadu. Tato položka nicméně slouží zejména pro účely testování a monitoringu.



# Kapitola 5

## Interní jednotka

Tato kapitola se zabývá realizací vnitřního modulu meteostanice. Objasňuje volbu řídicí jednotky, popisuje návrh ochranného pouzdra a představuje senzor vnitřní teploty a tlaku. Kapitola také podrobně mapuje návrh programovacího softwaru vnitřní jednotky.

### 5.1 Výchozí požadavky na interní jednotku

Interní jednotka představuje uživatelské rozhraní. K jednotce bude přímo připojen senzor schopný měřit teplotu a vlhkost v domácím prostředí. Data změřená externí jednotkou budou stahována ze serveru prostřednictvím Wifi. Meteorologická data budou zobrazena na displeji spolu s aktuální předpovědí počasí.

#### Řídicí jednotka

Systém bude stejně jako venkovní modul řízen mikrokontrolérem ESP32, který je blíže popsán v sekci 2.1. Výhodou by bylo, pakliže by vybraná vývojová deska integrovala kvalitní displej dostatečné velikosti a prostor pro baterii.

#### Displej

Displej by měl disponovat dostatečnou velikostí i rozlišením a mít rozumnou spotřebu. Čitelnost, dostatečná velikost písma a kvalitní zobrazení meteorologických ikon jsou esenciální. Proto displeje vnitřních modulů komerčně dostupných meteorologických stanic zpravidla nebývají menší než 4 palce, viz tabulka 1.3. Menší displeje<sup>1</sup> byly proto z výběru vyřazeny a výběr byl zaměřen na displeje s minimální úhlopříčkou 4 palce.

---

<sup>1</sup>Typickými příklady vývojových desek s menším displejem jsou modely Lilygo TTGO disponující LCD displejem nebo řada Lolin od firmy WeMos, které využívají technologii OLED.

## Napájení

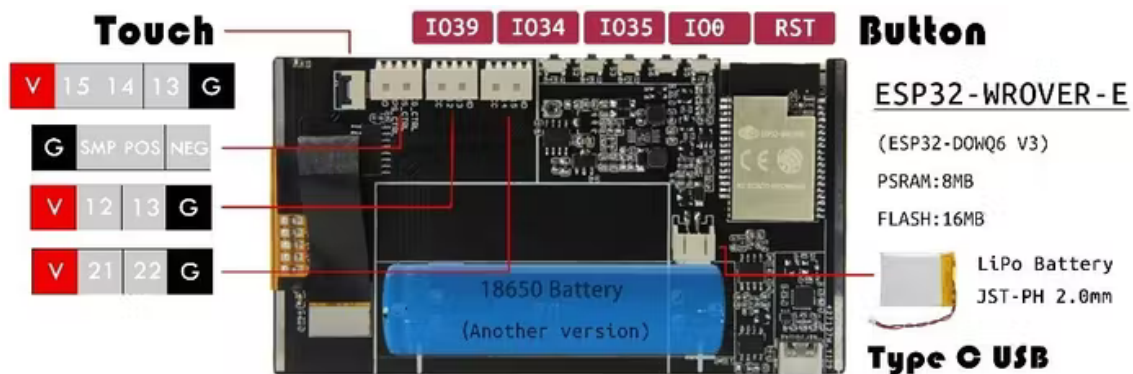
Interní jednotka by měla být bezdrátová a disponovat baterií s velkou kapacitou, protože vnitřní modul na rozdíl od venkovního nemá možnost solárního dobíjení. Pro zjednodušení údržby zařízení by bylo vhodné použít dobíjecí baterii, kterou lze dobíjet prostřednictvím externího USB konektoru, aniž by byla vyjmuta z pouzdra.

## Provoz zařízení

K zachování optimální spotřeby zařízení by měla řídicí jednotka založená na mikrokontroléru ESP32 trávit maximum času v režimu spánku, kdy je k jejímu provozu zapotřebí minimum energie. Do aktivního režimu by se měla pravidelně probouzet, co nejrychleji vykonat potřebné úkony a znovu se vrátit do režimu spánku. Režim probouzení bude synchronizován s režimem probouzení venkovního modulu, aby bylo dosaženo maximální aktuálnosti zobrazených dat.

## 5.2 Vývojová deska

Vnitřní modul využívá vývojovou desku LilyGO TTGO T5-4.7"E-Paper. Deska je vystavěna okolo modulu mikrokontroléru ESP32 s označením Wrover-E. Jednotka nabízí zabudovaný 4,7 palcový e-ink displej. Na zadní straně je integrován prostor pro Li-ion baterii typu 18650, což eliminuje nutnost externího napájení. V zadní straně desky je také vyvedeno 5 dotykových tlačítek, přičemž 4 lze volně programovat a jedno slouží jako restart. Dále jsou zde 3 konektory typu molex, které lze využít například pro zapojení externích senzorů. Náhled zadní strany této vývojové desky je na obrázku 5.1.



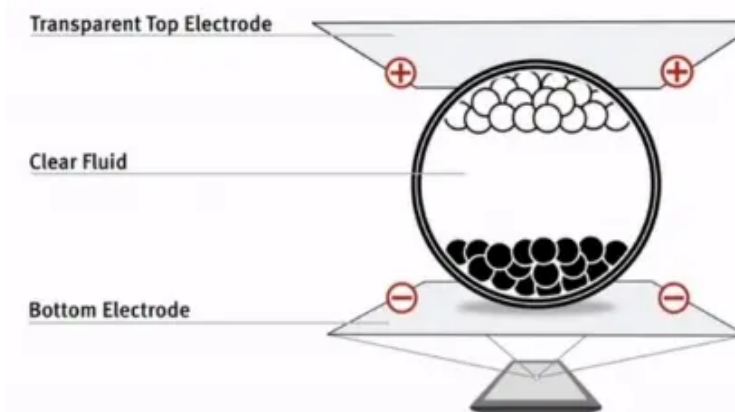
Obrázek 5.1: Náhled zadní strany LILYGO® TTGO T5-4.7 [38]

## ESP32-WROVER-E

Řídicí jednotkou vybrané vývojové desky je modul mikrokontroléru ESP32 s označením ESP32-WROVER-E. Tento modul se oproti nejpoužívanějšímu modulu ESP-WROOM-32 liší pouze v několika bodech, které lze identifikovat v kompletním seznamu modulů ESP32 dostupného na stránkách Espressif [27]. První rozdíl je v čipu, který modul integruje. WROVER-E pracuje na čipu s označením ESP32-D0WD-V3 nebo ESP32-D0WDR2-V3. Asi nejpodstatnějším rozdílem oproti WROOM-32 je přítomnost 8 MB paměti PSRAM, která v sobě spojuje paměťová rozhraní SRAM a flash. Tento modul je o něco větší než WROOM-32.

## E-ink displej

E-ink je zobrazovací technologie, která získala jméno díky své vizuální podobnosti s inkoustem naneseným na papír. Tato technologie, jak uvádí článek *What Is E-Ink, and How Does It Work?* [63], je oproti zobrazování jednotlivých pixelů typickým třeba pro LCD založena spíše na chemickém principu. Tyto displeje jsou vyrobeny z tenkého filmu na vrcholu milionů malých kapslí naplněných částicemi plovoucích v čiré tekutině. Všechny tyto částice jsou zbarveny specifickým pigmentem a jsou nastaveny tak, aby se pohybovaly v závislosti na tom, jaký typ elektrického náboje dostávají. Ilustrační průřez e-ink displejem zachycuje obrázek 5.2.



Obrázek 5.2: Průřez e-ink displejem [63]

Výhodou těchto displejů je nízká spotřeba, kterou podporuje skutečnost, že pasivní zobrazení na displeji jsou zachována i při absenci napájení. Charakteristické bývá i vysoké rozlišení, které umožňuje čitelně zobrazit větší množství dat na malém prostoru. Některé displeje umožňují na povrch umístit dotykovou vrstvu.

Nevýhodou těchto displejů je občasné ponechání takzvaných zbytkových obrazů na displeji, což ruší aktuální zobrazení. Tento nedostatek lze odstranit implementací programu, který displej vyčistí. Další nevýhodou těchto displejů může být absence

podsvícení a také fakt, že většina e-ink displejů nezobrazuje barvy. E-ink se však vyvíjí a barevné displeje založené na této technologii jsou již na trhu.

### 5.3 Senzor teploty a vlhkosti

Měření vnitřní teploty a vlhkosti zajišťuje senzor DHT11. Výrobce senzoru Aosong v produktovém manuálu popisuje DHT11 [6] jako kalibrovaný digitální senzor teploty a vlhkosti. DHT11 používá dedikovanou technologii získávání dat, která zajišťuje vysokou spolehlivost a excelentní dlouhodobou stabilitu. Senzor integruje kapacitní snímací element a měřič teploty NTC, který je připojen na výkonný 8bitový mikrokontrolér. Rozměry senzoru jsou  $23.3 \times 12.5 \times 5.8$  mm.

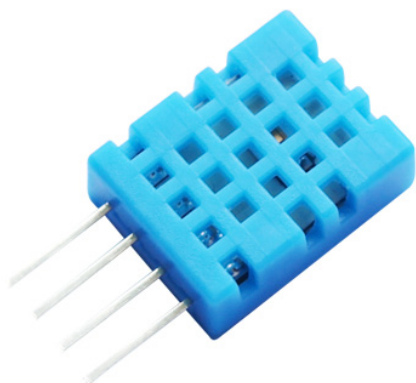
- Senzor funguje na operačním napětí 3,3 V až 5 V, přičemž by napájecí napětí nemělo přesáhnout 5,5 V. V pohotovostním režimu je uváděná spotřeba senzoru 0,06 mA. Při měření spotřeba dosahuje až 1 mA. Vzorkovací perioda by měla být nastavena delší než 2 sekundy.
- Teplotní senzor měří v rozsahu  $-20$  °C až  $60$  °C s přesností  $\pm 2$  °C. Na stránkách výrobce je však uvedena typická přesnost  $\pm 1$  °C.
- Senzor vlhkosti je optimalizován pro měření relativní vlhkosti v rozsahu 5 % RV až 95 % RV. Při pokojové teplotě je uváděná přesnost senzoru  $\pm 5$  % RV.

