



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## SYSTÉM AUTONOMNÍHO ŘÍZENÍ KOMPLEXU SKLENÍKŮ

SYSTEM OF AUTONOMOUS MANAGEMENT OF THE GREENHOUSE COMPLEX

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radim Zíka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.

BRNO 2022

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Bc. Radim Zíka

**ID:** 203381

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Systém autonomního řízení komplexu skleníků

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je navrhnout a vytvořit komplexní systém řízení systému skleníků za využití technologií IoT. Součástí práce je návrh a realizace elektronického decentralizovaného systému snímání procesních veličin, jejich analýza a poskytování uživateli, dále pak systém řízení a ovládání celého skleníkového hospodářství a správa informací v cloudu. Jedná se o realizaci celé HW části i komplexního SW včetně zajištění komunikace. Demonstrujte dosažené výsledky a jejich využitelnost v praxi.

1. Proveďte literární rešerši a internetový průzkum.
2. Analyzujte a popište skleníkové systémy a zvolte vhodnou konfiguraci skleníkového systému.
3. Navrhněte blokové schéma řízení. Navrhněte a realizujte HW potřebného vybavení.
4. HW vybavení oživte a vytvořte pro ně ovládací programové vybavení.
5. Vytvořte komplexní programové vybavení pro nadřazený systém pro celkové řízení a správu komplexu skleníků.
6. Otestujte a demonstруйте správnou funkci a popište dosažené výsledky.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Pavel Herout: Učebnice jazyka C, KOPP, 2004, IV. přepracované vydání, ISBN 80-7232-220-6

Dle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 18.5.2022

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

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

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem řídicího systému skleníků za využití technologií IoT. Cílem práce je navrhnout komplexní systém pro snímání procesních veličin ve skleníku a jejich řízení. Součástí práce je také využití cloudové platformy pro analýzu a poskytování dat uživateli včetně ovládání skleníkového hospodářství. Teoretická část práce se zaměřuje na charakteristiku skleníkových systémů, literární rešerši komerčně využívaných skleníkových systémů, literární rešerši snímačů vhodných pro použití v navrhovaném systému a na základy návrhu energeticky úsporných systémů. V praktické části je navržen koncept řídicího systému, popsáno hardwarové vybavení navrhovaného systému, vytvořeno schéma zařízení, dále návrh desky plošného spoje a programové vybavení navrženého systému. Poslední část práce je zaměřena na cloudové platformy, jejich literární rešerši a bližší specifikace použité platformy ThingsBoard.

## Klíčová slova

Systém řízení skleníků, IoT, Bluetooth 5 Low Energy, Bezdrátová komunikace, Energetická úspornost, Bateriově napájené zařízení, Teplota, Vlhkost, CO<sub>2</sub>, Osvětlení, Mikrokontrolér, nRF52840, I<sup>2</sup>C, Bistabilní relé, Cloud, ThingsBoard

## Abstract

Master's thesis deals with a design of greenhouse control system using IoT technologies. The aim of this work is to design a control system block diagram and to design system's hardware parts. Theoretical part of the thesis focuses on greenhouse systems characteristics, survey of greenhouse systems available on the market, survey of suitable sensors and on the basic theory of low power system design. Further in the practical part the designed concept of the control system is described along with selected hardware, the process of hardware design, the printed board design and the design of its control software. The last part of the thesis is focused on cloud platforms, their literary research and more detailed specification of used ThingsBoard platform.

## Keywords

Greenhouse control system, IoT, Bluetooth 5 Low Energy, Wireless communication, Energetical efficiency, Battery powered device, Temperature, Humidity, CO<sub>2</sub>, Illumination, Microcontroller, nRF52840, I<sup>2</sup>C, Bistable relay, Cloud, ThingsBoard

## **Bibliografická citace**

ZÍKA, Radim. *Systém autonomního řízení komplexu skleníků*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142162>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Zdeněk Bradáč.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Bc. Radim Zíka</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	<i>203381</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Diplomová práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2021/22</i>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Systém autonomního řízení komplexu skleníků</i>

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

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 16. května 2022

-----  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Zdeňku Bradáčovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jakubu Armovi, Ph.D. za všestrannou pomoc, množství cenných a inspirativních rad, podnětů, doporučení, připomínek a zároveň za velkou trpělivost a ochotou při konzultacích poskytnutých ke zpracování této práce.