Ze senzoru jsou v základním provedení vyvedeny 4 vodiče, jak je zachyceno na obrázku 5.3. Vodiče s označením Vcc a GND jsou napájecí. Vodič s označením DATA slouží k sériovému přenosu dat. Jeden vývod je nevyužit.

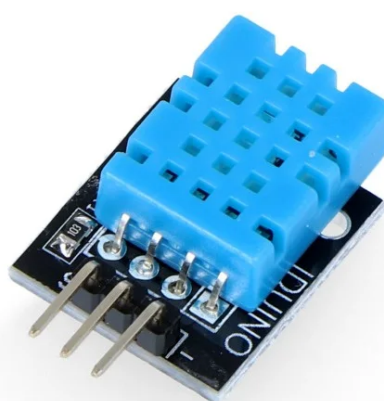
V rámci vnitřní jednotky je využit modul senzoru DHT11 s třemi vývody o standardní rozteči 2,54 mm. Modul integruje  $4,7k\Omega$  pull-up rezistor, který je připojen mezi vývody Vcc a DATA. Použitý modul senzoru zachycuje obrázek 5.4.

#### Zapojení a umístění senzoru

Modul senzoru DHT11 je připájen k pinům, které jsou vyvedeny z vývojové desky Lilygo. Za tímto účelem byly z desky odstraněny konektory typu Molex, které neumožňovaly připojení tohoto senzoru. Vývody Vcc a Ground jsou připájeny na piny se stejným označením. Vývod DATA je připájen na vstupně výstupní pin číslo 15. Senzor je přilepen k zadní straně tavicí pistolí, přičemž je umístěn pod otvorem určeným k zavěšení desky na zeď. Tato poloha by měla zajistit částečnou cirkulaci vzduchu v okolí senzoru.



Obrázek 5.3: DHT11 [7]



Obrázek 5.4: Modul senzoru DHT11 [15]

## 5.4 Programování jednotky

Interní jednotka je celá programována ve vývojovém prostředí Arduino IDE s využitím zde dostupných knihoven, případně několika knihoven dostupných na stránce GitHub.

Ovládací software pro vnitřní jednotku je vystavěn na programu *LilyGo-EPD-4-7-OWM-Weather-Display-1* [13], který je veřejně dostupný na serveru GitHub. Jedná se o velice komplexní program s vlastní grafikou, jehož zdrojový kód má přes tisíc řádků a obsahuje množství dalších hlavičkových souborů. K provozu tohoto programu je třeba doinstalovat dvě externí knihovny *LilyGo-EPD47* [66] a *ArduinoJson* [11], které jsou shodně dostupné na GitHub.

### 5.4.1 Získání meteorologických dat

#### Předpověď počasí

Program získává aktuální data o počasí spolu s předpovědí prostřednictvím HTTP klienta ze serveru Openweathermap. K tomu je samozřejmě potřeba navázat připojení k Wifi. K získání předpovědi je třeba si na serveru založit účet a programu sdělit vlastní klíč API. Předpověď pro danou lokalitu je získána díky zeměpisným informacím zakotveným přímo v kódu. Tyto informace zahrnují údaj o zeměpisné délce a šířce, hemisféře nebo časovém pásmu. Data lze obdržet v metrickém nebo imperiálním formátu.

Data server poskytne ve formátu JSON, který je třeba dekódovat a následně meteorologické položky umístit do standardních datových typů. Data jsou ukládána do proměnné typu **struct**, která obsahuje zhruba 15 proměnných dedikovaných jednotlivým meteorologickým položkám. Pro aktuální stav počasí jsou data uložena

do jediné struktury. V případě předpovědi počasí dojde k založení 24-položkového pole struktur, které uchovává data v hodinových rozestupech. Takto program získá meteorologická data na následujících 24 hodin.

### Získání dat z interního senzoru

K programování senzoru DHT11 je využita knihovna *DHT-sensor-library* od Adafruit. Tato knihovna nabízí přímočarý způsob odečtu hodnot. Při správném zapojení napájecích linek je třeba správně identifikovat vstupně výstupní pin, na který je připojen vodič s označením DATA a tento pin specifikovat v programu. Datová linka senzoru je přijena na pin číslo 15. Dále je třeba specifikovat konkrétní senzor DHT, který je použit. V tomto případě se jedná o DHT11. Tyto dvě informace stačí k vytvoření nového objektu třídy DHT. Následně je již možné číst data. Program ve dvou pokusech odečítá hodnoty teploty a vlhkosti, které následně použije k výpočtu teplotního indexu, jehož snadný výpočet je další výhodou této knihovny.

### Získání dat z externího senzoru

Data z externího senzoru jsou získána prostřednictvím serveru Thingspeak, kam venkovní jednotka data pravidelně zasílá. K tomu účelu je v Arduino IDE připravena knihovna *thingspeak-arduino*, viz [40]. Spojení se serverem je navázáno prostřednictvím HTTP klienta na portu 80. Ke čtení dat z určitého kanálu je nutné programu sdělit číslo kanálu (Channel ID) a unikátní čtecí klíč API (Read API Key). Jednotlivé položky se z kanálu nezískávají na základě jména, ale na základě pořadí, ve kterém jsou na samotném serveru uloženy (Field 1, Field 2 atd.). Toto pořadí je nutné zachovat i v rámci programu a čtené hodnoty následně zpětně interpretovat jako jednotlivé meteorologické veličiny. Následující ukázka kódu představuje způsob, jakým se získávají data z první položky kanálu. Pro dalších 6 položek je postup obdobný.

```
1  ThingSpeak.begin(client); begin server communication
2  // Field 1
3  const int Fieldtemp = 1;
4  float ROutTemp;
5  int OutTemp;
6
7  // first attempt
8  ROutTemp = ThingSpeak.readFloatField(ChannelID,
9  Fieldtemp, ReadAPIKey);
10 if (ROutTemp != 0.00) {
```



```
11     OutTemp = round(ROutTemp); // rounding function
12 }
13 else { // second attempt
14     ROutTemp = Thingspeak.readFloatField(ChannelID,
15         Fieldtemp, ReadAPIKey);
16     if(ROutTemp != 0.00) {
17         OutTemp = round(ROutTemp);
18     }
19 // 6 more Fields
20 client.stop(); // end server communication
```

Funkce pro čtení hodnot z Thingspeak má tři argumenty. První argument je kanál, ze kterého je čteno. Druhý argument je položka konkrétního kanálu, kterou chceme odečíst. Třetí argument je unikátní klíč API, který může zobrazit pouze vlastník kanálu. Na správné přečtení dat z kanálu jsou v kódu dva pokusy, protože při jediném pokusu nebyla položka vždy odečtena a displej zobrazil nulu. Při správném odečtení je položka původně získaná ve formátu **float** zaokrouhlena a převedena na formát **int**. Jediný důvod tohoto úkonu je ušetření fyzického místa na displeji.

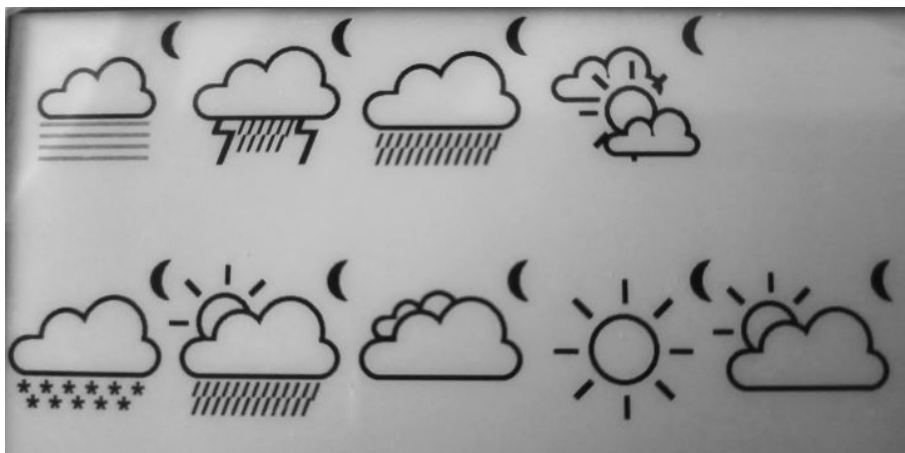
## 5.4.2 Grafika displeje

### Dostupné grafické prvky

Výchozí program disponuje množstvím grafických prvků. Knihovna *EPD\_driver* umožňuje vykreslovat jednoduché geometrické útvary.

Součástí programu je i složka obsahující písmové fonty různých velikostí. K dispozici je vždy standardní a tučná varianta daného písma. Tyto fonty neobsahují kompletní sadu českých znaků, ale součástí jsou například písmena s čárkami. Zkratky zobrazované na displeji byly upraveny na české ekvivalenty. Pro zobrazení na displeji jsou použity pouze tučné varianty písma dostatečné velikosti.

Původní program vyniká velice pečlivým zpracováním grafických ikon stavů počasí, kdy většina byla vytvořena spojením množství jednoduchých geometrických útvarů ve vizuálně kvalitní celky. Využito je i množství klávesových symbolů. Tyto ikony byly upraveny do ještě kvalitnější podoby. V programu byla možnost zobrazit velkou (aktuální stav) a malou (předpověď) ikonu. Obě tyto velikosti byly zvětšeny a v některých případech graficky odlišeny. Ikony by nyní měly být bez problému čitelné. V nočních hodinách jsou ikony doplněny o symbol srpku měsíce. K dispozici je celkem 9 ikon indikujících stavy počasí. Obrázky 5.5 a 5.6 zachycují vzhled velkých respektive malých ikon.



**Obrázek 5.5:** Vzhled velkých ikon v nočních hodinách



**Obrázek 5.6:** Vzhled malých ikon během dne

V programu je několik obrázků importováno jako bitmapy. Největší z nich je obrázek měsíce. Dále jsou k dispozici obrázky východu a západu slunce. Nejmenší obrázek je malá ikona slunce, která je použita jako grafická indikace hodnoty intenzity okolního světla.

### Zobrazení na displeji

Zobrazení na displeji je rozděleno do šesti oblastí oddělených světle šedými čarami. Kompletní zobrazení na displeji zachycuje obrázek 5.7.

V horní části displeje jsou stavová data. Zleva je zde město, ke kterému se vztahuje předpověď počasí, aktuální datum a čas poslední aktualizace jednotky. Vpravo nahoře je údaj o stavu baterie a síle Wifi signálu při poslední aktualizaci.

Levá část zobrazuje data z externího senzoru získaná prostřednictvím serveru Thingspeak. Zobrazena jsou data ze senzoru BME280, kdy se jedná o teplotu, vlhkost a barometrický tlak. Dále sekce zobrazuje údaje čtené senzorem LTR390. Zde se jedná o intenzitu okolního světla a index UV záření doplněný o interpretaci daného indexu v grafické podobě. V horní části sekce jsou údaje o stavu baterie, jež zahrnují napětí na baterii a aproximační převod tohoto napětí na procentuální kapacitu.

Levá střední oblast zobrazuje data z interního senzoru, která sbírá senzor DHT11. Postupně je uvedena teplota, vlhkost a teplotní index získaný na základě odečtené teploty a vlhkosti.



Obrázek 5.7: Kompletní zobrazení na displeji

V pravé střední oblasti jsou umístěny meteorologické údaje ze serveru Openweathermap. Jedná se o aktuální teplotu, pocitovou teplotu a denní maxima a minima. Dále jsou zde údaje o směru a rychlosti větru. V dolní části sekce je zobrazena aktuální viditelnost v metrech, mračnost a hodnota UV indexu spolu s jeho interpretací.

Pravá oblast zobrazuje aktuální stav počasí formou velké ikony. Vzhled velkých ikon zachycuje obrázek 5.5. Graficky je v této části vykreslena aktuální fáze měsíce a sekce je doplněna o časy západu a východu slunce.

V dolní části displeje je sekce předpovědi počasí na následujících 24 hodin. Tuto dobu pokrývá v osmi tříhodinových cyklech. Předpověď je doplněna o předpokládanou minimální a maximální teplotu v daný čas. K vizualizaci předpovědi jsou použity malé ikony, viz obrázek 5.6.

### 5.4.3 Životní cyklus programu

Jednotka je naprogramována, aby se během dne každých 30 minut probouzela z režimu spánku. Mezi desátou hodinou večerní a šestou hodinou ranní se probouzí pouze každých 60 minut. Běh programu je rozdělen do šesti fází.

#### První fáze

V první fázi dochází k inicializaci systému. Na úplném začátku je spuštěn časovač, který na konci běhu programu poskytne informaci o době strávené v aktivním režimu. Dochází k alokaci paměti určené pro zobrazení na displeji.

## Druhá fáze

Ve druhé fázi již dochází k připojení k Wifi a synchronizaci času. Program se o připojení k Wifi pokusí dvakrát. Je-li v obou případech neúspěšné, zařízení míří do režimu spánku. Při úspěšném připojení dochází k pokusu o získání aktuálního času. Jednotlivé časové položky (dny, hodiny, minuty...) jsou uloženy do globálních proměnných, které je uchovávají pro pozdější použití. Dojde-li k úspěšnému připojení k Wifi a zároveň je získán aktuální čas, program pokračuje do další fáze.

## Třetí fáze

Ve třetí fázi se program pokusí získat meteorologická data ze serveru Openweathermap. Za tímto účelem je založen HTTP klient. Je-li spojení úspěšně navázáno, serveru jsou předány zeměpisné informace, na jejichž základě server poskytne meteorologická data odpovídající dané lokalitě. Tato data jsou obdržena ve formátu JSON. Poté dochází k dekodování dat a jejich uložení do proměnných typu **struct**. Po úspěšném získání a dekodování dat je spojení se serverem Openweathermap ukončeno.

## Čtvrtá fáze

Čtvrtá fáze je zahájena pokusem o navázání spojení se serverem Thingspeak za účelem získat data z venkovního senzoru. Spojení je znovu realizováno prostřednictvím HTTP klienta. Čteno je celkem sedm hodnot, které jsou následně uloženy do globálních proměnných. Získány jsou dvě hodnoty teploty, vlhkost, tlak, UV index, intenzita světla a napětí na baterii externí jednotky. Po úspěšném získání dat je spojení se serverem Thingspeak ukončeno. Wifi je následně odpojena a program pokračuje do předposlední fáze.

## Pátá fáze

V předposlední fázi je inicializován senzor DHT11 a zařízení se pokusí odečíst hodnoty vnitřní teploty a vlhkosti. Na odečtení dat jsou dva pokusy. Jsou-li odečteny relevantní hodnoty, program tyto hodnoty uloží do paměti RTC a následně je použije k výpočtu teplotního indexu. Poté je zahájena poslední fáze běhu programu.

## Závěrečná fáze

V závěrečné fázi programu dochází k zobrazení dat na displeji. Z displeje jsou vyčištěna starší data a dojde k jejich jednotnému nahrazení novým zobrazením, jak ho popisuje sekce 5.4.2 a obrázek 5.7. Nová data zůstanou na displeji staticky zobrazena dalších 30 až 60 minut. Program následně uloží jednotku do režimu spánku. Za tímto účelem dojde k další aktualizaci systémového času a na jejím základě je

stanovena doba spánku. Čas spánku je tedy definován časem stráveným v aktivním režimu. Pokud se aktuální čas nepodaří získat, je doba spánku nastavena přesně na 30 minut.

## 5.5 Ochranný obal jednotky

Pouzdro vnitřní jednotky byla navrženo v programu Autodesk Fusion 360 a vytištěno na 3D tiskárně. Pouzdro se sestává ze dvou částí spojených šrouby rozměru M3 o délce vřutů 28 mm. Zadní část krabičky je opatřena opěrnými sloupky, které zajišťují stabilní usazení displejové jednotky v pouzdře. Na spodní straně krabičky je vytvořen otvor pro přípojný USB-C konektor. Přes tento konektor je možné stanici externě nabíjet. Na vrchní straně předního dílu je přilepena měkká fólie, která usnadňuje připojení kabelu a brání promačkávání tlačítek. Jsou dvě možnosti umístění krabičky. Jednou je zavěšení na zeď za otvor v zadní straně a druhou je umístění na tvrdý povrch, k čemuž jsou dotištěny nasazovací plastové nožičky zajišťující stabilitu. Krabička je bílé barvy.

Náhled pouzdra s usazenou displejovou jednotkou poskytují fotografie 7 a 8 v příloze A.



# Kapitola 6

## Testování prototypu

Tato kapitola provází testováním prototypu. Dílčí komponenty byly jednotlivě testovány a kalibrovány již v průběhu tvorby prototypu, přičemž průběh tohoto testování je popsán v příslušné kapitole. Tato kapitola se zaměřuje na testování již hotového zařízení v delším časovém úseku.

### 6.1 Meteorologická sensorika

Při testování programu v kratším i delším časovém úseku bylo čtení dat ze senzorů velmi spolehlivé. Data ze všech senzorů byla úspěšně a rychle odečítána.

#### Vlhkost a tlak

Měření venkovní vlhkosti a tlaku zajišťuje senzor BME280. Hodnoty čtené senzorem byly vždy velmi blízko hodnotám, které poskytují meteorologické servery. Hodnoty tlaku byly vždy téměř totožné. Z hlediska meteorologické sensoriky, je měření vlhkosti a tlaku nejsilnější stránkou venkovního modulu.

Měření vnitřní vlhkosti je spolehlivé a odpovídá možnostem použitého senzoru DHT11.

#### Teplota

Měření venkovní teploty je limitováno faktem, že se senzor nachází v jednotném pouzdře se solárním panelem a senzory elektromagnetického záření, které vyžadují, aby na ně přímo dopadalo sluneční světlo. Teplotu je naopak vhodné měřit ve stinném prostředí. Přepážka s deskou plošných spojů byla umístěna hlouběji do pouzdra a otočena opačným směrem, než je natočen solární panel. Po této úpravě byly čtené hodnoty o poznání relevantnější. Teplota měřená senzorem BME280 byla vždy o něco nižší, než teplota měřená senzorem DS18B20.

Měření vnitřní teploty je spolehlivé a odpovídá možnostem použitého senzoru DHT11.

### **Intenzita světla a UV záření**

Na rozdíl od teploty je pro senzory intenzity světla a UV záření naopak vhodné, když na ně dopadá přímé sluneční světlo. Během testování byla stanice umístěna na terase směrem na východ, slunce na ni tedy přímo dopadalo pouze část dne, čemuž odpovídají hodnoty čtené senzorem. K zajištění maximální věrohodnosti dat čtených senzorem LTR390 by bylo vhodné stanici umístit na střechu, aby na senzor dopadalo sluneční světlo celý den a nebyl nijak stíněn.