V Brně dne: 16. května 2022

-----  
podpis autora

# Obsah

ÚVOD .....	13
<b>1 SKLENÍKOVÉ SYSTÉMY .....</b>	<b>14</b>
1.1 TYPY AUTOMATICKÝCH SKLENÍKOVÝCH SYSTÉMŮ .....	14
1.1.1 Základní nekomplexní systémy .....	14
1.1.2 Inteligentní automatické systémy .....	15
1.2 KONFIGURACE INTELIGENTNÍCH SKLENÍKOVÝCH ŘÍDICÍCH SYSTÉMŮ .....	15
1.2.1 Centralizovaný řídicí systém .....	15
1.2.2 Distribuovaný řídicí systém .....	16
1.2.3 Centrální řídicí systém s distribuovanými snímači a aktory .....	16
1.3 PRŮZKUM TRHU .....	18
1.3.1 Autogrow.....	18
1.3.2 Climate control systems .....	19
1.3.3 Growtronix.....	20
<b>2 SNÍMAČE.....</b>	<b>22</b>
2.1 PROCESNÍ VELIČINY VE SKLENÍKU.....	22
2.1.1 Teplota .....	22
2.1.2 Vlhkost .....	22
2.1.3 Osvětlení .....	23
2.1.4 pH, EC a TDS závlahové vody .....	23
2.1.5 Množství CO <sub>2</sub> .....	24
2.2 PRŮZKUM TRHU SNÍMAČŮ PROCESNÍCH VELIČIN .....	25
2.2.1 Teplota .....	25
2.2.2 Vlhkost .....	25
2.2.3 Osvětlení .....	26
2.2.4 pH, EC a TDS .....	26
2.2.5 CO <sub>2</sub> .....	27
<b>3 NÁVRH ENERGETICKY ÚSPORNÉHO ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>28</b>
3.1 HARDWAROVÁ ČÁST .....	28
3.2 SOFTWAREOVÁ ČÁST .....	29
<b>4 NAVRŽENÝ KONCEPT ŘÍDICÍHO SYSTÉMU .....</b>	<b>31</b>
4.1 POŽADAVKY NA SYSTÉM .....	31
4.2 KONCEPT.....	31
4.3 KOMUNIKACE.....	32
4.3.1 Bluetooth 5.....	32
4.3.2 Bluetooth Low Energy.....	33
4.4 NAPÁJENÍ.....	35
<b>5 HARDWAROVÉ VYBAVENÍ .....</b>	<b>36</b>
5.1 BLOKOVÉ SCHÉMA .....	36
5.2 ADAFRUIT FEATHER NRF52840 .....	37
5.2.1 nRF52840.....	38
5.2.2 Obvod lineárního regulátoru .....	38
5.2.3 Obvod nabíjení baterie.....	39

5.3	BISTABILNÍ RELÉ .....	40
5.4	OVLÁDÁNÍ RELÉ .....	41
5.5	NAPÁJECÍ ZDROJE MODULU AKTORŮ .....	42
5.5.1	AMSRI-78-NZ .....	42
5.5.2	AMEOF3-24SJZ .....	43
5.6	DOPLŇUJÍCÍ OBVODY .....	44
<b>6</b>	<b>PRAKTICKÁ REALIZACE ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>45</b>
6.1	NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE .....	45
6.1.1	Schéma .....	45
6.1.2	DPS .....	45
6.1.3	Návrh pull-up odporů pro I <sup>2</sup> C .....	46
6.1.4	Ochranné diody pro relé .....	47
6.1.5	Izolační mezery na PCB v silové části .....	48
6.2	OCHRANNÉ KRABÍČKY .....	49
<b>7</b>	<b>PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ MODULŮ .....</b>	<b>50</b>
7.1	VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ PLATFORMIO .....	50
7.2	POUŽITÉ KNIHOVNY .....	50
7.3	ŘÍDICÍ PROGRAM MODULU SNÍMAČŮ .....	51
7.4	ŘÍDICÍ PROGRAM MODULU AKTORŮ .....	52
<b>8</b>	<b>CLOUDOVÁ PLATFORMA .....</b>	<b>53</b>
8.1	POŽADAVKY NA CLOUD .....	53
8.2	PRŮZKUM TRHU .....	53
8.2.1	Amazon Web Services IoT .....	53
8.2.2	Microsoft Azure IoT Suite .....	54
8.2.3	Google Cloud IoT .....	54
8.2.4	ThingSpeak .....	55
8.2.5	ThingsBoard .....	55
8.3	THINGSBOARD .....	56
8.4	BLOKOVÉ SCHÉMA .....	56
8.4.1	ThingsBoard cloud .....	56
8.4.2	IoT Gateway .....	62
8.4.3	BLE connector .....	62
8.4.4	Converter .....	64
<b>9</b>	<b>PARAMETRY NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>65</b>
9.1	ENERGETICKÁ BILANCE .....	65
9.1.1	Teoretická energetická bilance .....	65
9.1.2	Reálná spotřeba zařízení .....	66
9.2	DOSAH BLUETOOTH 5 LOW ENERGY .....	68
9.2.1	Měření dosahu na otevřeném prostranství .....	68
9.2.2	Měření dosahu v budově .....	70
<b>10</b>	<b>ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>73</b>
10.1	PROBLEMATICKÉ OBLASTI ŘEŠENÍ .....	74
10.1.1	Znovu připojení zařízení k centrální jednotce .....	74
10.1.2	Využití EEPROM .....	75



<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>76</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>78</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>83</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>84</b>

# Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Centralizovaný řídicí systém .....	17
Obrázek 1.2: Distribuovaný řídicí systém.....	17
Obrázek 1.3: Centrální řídicí systém s distribuovanými snímači a aktory .....	17
Obrázek 1.4: Řídicí jednotky firmy Autogrow [2]. Zleva: MultiGrow, IntelliDose .....	18
Obrázek 1.5: Řídicí jednotky firmy Autogrow [2]. Zleva: IntelliClimate, pH mini a EC mini .....	19
Obrázek 1.6: Řídicí jednotky firmy Climate control systems [6]. Zleva: Fertigation Manager, modulární jednotka Signet 9900 .....	20
Obrázek 1.7: Snímače firmy Climate control systems [6]. Zleva: snímač teploty a vlhkosti, půdní teplotní a vodivostní sondy, jednotka půdních sond.....	20
Obrázek 1.8: Moduly systému Growtronic [8], zleva: Network Interface, snímač teploty a vlhkosti, modul s relé .....	21
Obrázek 1.9: Moduly systému Growtronic [8], zleva: snímač pH, čerpadlo pro dávkování hnojiv a modul pro spínání akčních členů .....	21
Obrázek 3.1: Zpracování procesu v režimu nízké spotřeby [27] .....	30
Obrázek 4.1: Navržený koncept řídicího systému .....	31
Obrázek 4.2: Bluetooth síť typu mesh [31].....	33
Obrázek 4.3: Topologie připojení Bluetooth Low Energy .....	33
Obrázek 4.4: Služby a charakteristiky profilu GATT .....	34
Obrázek 5.1: Blokové schéma modulu snímačů .....	36
Obrázek 5.2: Blokové schéma modulu aktorů .....	36
Obrázek 5.3: Zapojení regulátoru AP2112 [37].....	39
Obrázek 5.4: Zapojení obvodu pro nabíjení baterie [37] .....	40
Obrázek 5.5: Schématická značka SPDT relé [39] .....	41
Obrázek 5.6: Schéma H mostu pro řízení bistabilního relé [42] .....	42
Obrázek 5.7: Zapojení měniče AMSRI-78-NZ.....	43
Obrázek 5.8: Zapojení měniče AMEOF3-24SJZ.....	43
Obrázek 6.1: Vytvořené schématické značky součástek.....	45
Obrázek 6.2: Vytvořená pouzdra součástek.....	46
Obrázek 6.3: Zapojení ochranných diod u cívky relé .....	48
Obrázek 7.1: Blokový diagram řídicího programu modulu snímačů .....	51
Obrázek 7.2: Blokový diagram řídicího programu modulu aktorů .....	52
Obrázek 8.1: Struktura komunikace modulu a cloudu.....	56
Obrázek 8.2: Úvodní obrazovka prostředí ThingsBoard cloud.....	57
Obrázek 8.3: Použitý rule chain.....	58
Obrázek 8.4: Rule chain pro obsluhu alarmů.....	58
Obrázek 8.5: Rulechain pro obsluhu vytápění .....	58
Obrázek 8.6: Řídicí panel skleníku .....	61
Obrázek 9.1: Graf závislosti dosažené vzdálenosti na vysílacím výkonu na volném prostranství .....	69
Obrázek 9.2: Orientační plán měření na volném prostranství.....	70
Obrázek 9.3: Graf závislosti dosažené vzdálenosti na vysílacím výkonu v interiéru .....	71
Obrázek 9.4: Orientační půdorys měření v interiéru.....	72

# Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Porovnání vybraných snímačů teploty .....	25
Tabulka 2.2: Porovnání vybraných snímačů vlhkosti .....	25
Tabulka 2.3: Porovnání vybraných snímačů osvětlení.....	26
Tabulka 2.4: Porovnání vybraných snímačů CO <sub>2</sub> .....	27
Tabulka 6.1: Výňatek z normy IPC-2221B [48].....	48
Tabulka 8.1: Zařízení připojená na server ThingsBoard.....	59
Tabulka 9.1: Teoretická energetická bilance navržených zařízení.....	65
Tabulka 9.2: Naměřené hodnoty reálné spotřeby zařízení v jednotlivých režimech.....	66
Tabulka 9.3: Reálné spotřeby zařízení v jednotlivých režimech.....	67
Tabulka 9.4: Naměřené hodnoty dosahu Bluetooth 5 Low Energy na otevřeném prostoru.....	69
Tabulka 9.5: Naměřené hodnoty dosahu Bluetooth 5 Low Energy v interiéru.....	71

## Seznam výpisů

Výpis 8.1: Konfigurační soubor ThingsBoard Gateway .....	62
Výpis 8.2: Konfigurační soubor BLE connectoru.....	63

# ÚVOD

V dnešním zemědělství se stále více využívají moderní styly pěstování rostlin namísto těch klasických. Moderní způsoby pěstování rostlin slibují větší efektivitu pěstování, menší náročnost na údržbu rostlin, menší spotřebu vody, větší efektivitu využití místa nebo také snížení výskytu chorob a škůdců rostlin. Všechny tyto výhody poté snižují celkové náklady na vypěstování rostliny nebo plodů a zvyšují také jejich kvalitu.

Moderní styly pěstování rostlin jako jsou hydroponie, akvaponie nebo kapková závlaha jsou známy již několik stovek let, avšak jejich velký rozmach nastal až v době, kdy byly dostupné řídicí a automatizační systémy těchto způsobů pěstování rostlin. Tyto styly pěstování totiž mají větší nároky na klimatické podmínky v okolí rostlin, kvalitu závlahové vody nebo množství slunečního svitu. Pro člověka by bylo velice náročné všechny tyto aspekty hlídat a udržovat v optimálních hodnotách. Proto byly pro tyto způsoby pěstování rostlin a plodů vyvinuty speciální monitorovací a řídicí systémy, které pěstování do značné míry zjednoduší a částečně zautomatizují.