## **6.2 Napájení**

Venkovní modul je napájen baterií Li-ion, která je konstantně dobývána solární nabíječkou CN3791. Vnitřní modul je také napájen akumulátorem Li-ion, který lze dobýt přes USB-C konektor.

### **Venkovní modul**

Venkovní modul je napájen akumulátorem od firmy GeM, jehož uváděná kapacita je 3000 mAh. Výdrž baterie byla testována za zrychleného provozu zařízení, kdy docházelo k probouzení jednotky každých 5 minut a zároveň nebylo k dispozici solární napájení. Venkovní jednotka se tedy probouzela až 250krát za den, což je zhruba šestkrát častěji, než za normálního provozu. Na začátku provozu bylo napětí určené AD převodníkem 4,08 V. Po třech dnech nepřetržitého provozu bylo napětí zhruba 3,96 V. Při standardním provozu, kdy se zařízení probouzí každých 30 nebo 60 minut, baterie vydržela déle než týden.

Na základě těchto pokusů je možné odhadnout, že za standardního provozu, který je popsán v sekci 4.6.4, je venkovní modul schopen fungovat bez solárního napájení minimálně 10 dní, pakliže je baterie na počátku plně nabitá. Tento test výdrže baterie je podstatný zejména z hlediska provozu meteostanice v podzimních a zimních měsících.

### **Solární dobíjení**

Solární dobíjení bylo testováno během šestidenního nepřetržitého provozu venkovního modulu. Na začátku byla Li-ion baterie z větší části vybitá, kdy napětí určené AD převodníkem bylo menší než 3,7 V. Baterie se během provozu postupně nabíjela. K nabíjení docházelo zejména ráno a dopoledne, protože venkovní modul



(včetně solárního panelu) směřoval na východ. Po pěti dnech bylo napětí větší než 4,1 V.

Počasí bylo v těchto spíše mračnější s občasným deštěm. K dobíjení tedy docházelo i za méně příznivých klimatických podmínek.

### Vnitřní modul

Jako baterie vnitřního modulu byla testována levnější baterie značky UltraFire. Tato baterie byla otestována i pro venkovní modul, kde došlo k jejímu nahrazení kvalitnější baterií. S baterií UltraFire vydržel modul pracovat déle než měsíc. Testovaná baterie byla přesto nahrazena stejnou Li-ion baterií, kterou využívá venkovní modul. To by mělo ještě prodloužit trvání jednoho vybíjecího cyklu a usnadnit údržbu zařízení. Dobíjení plně vybité baterie přes USB-C konektor trvalo něco přes hodinu.

## 6.3 Komunikace stanice

Komunikace celého systému je založena na standardu Wifi a úspěšném navázání spojení se serverem Thingspeak.

### 6.3.1 Komunikace venkovního modulu

Komunikace byla testována v reálném i zrychleném režimu s využitím protokolů HTTP a MQTT.

#### První fáze testování s využitím HTTP

V první fázi byla testována komunikace přes HTTP klienta. Tento způsob komunikace zprostředkovává knihovna *thingspeak-arduino* [40].

V každém cyklu se program o nahrání dat pokusil pětkrát. Externí jednotka se probouzela po 30 minutách a v noci po 60 minutách. Jednalo se tedy o režim reálného provozu. Spolehlivost nahrávání dat byla velmi vysoká. Nahrát získaná data na server se externí jednotce podařilo ve více než 92 % případů. Čas, který jednotka trávila v aktivním režimu se v jednotlivých cyklech velmi lišil v závislosti na odezvě serveru. Průměrná doba strávená v aktivním režimu byla okolo 33 sekund.

Zařízení odesílalo data serveru po dobu necelých 6 dnů, kdy nebyly prováděny žádné zásahy. Za tuto dobu externí modul úspěšně odeslal serveru více než 220 vstupů. Po 6 dnech však data přestala být na server nahrávána a další vstupy již neproběhly. Pokus o řešení problému byla následná implementace protokolu MQTT.

## První fáze testování s využitím MQTT

Ve zrychleném režimu probouzení byla otestována komunikace přes protokol MQTT. Jednotka se probouzel každých 10 minut. Pokus o nahrání dat v každém cyklu byl pouze jeden, což vedlo k nižší úspěšnosti nahrávání dat. Nahrát data se podařilo zhruba v 83 % případů. Využití protokolu MQTT naopak výrazně snížilo dobu strávenou v aktivním režimu, která byla necelých 15 sekund. Použití MQTT by tedy jistě mělo pozitivní vliv na výdrž baterie externí jednotky.

Venkovní jednotka odesílala data serveru dva dny. Za tuto dobu bylo realizováno více než 250 úspěšných vstupů. Poté přestala být nová data na server nahrávána stejně jako v předchozím případě.

## Identifikace problému při nahrávání dat na Thingspeak

Problém, že na Thingspeak přestanou být po množství úspěšných vstupů nahrávána data, není při využití ESP32 ojedinělý a jeho řešení se velmi podrobně věnuje vlákno *Arduino ESP32 stops posting to ThingSpeak after random times (error -301)* [28] na fóru Mathworks. Řešení problému jsou čerpána právě z tohoto vlákna.

Při použití protokolu HTTP začne po nějaké době program vracet **error -301**, což znamená, že se nepodařilo navázat spojení se serverem Thingspeak. Začne tak činit po více než 200 úspěšných vstupech, takže identifikace problému ve standardním provozu konstruovaného zařízení by mohla trvat i několik dní. V zájmu zrychlení procesu testování jsou jednotlivá řešení testována ve zrychleném režimu probouzení.

## HTTP klient se statickou IP adresou

Jedním z možných řešení problému uvedených ve vláknu [28] je v kódu definovat přímo IP adresu serveru Thingspeak namísto URL adresy. Přeskočí se tedy krok převodu URL adresy na IP adresu. Tento postup však není doporučen.

Přístup byl nicméně otestován a výsledky byly pozitivní. Zařízení se probouzelo každých 5 minut a během několika dnů se podařilo na server nahrát zhruba 800 úspěšných vstupů. Poté byl pokus ukončen. Řešení se statickou IP adresou funguje. Těžko ho ale implementovat pro použití protokolu MQTT a celkově ho přispěvatelé fóra považují za nevhodné.

## Pravidelný restart

Uživatelsky přívětivým řešením by mohlo být softwarově zajistit pravidelný restart programu. Ten by se odehrával pravidelně, zhruba každých 200 cyklů běhu programu. Toto řešení umožňuje využít protokoly HTTP i MQTT.

Tento přístup byl otestován s využitím MQTT. Restart zařízení byl prováděn po 200 cyklech běhu programu zavoláním funkce **ESP.restart()**. Počet běhů programu

uchovává položka **bootCount** uložená v RTC<sup>1</sup> paměti, která se na začátku cyklu navyšuje. Při restartu jsou položky uložené v paměti RTC vymazány, což v mé implementaci nepředstavuje zásadní problém.

Testování znovu proběhlo ve zrychleném režimu. Zařízení se probouzelo každých 5 minut. Během několika dní se podařilo nahrát přes 600 úspěšných vstupů. Řešení s pravidelným restartem zařízení funguje. Ve finální verzi programu je aplikováno právě toto řešení ve spolupráci s protokolem HTTP, který se ukázal celkově spolehlivější. Forma komunikace je blíže popsána v sekci 4.6.3.

### 6.3.2 Komunikace vnitřního modulu

Získávání meteorologických údajů ze serveru Openweathermap prostřednictvím HTTP klienta probíhalo od začátku bez potíží. Předpověď počasí je zobrazována dle očekávání. Získávání údajů ze serveru Thingspeak probíhá znovu přes HTTP klienta s využitím knihovny *thingspeak-arduino* [40]. Na stáhnutí každé položky jsou dva pokusy, viz 5.4.1, přičemž jeden z těchto pokusů byl téměř vždy úspěšný. Proměnné, do kterých se získaná data ukládají byly v zájmu ještě vyšší spolehlivosti systému předefinovány na položky paměti RTC. Tato úprava vede k tomu, že pokud se jednotce ani nadvakrát nepodaří získat aktuální data, displej zobrazí data z předchozího cyklu, který proběhl před půl hodinou. Takto displej vždy zobrazí relevantní informace. V nejhorsím případě budou tyto informace o cyklus opožděné<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>RTC paměť data uchová i v režimu spánku.

<sup>2</sup>Toto řešení nepočítá s tím, že by se počasí za 30 minut zásadně změnilo.



# Kapitola 7

## Zhodnocení dosažených výsledků

Tato kapitola hodnotí dosažené výsledky. Součástí kapitoly je výčet cen jednotlivých komponent a srovnání zařízení s komerčně dostupnými produkty.

### 7.1 Náklady na výrobu prototypu

Tabulka 7.1 uvádí cenu použitých komponent. V ceně nejsou zahrnuty náklady na dopravu a není reflektován fakt, že některé komponenty byly zakoupeny jako součást většího balení. Mezi položkami chybí baterie, protože komerčně dostupné produkty se dodávají bez nich a zákazník je musí dokoupit externě.