Tyto řídicí systémy pracují s mnoha různými senzory, které poskytují obsluze data o teplotě, vlhkosti, intenzitě osvětlení nebo o kvalitě závlahové vody. Cílem této diplomové práce je vytvořit komplexní systém řízení skleníku, který bude snímat tyto procesní veličiny, poskytovat je uživateli a řídit a ovládat celé skleníkové hospodářství za využití cloudových technologií. Systém bude pracovat s využitím technologií IoT a pro svou komunikaci bude využívat bezdrátový komunikační standard Bluetooth 5 Low Energy. Navržený systém by měl splňovat podmínky pro snadnou implementaci do již fungujících skleníků, což také zahrnuje bateriové napájení jednotlivých senzorických modulů procesních veličin.

# 1 SKLENÍKOVÉ SYSTÉMY

Provozování skleníku a pěstování rostlin v něm vyžaduje nepřetržitý dohled nad procesními veličinami, jako jsou například teplota, vlhkost, míra osvětlení, hladina CO<sub>2</sub>, množství hnojiva v závlahové vodě atd. Pro regulaci těchto procesních hodnot potřebujeme řídit vytápění, chlazení, větrání, stínění atd. K udržení správných hodnot procesních veličin a pro správné fungování skleníku je vhodné použít automatický systém, který bude tyto hodnoty monitorovat a regulovat [1].

## 1.1 Typy automatických skleníkových systémů

Automatické skleníkové systémy se dají v zásadě rozdělit do dvou kategorií, a to na základní nekomplexní systémy a systémy inteligentní. Oba tyto typy splňují požadavek na automatické řízení pěstování rostlin ve skleníku, avšak zauímají k řízení procesních veličin odlišný přístup.

### 1.1.1 Základní nekomplexní systémy

Základní nekomplexní systémy jsou takové systémy, které řídí procesní veličiny buďto na základě předem stanoveného časového rozvrhu, nebo na základě pevně předem stanovených hraničních podmínek.

Příkladem automatického systému pracujícího na základě časového rozvrhu jsou automatické závlahové hodiny, kde uživatel předem definuje čas závlahy a její délku trvání. Systém tuto akci provádí automaticky na základě daného rozvrhu, avšak nemá přehled o tom, zda je například půda dostatečně vlhká nebo jakou teplotu má závlahová voda. Některé tyto závlahové hodiny mají možnost připojení čidla vlhkosti půdy nebo čidla teploty, avšak získané hodnoty využívají pouze pro své účely a nedistribuuje je ostatním řídicím jednotkám nebo uživateli.

Příkladem automatického systému pracujícího na základě předem stanovených hraničních podmínek je například řízení osvětlení. Pokud je ve skleníku příliš málo světla, systém sepne umělé osvětlení. Pokud je ve skleníku příliš silný sluneční svit, systém dokáže skleník zastínit. Platí zde však stejné omezení jako u závlahových hodin, a to takové, že hodnoty osvitu skleníku využívá pouze pro svou potřebu a nedistribuuje je mezi další řídicí jednotky nebo uživatele.

Výhodou těchto systémů jsou jejich nízké pořizovací náklady, jednoduchost montáže, jednoduchá obsluha a díky absenci jakékoliv externí komunikace také velká robustnost.

### **1.1.2 Inteligentní automatické systémy**

Inteligentní automatické systémy jsou takové systémy, které řídí procesní veličiny ve skleníku na základě dat z mnoha senzorů rozmístěných ve skleníku. Takové systémy nejčastěji pracují v režimu, kdy senzory posílají cyklicky naměřená data do hlavní řídicí jednotky nebo na cloud, kde jsou vyhodnocovány, a aktory jsou poté řízeny na základě těchto hodnot.

Velkou výhodou této koncepce je, že je možné ve skleníku umístit téměř libovolné množství senzorů pro získání přesnějších dat pro řízení skleníku (např. teplota v oblasti listů rostlin, teplota v oblasti kořenů rostlin, teplota v okolí rostlin). Další výhodou je, že je možné pro řízení např. vlhkosti ve skleníku využívat data z více senzorů a rovněž je možné využít více aktorů např. tvorba vodní mlhy ve skleníku, ventilace atd. Největší výhodou tohoto systému je možnost data poskytovat uživateli a řídit podmínky ve skleníku vzdáleně. Nevýhody těchto systémů jsou vysoké pořizovací náklady oproti systémům základním, složitost uvedení do provozu celého systému a také menší robustnost systému z důvodu využití komunikací mezi moduly.

## **1.2 Konfigurace inteligentních skleníkových řídicích systémů**

V této kapitole jsou uvedeny různé konfigurace řídicích systémů pro pěstování ve skleníku. Jsou zde nastíněny jejich výhody, nevýhody, omezení a možnosti použití.

### **1.2.1 Centralizovaný řídicí systém**

Centralizovaný řídicí systém je takový systém, který využívá pro měření a řízení procesních veličin ve skleníku pouze jednu centrální řídicí jednotku. Tato jednotka je umístěna na takovém místě, aby bylo technicky možné propojit tuto řídicí jednotku se snímači a aktory ve skleníku.

Centralizovaný řídicí systém obvykle obsahuje konektory pro připojení předem definovaných čidel pro měření procesních veličin ve skleníku. Ovládání aktorů ve skleníku je prováděno za pomoci spínacích prvků nacházejících se v centrální řídicí jednotce.

Takovýto systém najde své uplatnění v menších sklenících. Výhody tohoto řešení jsou nízké pořizovací náklady (oproti systémům s více jednotkami) a snadná správa systému z důvodu jeho centralizace. Jelikož se jedná o centralizovaný systém, nenachází se zde komunikace (ať už bezdrátová nebo drátová) mezi moduly, což také zvyšuje robustnost systému a snižuje náročnost uvedení systému do provozu. Mezi nevýhody tohoto řešení patří omezená vzdálenost umístění aktorů a snímačů od hlavní řídicí jednotky a složitější instalace z důvodu nutnosti vedení kabelů ke snímačům a aktorům. Centralizovaný řídicí systém je vyobrazen na obrázku 1.1.

### **1.2.2 Distribuovaný řídicí systém**

Decentralizovaný řídicí systém se vyznačuje tím, že nemá centrální řídicí jednotku. Celý systém tvoří několik řídicích jednotek komunikujících mezi sebou navzájem. Řídicí jednotky jsou umístěny u jednotlivých snímačů a aktorů. Moduly mezi sebou komunikují po sběrnici nebo pomocí bezdrátové technologie.

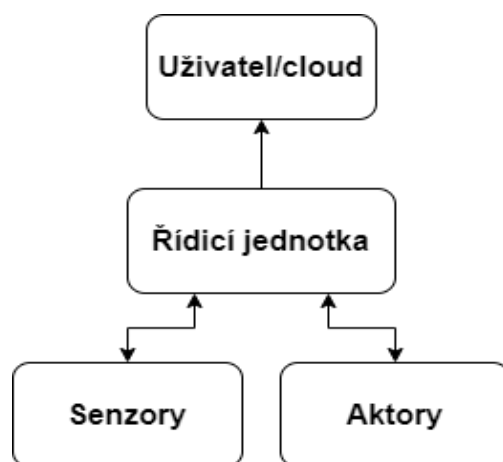
Decentralizovaný řídicí systém najde uplatnění v rozlehlých sklenících větších rozměrů nebo ve sklenících, kde není možné snímat procesní veličiny a ovládat aktory z jednoho místa. Výhodou distribuovaného systému je možnost umístit řídicí jednotky do těsné blízkosti senzorů a aktorů, a proto je možné senzory a aktory umísťovat téměř libovolně v oblasti skleníku. Nevýhodou distribuovaných systémů je nutnost napájet každý modul zvlášť. Některé jednotky je možno napájet bateriově, kde se potom zvyšuje náročnost na údržbu systému v důsledku nutnosti výměny nebo dobíjení baterií v modulech. Další nevýhodou je nutnost zajištění vhodných podmínek pro úspěšnou komunikaci mezi zařízeními (vhodné umístění modulu, vytvoření komunikační sběrnice atd.). Mezi nevýhody se také řadí vyšší pořizovací náklady, složitější správa celého systému a vyšší náročnost uvedení systému do provozu. Blokové schéma distribuovaného řídicího systému je vyobrazeno na obrázku 1.2.

### **1.2.3 Centrální řídicí systém s distribuovanými snímači a aktory**

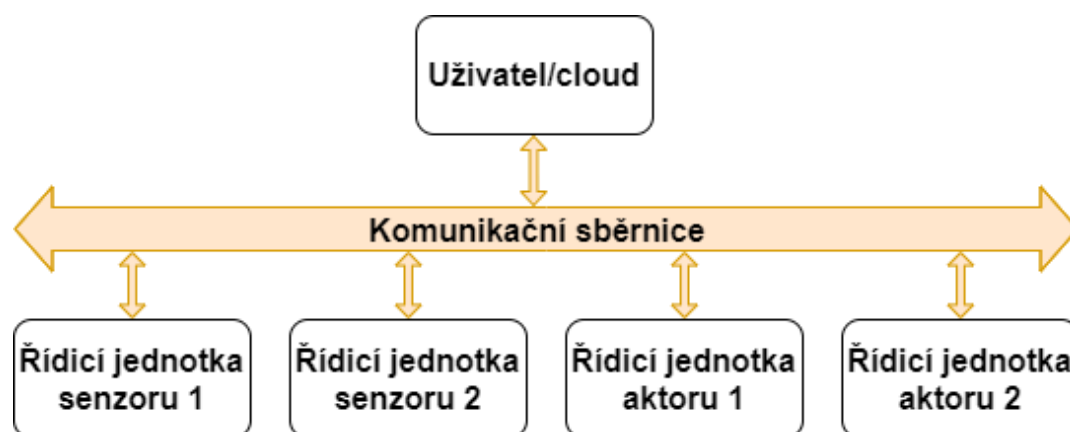
Tato konfigurace řídicího systému je kombinací dvou výše zmíněných konfigurací. Decentralizované jednotky snímačů a aktorů jsou řízeny nadřazeným centralizovaným řídicím systémem. Distribuované moduly snímačů a aktorů komunikují výhradně s centrální řídicí jednotkou. Tato jednotka poté naměřená data vyhodnocuje a poveluje jednotky aktorů pro efektivní řízení skleníku.

Konfigurace s centrálním řídicím systémem a distribuovanými moduly snímačů a aktorů kombinuje výhody centrálních a distribuovaných řídicích systémů. Díky decentralizovanému měření je možné snímače umístit na libovolné místo ve skleníku a získat tak přesná měřená data. Jelikož celý provoz řídí centrální řídicí jednotka, je správa celého systému jednodušší a náročnost na uvedení systému do provozu nižší. Stále zůstává podmínka zajištění komunikace (drátové nebo bezdrátové), avšak jedná se pouze o komunikaci jednotlivých modulů s centrální jednotkou, nikoli komunikace mezi moduly (neplatí pro využití komunikace typu mesh), což může být výhodou. Mezi nevýhody stále patří nutnost napájet každý modul zvlášť. Centrální řídicí systém s distribuovanými snímači a aktory je vyobrazen na obrázku 1.3.