**Tabulka 7.1:** Celková použitých komponent

Položka	Prodejce	Množství	Cena (Kč)
Deska plošných spojů	JLPCB	1	10
Držák na baterii BHC-18650-1P	GM electronic	1	27
Dutinkové a kolíkové lišty	GM electronic	7	30
Kabel STEMMA QT	Botland	1	42
Kondenzátory a rezistory	GM electronic	5	18
LILYGO® T5 E-paper Screen	Banggood	1	779
Modul senzoru DHT11	GM electronic	1	82
Napěťový regulátor MCP1700	AliExpress	1	7
Ochrana Li-ion baterie	Laskakit	1	12
Posuvný spínač SL19-121	GM electronic	1	28
Senzor BME280	AliExpress	1	153
Senzor LTR390 Adafruit	Botland	1	152
Senzor DS18B20	Botland	1	105
Solární modul CN3791 MPPT	AliExpress	1	49
Solární panel 5 V	AliExpress	1	43
Šroubky, matice a závitová tyč	více prodejců	21	70
Vývojová deska ESP32 DevKit V1	AliExpress	1	95
Celková cena			1702

## 7.2 Srovnání prototypu s komerčně dostupnými meteostanicemi

Hodnocení probíhá stejným způsobem jako v kapitole 1. Prototyp je tedy hodnocen z hlediska množství a kvality měřených meteorologických veličin. Druhým předmětem srovnání je dostupnost dalších funkcí.

### Srovnání z hlediska měření meteorologických veličin

Zkonstruované zařízení je stejně jako téměř všechny komerčně dostupné meteorologické stanice schopné měřit vnitřní i venkovní teplotu a vlhkost. Senzor BME280 zajišťuje měření barometrického tlaku, které bývá dostupné u stanic v cenové relaci okolo 1000 Kč. Uváděná přesnost měření vlhkosti senzorem BME280 je  $\pm 3\%$  RV, což je vyšší přesnost než u jakéhokoli produktu, který byl představen v kapitole 1. To samé platí i u měření barometrického tlaku, které je u mého prototypu také mimořádně přesné. Měření vnitřní teploty a vlhkosti zajišťuje senzor DHT11, jehož přesnost je mírně nižší než u komerčně dostupných produktů.

Zařízení je schopné měřit intenzitu slunečního světla a UV index. Měření těchto veličin většinou nabízejí stanice dražší než 2500 Kč.

Stanice není vybavena srážkoměrem ani senzory pro měření směru a rychlosti větru. Těmito senzory bývají vybavené stanice dražší než 2000 Kč.

### Srovnání z hlediska dostupných funkcí

Prototyp je řízen mikrokontrolérem ESP32, který integruje technologie Wifi a Bluetooth. Těmito technologiemi disponují pouze meteostanice v cenové relaci nad 4000 Kč, což ilustrují tabulky 1.1 a 1.3.

Připojení na internet s sebou nese i možnost získání přesné předpovědi počasí v dané lokalitě. Komunikace se serverem Thingspeak provádí okamžitou vizualizaci dat a jejich uchování. Uživatel tak může sledovat vývoj počasí v delších časových cyklech. Data je možné sledovat i prostřednictvím mobilní aplikace. Analýza měřených dat a zobrazení dat v mobilní aplikaci je znovu funkcí těch nejdražších meteorologických stanic.

Vnitřní modul zařízení zobrazuje data na černobílém e-ink displeji. Při průzkumu trhu nebyl nalezen produkt využívající tento způsob zobrazení. Rozměr displeje vnitřního modulu (4,7 palce) odpovídá meteorologickým stanicím nižší cenové kategorie, avšak vysoké rozlišení dává možnost přehledně zobrazit větší množství dat i na menším prostoru. Drtivá většina komerčně dostupných meteostanic zobrazuje data na LCD displejích, které ale zpravidla nenabízí tak vysoké rozlišení. E-ink displeje nemají funkci podsvícení.

Solární dobíjení bývá u v ČR prodávaných meteostanic výjimečné. Z produktů zkoumaných v kapitole 1 jím disponují pouze dvě nejdražší položky.

## 7.3 Celkové zhodnocení

Výhodou prototypu oproti produktům stejné cenové hladiny je měření intenzity světla a UV indexu. Stanice nedisponuje senzory větru a srážek. Za zmínku stojí přesnost, se kterou je měřen tlak a venkovní vlhkost senzorem BME280, která je vyšší než u komerčně dostupných produktů. Z hlediska měření meteorologických veličin může být prototyp zařazen do střední cenové kategorie komerčně dostupných meteorologických stanic.

Z hlediska dalších funkcí se prototyp od stanic stejné cenové kategorie liší v několika bodech. Využití mikrokontroléru ESP32 dává zařízení okamžitou výhodu v podobě integrovaných technologií Wifi a Bluetooth. Externí modul je solárně napájen a vnitřní modul využívá v tomto odvětví netypický e-ink displej, který je ale energeticky velmi úsporný. Z hlediska dostupnosti dalších funkcí může být prototyp řazen do vyšší cenové kategorie, kde stanice již disponují Wifi a často i solárním dobíjením.

Cena komponent, ze kterých je prototyp sestaven dosáhla zhruba 1700 Kč. Součástí ceny nejsou náklady na tisk 3D komponent. Zahrnuty nejsou ani náklady na vývoj softwaru. Nejdražší komponentou zařízení je vývojová deska vnitřního modulu s 4,7palcovým displejem. Právě displej je klíčovým faktorem výsledné ceny meteorologických zařízení. Je otázkou zda v budoucnu nebudou vnitřní displejové jednotky zcela nahrazeny aplikacemi chytrých telefonů, které již nyní dokáží zobrazit veškeré informace poskytnuté externími senzory. V případě absence vnitřní displejové jednotky by se náklady na výrobu prototypu snížily o více než 40 %.





# Závěr

Cílem práce bylo provést průzkum trhu na poli domácích meteorologických stanic dostupných v České republice a získané poznatky využít k návrhu vlastního prototypu zařízení. Prototyp měl být řízen jednočipovou kontrolní jednotkou, přičemž měl být kladen důraz zejména na minimalizaci spotřeby zařízení. Následně měl být prototyp otestován a zhodnoceny dosažené výsledky.

Průzkum trhu byl proveden v širokém cenovém a funkčním spektru. Vybráno bylo 10 produktů a jejich funkce následně zhodnoceny z mnoha hledisek. Prototyp zařízení byl sestaven ze zprvu dvou nezávislých jednotek založených na mikrokontroléru ESP32. S výhodou bylo využito, že ESP32 disponuje standardem Wifi. Právě přes Wifi probíhá komunikace mezi jednotkami, k čemuž je využito služby Thingspeak jako prostředníka. Externí senzor pravidelně sbírá meteorologická data, která následně odesílá na server Thingspeak a interní modul data sbírá a zobrazuje na e-ink displeji spolu s aktuální předpovědí počasí. Data je možné vzdáleně sledovat prostřednictvím mobilní aplikace. Náklady na výrobu zařízení přesáhly 1700 Kč. Z hlediska měření meteorologických veličin se prototyp může řadit do střední cenové kategorie komerčně dostupných meteorologických stanic. Z hlediska dostupnosti dalších funkcí je prototyp možné řadit do vyšší cenové kategorie, kde jsou již stanice vybaveny Wifi a s tím spojenými možnostmi analýzy a vizualizace dat.

Stanici by bylo možné rozšířit o další externí senzory jako senzory rychlosti a směru větru nebo srážkoměr. Nabízí se i možnost systém obohatit o interní meteorologické moduly založené na mikrokontroléru ESP32 a celý systém připojit na platformu ESPHome. Meteostanice by se tak stala jednou z komponent chytré domácnosti.



# Literatura

- [1] 3pillarglobal. What is an API key?. In: *3pillarglobal* [online]. 2021 [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <https://www.3pillarglobal.com/insights/what-is-an-api-key/>.
- [2] AliExpress. BME280 3.3V 5V Digital Sensor Temperature Humidity Barometric Pressure Sensor Module I2C SPI 1.8-5V BME280 Sensor Module. In: *AliExpress* [online]. 2022 [cit. 2022-06-19]. Dostupné z: <https://ae01.alicdn.com/kf/Hdf7e3767033a43ec92ba96fde2c54218J.jpg>.
- [3] AliExpress. BME280 3.3V 5V Digital Sensor Temperature Humidity Barometric Pressure Sensor Module I2C SPI 1.8-5V BME280 Sensor Module. In: *AliExpress* [online]. 2022 [cit. 2022-06-19]. Dostupné z: <https://ae01.alicdn.com/kf/H0de0fa4876994c929ff4f6dc12033d0f1.jpg>.
- [4] AliExpress. CN3791 Solar Charge Controller Board 6V 9V 12V Solar Panel Charger Regulator Control Module JST PH2.0 Auto Recharge for Battery. In: *AliExpress* [online]. 2022 [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://ae01.alicdn.com/kf/H3e4347be83f948589049ae99494b5dd6y.jpg>.
- [5] AliExpress. Solar Panel Outdoor 0.125W/0.25W/1W 5V Portable Solar Charger Pane Climbing Fast Charger Polysilicon Travel DIY Solar Charger. In: *AliExpress* [online]. 2022 [cit. 2022-07-06]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/33011671827.html>.
- [6] Aosong. Digital Temperature and Humidity DHT11 User Manual. In: *Maritex* [online]. 2022 [cit. 2022-15-07]. Dostupné z: <http://www.aosong.com/userfiles/images/product/dht11/DHT11-1.jpg>.
- [7] Aosong. DHT11 SIP Packaged Temperature and Humidity Sensor (Discontinued, Replaced By DHT20). In: *Maritex* [online]. 2022 [cit. 2022-15-07]. Dostupné z: <https://www.maritex.com.pl/product/attachment/147097/e3ba4b862ce252dac75137c2b42b983f>.  
Čidlo teploty a vlhkosti DHT11 - modul Iduino SE052
- [8] Autodesk. Fusion 360. In: *Autodesk* [online]. 2019 [cit. 2022-06-02]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/fusion-360/overview>.
- [9] Batteries4pro. Sizes and formats of cells and batteries. In: *Batteries4pro* [online]. 2014 [cit. 2022-07-10] Dostupné z: <https://www.batteries4pro.com/img/cms/format%20petit.jpg>.
- [10] BEAL, Vangie. Wi-Fi. In: *Webopedia* [online]. 2022 [cit. 2022-07-10] Dostupné z: <https://www.webopedia.com/definitions/wifi/>.