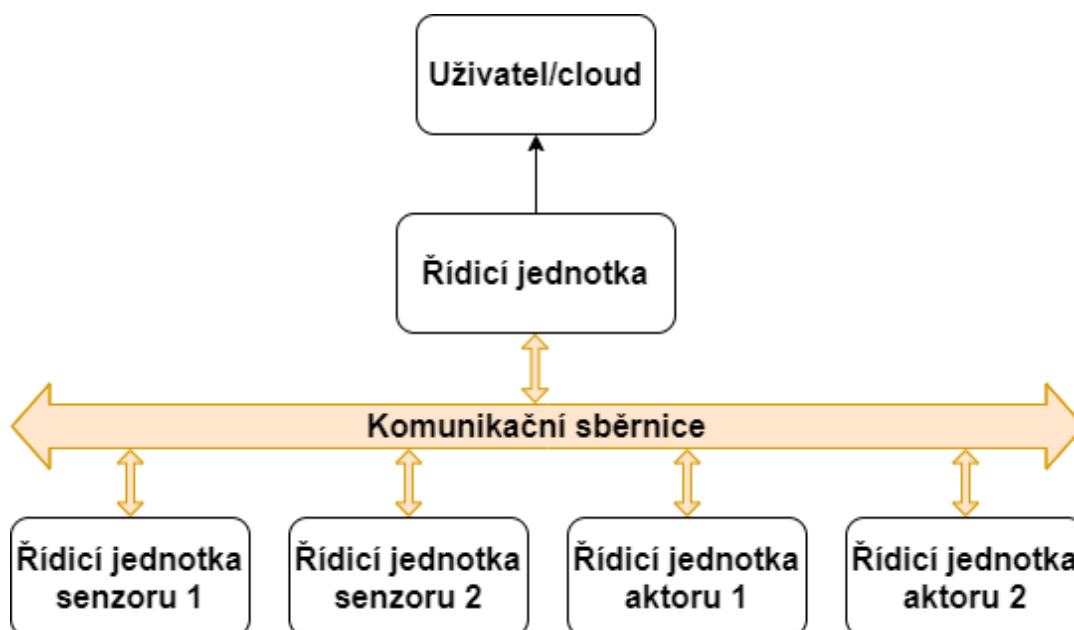




Obrázek 1.1: Centralizovaný řídicí systém



Obrázek 1.2: Distribuovaný řídicí systém



Obrázek 1.3: Centrální řídicí systém s distribuovanými snímači a aktory

## 1.3 Průzkum trhu

Jelikož je diplomová práce zaměřena na návrh komplexního systému řízení skleníků, byly v průzkumu trhu vybírány komerční produkty podobného zaměření.

### 1.3.1 Autogrow

Automatický řídicí a monitorovací systém od firmy Autogrow poskytuje zákazníkovi komplexní systém pro řízení skleníků a pěstíren. Své řídicí systémy rozdělili do několika kategorií, aby byli schopni pokrýt veškeré požadavky svých zákazníků [2].

Pro malé skleníky nebo pěstírny nabízí firma produkty IntelliClimate [3] a IntelliDose [4]. Jedná se o řídicí jednotky pracující nezávisle na sobě. Jednotka IntelliClimate zajišťuje monitoring a řízení všech základních procesních veličin (teplota, CO<sub>2</sub>, vlhkost, osvětlení). Jednotka řídí zavlažování, větrání, svícení a topení. Řídicí jednotka IntelliDose slouží pro monitoring a řízení pH, teploty a obsahu živin v závlahové vodě. Jednotka umožňuje řídit až 9 čerpadel pro dávkování přídatných látek do závlahové vody.

Pro větší komplexy poté slouží jednotka MultiGrow [5], která dokáže řídit až 8 různých pěstebních oblastí. MultiGrow je řídicí jednotka propojující více modulů IntelliClimate a IntelliDose. K jednotce lze připojit až 32 modulů současně. Autogrow nabízí také menší jednoúčelové moduly pro měření pH nebo množství živin v závlahové vodě.

Nevýhodou řešení od firmy Autogrow je nutnost propojovat jednotky pomocí sběrnice RS485, což vyžaduje pevnou instalaci modulů. Výhodou kabelové sběrnice je velká vzdálenost, po kterou mohou moduly mezi sebou komunikovat. Dalšími nevýhodami jsou nutnost zakoupení dalšího modulu pro připojení celého zařízení k internetové síti a nutnost platit měsíční poplatek za možnost vzdáleného ovládání, sběru dat na cloud a vzdáleného upozornění na překročení nastavených limitů.

Všechny moduly firmy Autogrow jsou napájeny ze sítě pomocí dodávaného adaptéru 230 V / 24 VDC. Zcela tedy chybí možnost napájet alespoň měřicí moduly bateriově.