- [11] bblanchon. ArduinoJson. In: *GitHub* [online]. 2021 [cit. 2021-02-06] Dostupné z: <https://github.com/bblanchon/ArduinoJson>. Stránka uživatele bblanchon.
- [12] BIRD, David. BME280\_Sleep\_Function.ino. In: *GitHub* [online]. 2021 [cit. 2022-06-08]. Dostupné z: [https://github.com/G6EJD/BME280-Sleep-and-Address-change/blob/master/BME280\\_Sleep\\_Function.ino](https://github.com/G6EJD/BME280-Sleep-and-Address-change/blob/master/BME280_Sleep_Function.ino). Stránka uživatele G6EJD.
- [13] BIRD, David. LilyGo-EPD-4-7-OWM-Weather-Display-1. In: *GitHub* [online]. 2021 [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://github.com/G6EJD/LilyGo-EPD-4-7-OWM-Weather-Display-1>. Stránka uživatele G6EJD.
- [14] Bosch. *BME280*. In: *Bosch-sensortec* [online]. 2022 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>.
- [15] Botland. Čidlo teploty a vlhkosti DHT11 - modul Iduino SE052. In: *Botland* [online]. 2022 [cit. 2022-15-07]. Dostupné z: [https://cdn3.botland.store/61090-pdt\\_540/temperature-and-humidity-sensor-dht11-module-iduino-se052.jpg](https://cdn3.botland.store/61090-pdt_540/temperature-and-humidity-sensor-dht11-module-iduino-se052.jpg).
- [16] BOXWELL, Michael. *Solar Angle Calculator*. In: *Solar Electricity Handbook* [online]. 2019 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <http://www.solarelectricityhandbook.com/solar-angle-calculator.html>.
- [17] CAMPBELL, Scott. Basics of the I2C communication protokol. In: *Circuit Basics* [online]. 2016 [cit. 2022-06-18]. Dostupné z: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/>.
- [18] Consonance. 4A, Standalone Li-ion Battery ChargerICWith Photovoltaic Cell MPPTFunctionCN3791. In: *Consonance-Elec* [online]. 2022 [cit. 2022-06-13]. Dostupné z: <http://www.consonance-elec.com/en/72.html>.
- [19] CRAGGS, Ian. MQTT Vs. HTTP for IoT. In: *HiveMQ* [online]. 2022 [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-vs-http-protocols-in-iiot/>.
- [20] CRAGGS, Ian. MQTT Vs. HTTP for IoT. In: *HiveMQ* [online]. 2022 [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: <https://www.hivemq.com/img/blog/mqtt-vs-http-in-iiot-service.png>.
- [21] CRAGGS, Ian. MQTT Vs. HTTP for IoT. In: *HiveMQ* [online]. 2022 [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: <https://www.hivemq.com/img/blog/mqtt-broker-publish-subscribe-client-broker-connection-iiot.png>.
- [22] Dallas semiconductor. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. In: *GME* [online]. 2019 [cit. 2022-07-02]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.530-067.1.pdf>.
- [23] Emos. Domáci bezdrátová meteostanice E0352. In: *Emos* [online]. [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: <https://www.emos.cz/domaci-bezdratova-meteostanice-e0352>.

- [24] Emos. Smart bezdrátová meteostanice profi E5059. In: *Emos* [online]. [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://www.emos.cz/smart-bezdratova-meteostanice-profi-e5059>.
- [25] Espressif Systems. ESP32-WROOM-32 Datasheet. In: *Espressif* [online]. 2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf).
- [26] Espressif Systems. ESP-NOW. In: *Espressif* [online]. 2022 [cit. 2022-07-14]. Dostupné z: <https://www.espressif.com/en/products/software/esp-now/overview>.
- [27] Espressif Systems. Modules. In: *Espressif* [online]. 2022 [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <https://www.espressif.com/en/products/modules>.
- [28] EVANS, David. Arduino ESP32 stops posting to ThingSpeak after random times (error -301). In: *Mathworks* [online]. 2021 [cit. 2022-07-29]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/735297-arduino-esp32-stops-posting-to-thingspeak-after-random-times-error-301/>.
- [29] Garni. Meteorologická stanice GARNI 735. In: *Garni-meteo* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://www.garni-meteo.cz/meteorologicka-stanice-garni-735.html>.
- [30] Garni. Wi-Fi meteorologická stanice GARNI 2055 Arcus. In: *Garni-meteo* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://www.garni-meteo.cz/wi-fi-meteorologicka-stanice-garni-2055-arcus.html>.
- [31] General Electronics Technology. Li-ion Cylindrical Battery Specification. In: *Laskakit* [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: [https://www.laskakit.cz/user/related\\_files/geb\\_18650\\_3\\_7v\\_3000mah\\_-\\_datasheet.pdf](https://www.laskakit.cz/user/related_files/geb_18650_3_7v_3000mah_-_datasheet.pdf).
- [32] GRAY, David. What UV Index is Best for Tanning?. In: *Talking Tan* [online]. 2022 [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: [https://talkingtan.com/wp-content/uploads/2022/02/UV\\_218493666-2048x1163.jpg](https://talkingtan.com/wp-content/uploads/2022/02/UV_218493666-2048x1163.jpg).
- [33] GUPTA, Sourav. ESP32 Active Mode and Deep Sleep Mode Power Consumption Comparison. In: *Circuit Digest* [online]. 2021 [cit. 06.05.2022]. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/esp32-active-mode-and-deep-sleep-mode-power-consumption>.
- [34] HiveMQ. MQTT Essentials. In: *HiveMQ* [online]. [cit. 25.07.2022]. Dostupné z: <https://www.hivemq.com/mqtt-essentials/>.
- [35] HÜBSCHMANN, Ida. ESP32 for IoT: A Complete Guide. In: *Nabto* [online]. 2020 [cit. 2022-06-18]. Dostupné z: <https://www.nabto.com/guide-to-iot-esp-32/>.

- [36] Hyundai. Meteorologická stanice Hyundai WS 2244 W hnědá. In: *Hyundai-electronics* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://www.hyundai-electronics.cz/meteorologicka-stanice-hyundai-ws-2244-w-hneda/z356910/>.
- [37] Hyundai. Meteorologická stanice Hyundai WSP 3080 R WIND černá. In: *Hyundai-electronics* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://www.hyundai-electronics.cz/meteorologicka-stanice-hyundai-wsp-3080-r-wind-cerna/z400474/>.
- [38] JASHAV, Abhishek. LILYGO T5 4.7"ePaper Based on ESP32 V3 Dual-Core Processor. In: *Hackster* [online]. 2020 [cit. 2022-06-19]. Dostupné z: [https://hackster.imgix.net/uploads/attachments/1226441/lilygo\\_t5\\_4\\_7-inch\\_e-paper\\_jAyWYyzdwB.jpg?auto=compress%2Cformat&w=740&h=555&fit=max](https://hackster.imgix.net/uploads/attachments/1226441/lilygo_t5_4_7-inch_e-paper_jAyWYyzdwB.jpg?auto=compress%2Cformat&w=740&h=555&fit=max).
- [39] KAŠPÁREK, Martin. Regulátor pro nabíjení NIMH akumulátorů z fotovoltaického panelu [online]. Brno, 2011 [cit. 2022-06-13]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ing. Petr Fiedler, Ph.D. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=38616](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38616).
- [40] KHAN, Ahmed Afan a Rob PURSER. *thingspeak-arduino*. In: *GitHub* [online]. [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: <https://github.com/mathworks/thingspeak-arduino>. Stránka uživatele mathworks.
- [41] Laskakit. Ochrana li-ion baterie 1S 3A. In: *Laskakit* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/ochrana-li-ion-baterie-1s-3a/>.
- [42] Last Minute Engineers. Interfacing DS18B20 1-Wire Digital Temperature Sensor with Arduino. In: *Last Minute Engineers* [online]. 2022 [cit. 2022-07-02]. Dostupné z: <https://lastminuteengineers.b-cdn.net/wp-content/uploads/arduino/DS18B20-Pinout-Including-Waterproof-Temperature-Sensor.png>.
- [43] Last Minute Engineers. Insight Into ESP32 Sleep Modes & Their Power Consumption. In: *Last Minute Engineers* [online]. 2022 [cit. 2022-07-30]. Dostupné z: <https://lastminuteengineers.com/esp32-sleep-modes-power-consumption/>.
- [44] LEVKOV, Igor. LTR390. In: *GitHub* [online]. 2021 [cit. 2022-06-03]. Dostupné z: <https://github.com/levkovigor/LTR390>. Stránka uživatele levkovigor.
- [45] LEWIS, Glen. Stevenson Screen for Solar Weather Station V2. In: *Thingiverse* [online]. 2019 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:3615016/files>.
- [46] LITEON Optoelectronics. Optical Sensor Product Data Sheet LTR-390UV-01. In: *Liteon* [online]. 2022 [cit. 2022-06-10]. Dostupné z: [https://optoelectronics.liteon.com/upload/download/DS86-2015-0004/LTR-390UV\\_Final\\_%20DS\\_V1%201.pdf](https://optoelectronics.liteon.com/upload/download/DS86-2015-0004/LTR-390UV_Final_%20DS_V1%201.pdf).