Obrázek 1.4: Řídicí jednotky firmy Autogrow [2]. Zleva: MultiGrow, IntelliDose



Obrázek 1.5: Řídící jednotky firmy Autogrow [2]. Zleva: IntelliClimate, pH mini a EC mini

### 1.3.2 Climate control systems

Tato firma nabízí řídicí a monitorovací systémy pro skleníky velkých rozměrů. Jejich portfolio obsahuje nepřeberné množství senzorů a aktorů pro profesionální použití. V portfoliu produktů se nachází také technologie pro úpravu a recyklaci závlahové vody. Řídicí a monitorovací systémy se vytváří na míru dle požadavků zákazníka a dle parametrů daného systému skleníků [6].

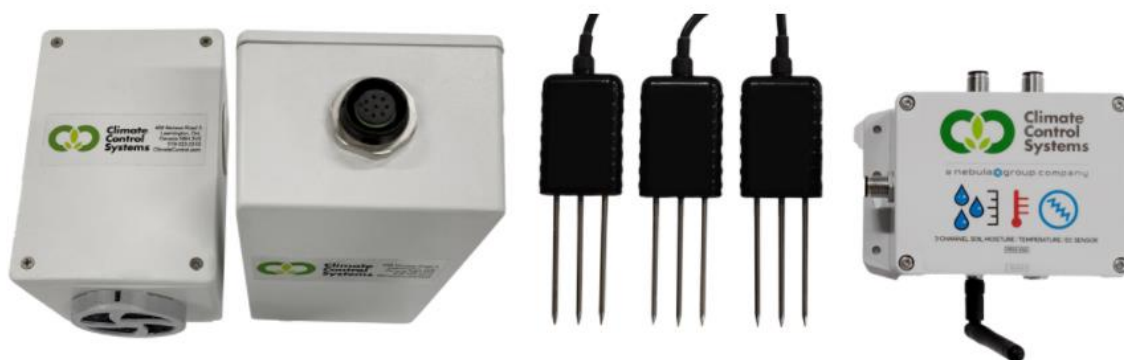
Hlavní řídicí modul je zde zastoupený centrálním počítačem, který komunikuje s ostatními jednotkami a senzory [7]. Uživatel ovládá celý systém prostřednictvím aplikace Climate Manager, která sjednocuje všechny řídicí jednotky v systému. Systém je schopen obsluhovat až 32 různých pěstebních zón. Pro řízení teploty, vlhkosti, množství CO<sub>2</sub> a stínění jsou k dispozici pokročilé programy, které zohledňují například venkovní klimatické podmínky. Skleníkový systém je také možno řídit na dálku skrze mobilní aplikaci nebo webové rozhraní.

Jednotlivé senzory a aktory jsou modulární zařízení, která lze spolu vzájemně kombinovat. V portfoliu aktorů se nachází jednak moduly s relé pro spínání, ale také moduly pro řízení velkých třífázových motorů. Firma je schopna dodat jakýkoliv senzor nebo aktor také v provedení s bezdrátovou komunikací. Moduly jsou napájeny napětím 12-24 VDC a nejsou určeny pro provoz z baterie.

Výhodou tohoto řešení od firmy Climate control systems je variabilita celého systému. Systém je vyroben na zakázku a plně se přizpůsobí požadavkům zákazníka. Nevýhodou mohou být vysoké pořizovací náklady nebo složitost celého systému.



Obrázek 1.6: Řídicí jednotky firmy Climate control systems [6]. Zleva: Fertigation Manager, modulární jednotka Signet 9900



Obrázek 1.7: Snímače firmy Climate control systems [6]. Zleva: snímač teploty a vlhkosti, půdní teplotní a vodivostní sondy, jednotka půdních sond

### 1.3.3 Growtronix

Řídicí a monitorovací skleníkové systémy firmy Growtronix jsou vhodné do malých až středně velkých skleníků. Systém dokáže monitorovat veškeré procesní veličiny skleníku a jejich portfolio obsahuje veškeré senzory potřebné pro řízení těchto procesních veličin. Skleníkové systémy této firmy se zaměřují hlavně na podrobnou analýzu jednotlivých procesních veličin. Monitorovací systém dokáže zobrazovat maximální, minimální a průměrné hodnoty jednotlivých měřených veličin, ale také zobrazovat jejich komplexní grafy. Dokáže také vypočítat celkové náklady na elektrickou energii využitou pro správu skleníku [8].

Hlavní řídicí modul zde tvoří centrální počítač se systémem windows, do kterého je nahrán software Growtronix. Počítač je poté hlavním řídicím modulem monitorovacího a řídicího systému skleníku a skrze USB a modul Growtronix Network Interface

komunikuje se snímači a aktory. Tento systém může tvořit až 32 hardwarových modulů. Pro komunikaci mezi jednotlivými moduly Growtronix využívá vlastní komunikační protokol, pro který používá kabely cat5e s koncovkami RJ-45. Jednotlivé moduly se řetězí, každý modul má vstupní a výstupní port [9].

Growtronix Network Interface je napájen ze sítě pomocí 18V adaptéru. Tento modul poté zajišťuje napájení připojených senzorů skrze komunikační rozhraní. Aktory typu čerpadlo nebo zásuvkový spínač je nutné napájet externě ze sítě.

Výhodami tohoto systému jsou jednoduchá montáž a uvedení do provozu. Následné rozšíření již stávajícího skleníkového systému je také velmi uživatelsky přívětivé, jelikož se jedná o plug-and-play systém. Nízké pořizovací náklady tohoto systému jsou také výhodou. Mezi nevýhody patří absence bezdrátové komunikace mezi řídicím modulem, senzory a aktory. Systém také není možné napájet bateriově.