- [47] MAGDY, Khaleg. ESP32 DEVKit v1 - DOIT - pinout. In: *DeepBlue* [online] 2021 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://deepbluedded.com/wp-content/uploads/2021/04/ESP32-DEVKIT-v1-DOIT-Pinout-Getting-Started.jpg>.
- [48] MathWorks. Publish and Subscribe to a ThingSpeak Channel Using Secure MQTT. In: *MathWorks* [online] 2022 [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/thingspeak/use-arduino-client-to-publish-to-a-channel.html>.
- [49] Maxim Integrated Products. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. In: *Maxim Integrated* [online]. 2019 [cit. 2022-07-02]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
- [50] Microchip Technology. MCP1700 - Low Quiescent Current LDO. In: *Microchip* [online]. 2020 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/APID/ProductDocuments/DataSheets/MCP1700-Data-Sheet-20001826F.pdf>.
- [51] MITCHELL, Bradley. What Is the Range of a Typical Wi-Fi Network?. In: *Lifewire* [online]. [cit. 2022-07-14]. Dostupné z: <https://www.lifewire.com/range-of-typical-wifi-network-816564>.
- [52] PROCTOR, Robert. Bluetooth Vs. Bluetooth Low Energy: What's The Difference?. In: *Link-Labs* [online]. 2021 [cit. 2022-07-15]. Dostupné z: <https://www.link-labs.com/blog/bluetooth-vs-bluetooth-low-energy>.
- [53] RIN67630. Fixing the non linear ADC of an ESP32. In: *Forum Arduino* [online]. 2021 [cit. 2022-07-02]. Dostupné z: <https://forum.arduino.cc/t/fixing-the-non-linear-adc-of-an-esp32/699190>.
- [54] SANTOS, Rui. ESP32 DS18B20 Temperature Sensor with Arduino IDE (Single, Multiple, Web Server). In: *Random Nerd Tutorials* [online]. 2022 [cit. 2022-07-02]. Dostupné z: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-ds18b20-temperature-arduino-ide/>.
- [55] Sencor. SWS 3000 W Meteorologická stanice. In: *Sencor* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.sencor.cz/meteorologicka-stanice/sws-3000-w>.
- [56] Sencor. SWS 12500 WIFI Wifi Profesionální meteorologická stanice. In: *Sencor* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.sencor.cz/profesionalni-meteorologicka-stanice/sws-12500>.
- [57] Team RAFPower. Lithium Ion vs. LiPo Batteries - Which is Better?. In: *Ravpower* [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://blog.ravpower.com/2017/06/lithium-ion-vs-lithium-polymer-batteries/>.
- [58] TFA-Dostmann. Meteorologická stanice TFA 35.1140.01 SPRING BREEZE. In: *TFA-Dostmann* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.tfa-dostmann.cz/produkt/meteorologicka-stanice-tfa-35-1140-01-spring-breeze/2335/>.

- [59] TFA-Dostmann. Domáci meteostanice TFA 35.1145.54 LARGO. In: *TFA-Dostmann* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.tfa-dostmann.cz/produkt/domaci-meteostanice-tfa-35-1145-54-largo/2427/>.
- [60] Thingspeak. Learn More About ThingSpeak. In: *Thingspeak* [online]. [cit. 2022-07-17]. Dostupné z: [https://thingspeak.com/pages/learn\\_more](https://thingspeak.com/pages/learn_more). Kanál uživatele The Craft.
- [61] TORRES, Abigail. Adafruit LTR390 UV Sensor Overview. In: *Learn Adafruit* [online]. 2022 [cit. 2022-06-19]. Dostupné z: [https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/098/172/large1024/adafruit\\_products\\_LTR390\\_top\\_header.jpg](https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/098/172/large1024/adafruit_products_LTR390_top_header.jpg).
- [62] TORRES, Abigail. Adafruit LTR390 UV Sensor Overview. In: *Learn Adafruit* [online]. 2022 [cit. 2022-06-19]. Dostupné z: [https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/098/174/large1024/adafruit\\_products\\_LTR390\\_back.jpg](https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/098/174/large1024/adafruit_products_LTR390_back.jpg).
- [63] VANN, Vicente. What Is E-Ink, and How Does It Work?. In: *How-To Geek* [online] 2021. [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <https://www.howtogeek.com/752328/what-is-e-ink/>.
- [64] Wikipedia Foundation. ESP32. In: *Wikipedia* [online]. 2022 [cit. 2022-06-18]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/ESP32>.
- [65] WOODFORD, Chris. Lithium-ion batteries. In: *Explain that Stuff* [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/how-lithium-ion-batteries-work.html>.
- [66] Xinyuan-LilyGO. LilyGo-EPD47. In: *GitHub* [online]. 2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://github.com/Xinyuan-LilyGO/LilyGo-EPD47>. Stránka uživatele Xinyuan-LilyGO.



# Přílohy

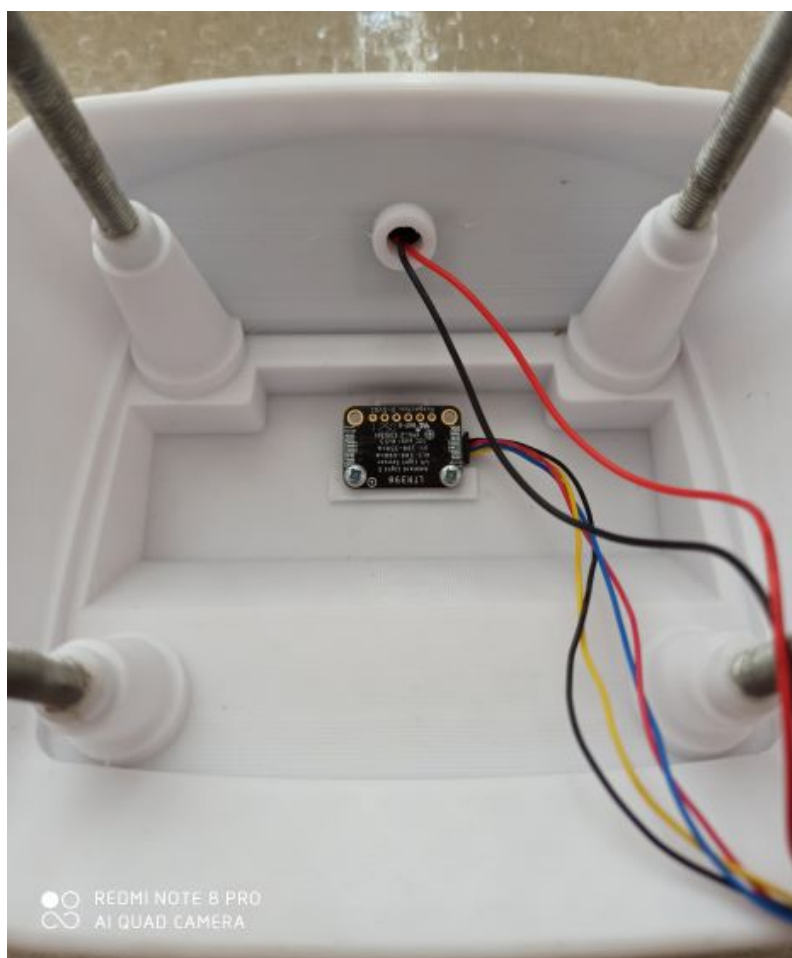
## A Fotografie zařízení ve fázi montáže



Obrázek 1: Venkovní pouzdro před uzavřením



**Obrázek 2:** Spodní díl venkovního pouzdra



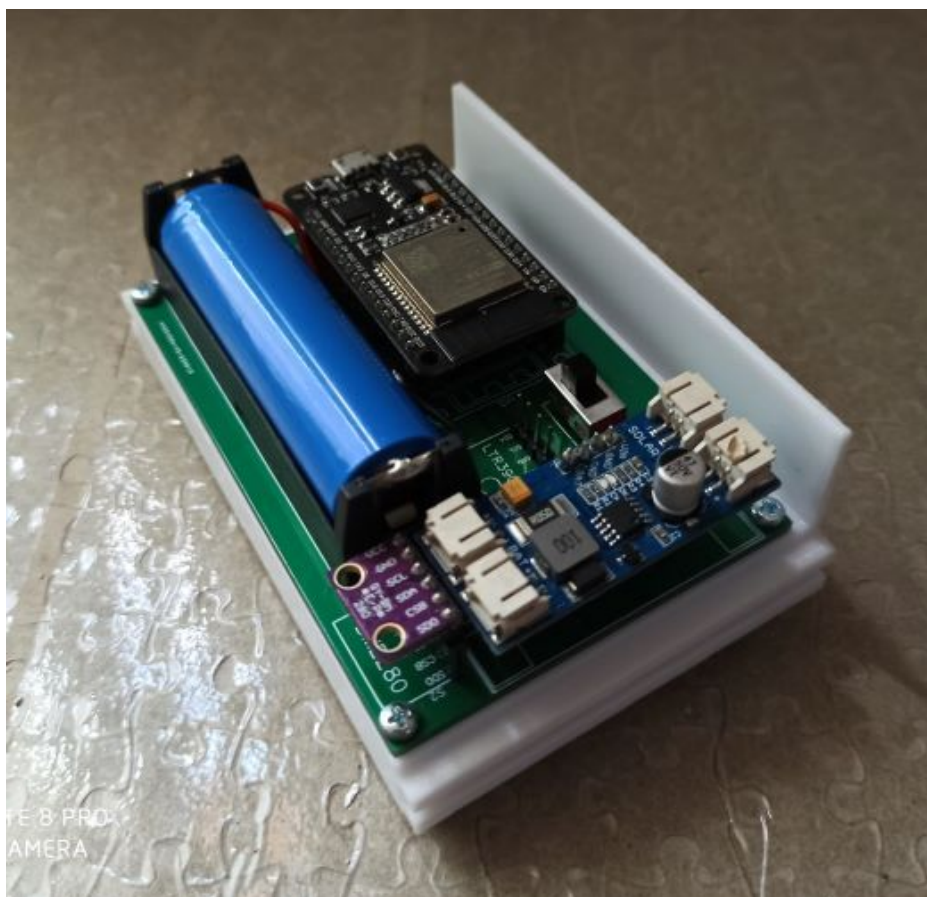
**Obrázek 3:** Vrchní díl venkovního pouzdra



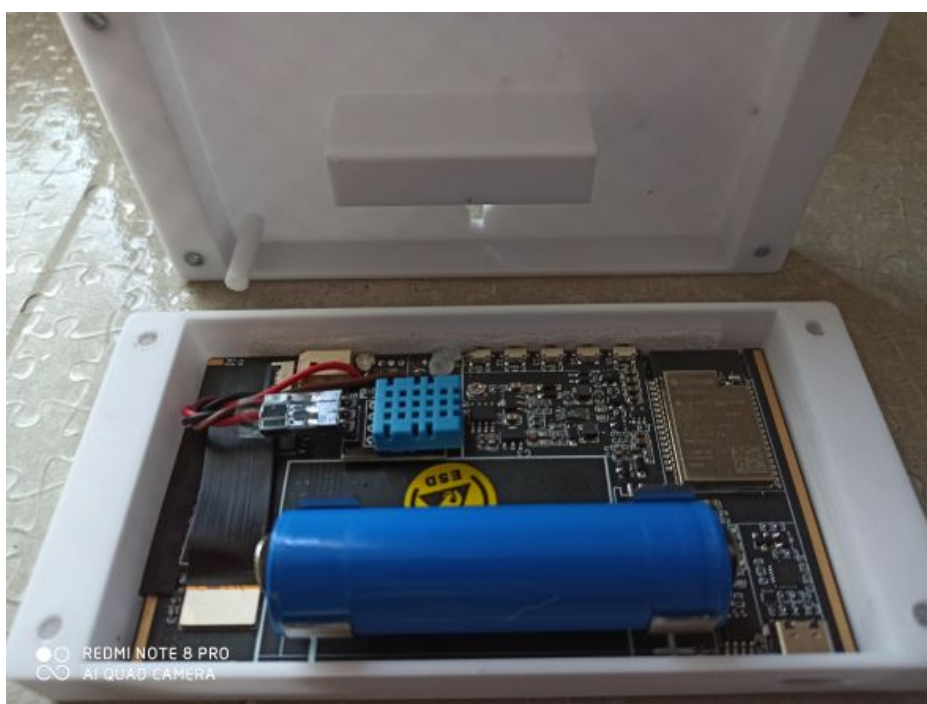
Obrázek 4: DPS usazená ve venkovním pouzdru



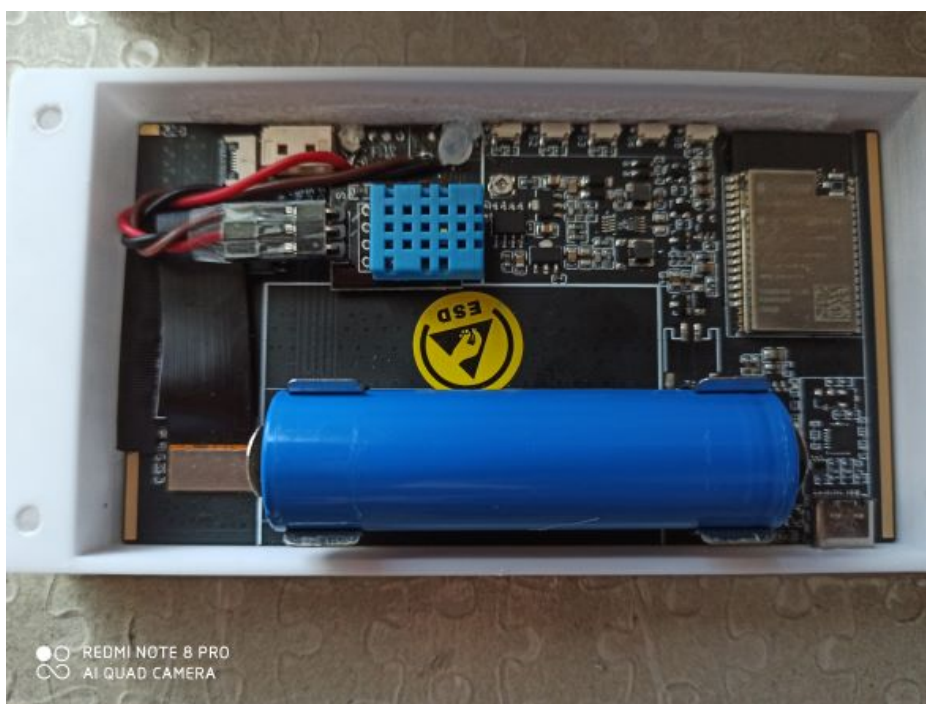
Obrázek 5: DPS před osazením senzory



Obrázek 6: DPS osazená senzory



Obrázek 7: Vnitřní pouzdro před uzavřením

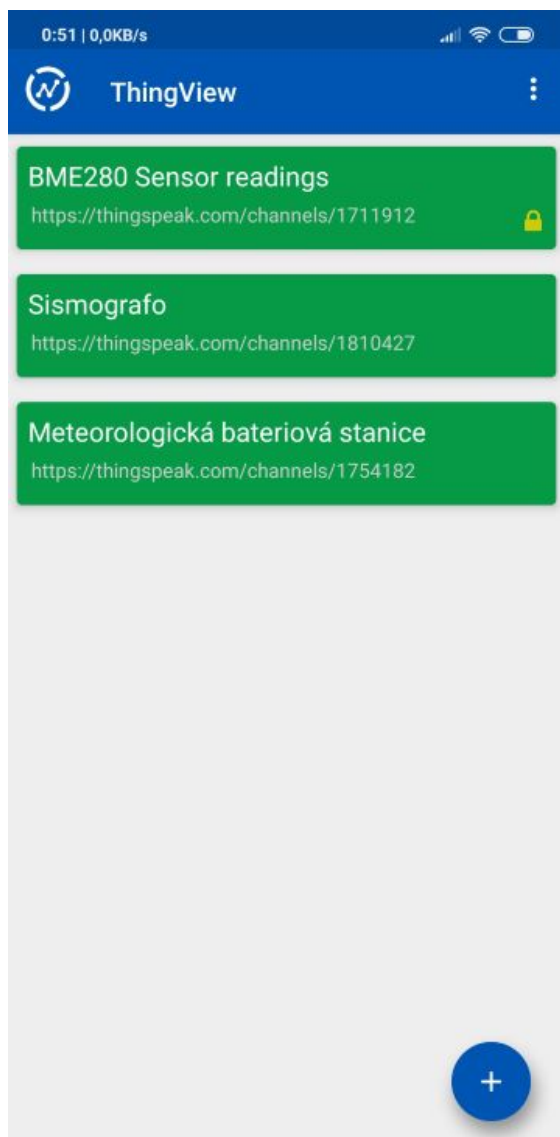


Obrázek 8: Vývojová deska interní jednotky

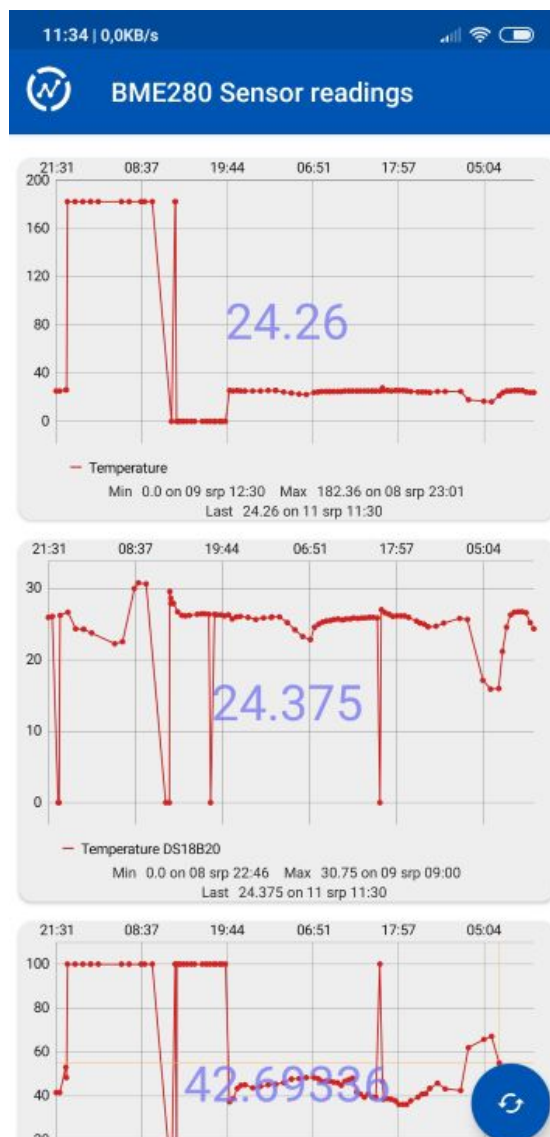


Obrázek 9: Hardwarové části meteorologické stanice

## B Snímky aplikace Thingview



Obrázek 10: Sledované kanály



Obrázek 11: Vizualizace dat v kanálu