Obrázek 1.8: Moduly systému Growtronix [8], zleva: Network Interface, snímač teploty a vlhkosti, modul s relé



Obrázek 1.9: Moduly systému Growtronix [8], zleva: snímač pH, čerpadlo pro dávkování hnojiv a modul pro spínání akčních členů

## 2 SNÍMAČE

V následující části práce jsou uvedeny a popsány procesní veličiny ve skleníku. Součástí kapitoly je rovněž průzkum trhu jednotlivých snímačů dané veličiny a jejich vzájemné porovnání.

### 2.1 Procesní veličiny ve skleníku

#### 2.1.1 Teplota

Velkou výhodou použití skleníku pro pěstování okrasných rostlin a potravinářských plodin je schopnost zajistit žádoucí teploty pro růst a vývoj rostlin. Teplota ve skleníku přímo souvisí s rychlostí růstu rostlin a zráním plodů. Měření teploty ve skleníku je proto nejvíce zastoupenou měřenou hodnotou a provádí se na několika místech zároveň.

Jednou ze základních teplot měřených ve skleníku je teplota vzduchu. Tato teplota je jedním z nejdůležitějších faktorů pro správný růst rostliny, a proto by měla být měřena s velkou přesností. To vyžaduje, aby byl snímač teploty vzduchu umístěn tak, aby byl chráněn před přímým slunečním svitem a proudil kolem něj, pokud možno, konstantní proud vzduchu. Snímač teploty vzduchu se ve skleníku umísťuje těsně nad rostliny, daleko od stěn a zdrojů tepla.

Další teplotou měřenou ve skleníku je teplota v kořenové oblasti rostlin. Tuto teplotu lze měřit zasunutím sondy přímo do média (kterým může být substrát, umělé kamenivo, vata atd.), ve kterém rostlina roste. Sonda by měla být umístěna 2-6 cm pod povrchem média, avšak neměla by se dotýkat dna pěstební nádoby.

Teplota závlahové vody je další důležitou měřenou teplotou ve skleníku. Velká část rostlin je náchylná k teplotnímu šoku při jejich zalévání. Teplota závlahové vody by měla být měřena v místě, kde jsme schopni tuto teplotu ovlivnit, například v zásobnících závlahové vody.

Pro výzkumné účely nebo pro účely šlechtění rostlin se ve sklenících mohou měřit také teploty přímo na výhoncích rostlin, plodech rostlin nebo listech rostlin. K takovým měřením slouží malé teplotní sondy, které se zasouvají do stonku rostliny, nebo infračervené teplotní senzory, které se umísťují do blízkosti rostlin a následně snímají jejich povrchovou teplotu [10].

#### 2.1.2 Vlhkost

Měření vlhkosti ve skleníku je další důležitou procesní veličinou, jelikož přímo souvisí s kvalitou růstu, ale především se zdravím rostlin. Ve skleníku dochází k odpařování vody z listů rostlin a také z pěstebního média. Teplý vzduch ve skleníku zadržuje tuto vlhkost ve formě páry.

Pokud dojde ke kondenzaci této vodní páry na chladnějších površích ve skleníku (např. závlahové potrubí, skleněné stěny skleníku, strop skleníku, listy rostlin), vytvoří se

na těchto površích kapky vody. Tyto kapky podporují klíčení spor houbových chorob. Při skapávání kondenzované vody z krytu skleníku dochází ke smáčení povrchů rostlin a také k šíření chorob z rostliny na rostlinu vlivem rozstřikování půdy nebo rostlinných zbytků.

Pro zamezení vzniku a šíření těchto chorob je proto nutné vlhkost ve skleníku monitorovat a řídit. Vlhkost ve skleníku se v závislosti na jeho velikosti měří na vícero místech – v oblastech s přirozeným prouděním vzduchu. Vlhkost vzduchu ve skleníku se dá snižovat větráním, ale také zvýšením teploty ve skleníku, čímž se zabraňuje kondenzaci.

Řízení vlhkosti ve skleníku je cenným nástrojem k prevenci chorob rostlin jako součást celkové ochrany proti škůdcům. Efektivní kontrola vlhkosti ve skleníku snižuje také nadměrné používání pesticidů na rostlinách k hubení houbových chorob [11].

### **2.1.3 Osvětlení**

Osvětlení skleníku je mnohem důležitější, než se na první pohled zdá. Pro správné nastavení osvětlení skleníku je nutné znát tyto tři věci: druh pěstované plodiny, roční období a kolik slunečního světla je k dispozici. Skleníky obecně vyžadují šest hodin plného spektra světla každý den. Pokud nestačí přirozené světlo ze slunce, je nutné nahradit zbylou část přirozeného světla umělým doplňkovým osvětlením. Umělé osvětlení neslouží jenom pro doplnění denního osvětlení, využívá se také pro simulaci dlouhých dnů, ke spuštění časného kvetení nebo podpoře opožděného kvetení v závislosti na potřebách rostliny [12].

Ve skleníku je proto důležité měřit, kolik přirozeného slunečního svitu dopadá na rostliny a v případě jeho nedostatku zapnout doplňkové umělé osvětlení. Mohou nastat také situace, kdy je přirozené sluneční světlo moc přímé nebo intenzivní. V takových případech je nutné rostlinám dopadající světlo rozprostřít anebo zastínit. Pro výzkumné účely nebo pro účely šlechtění rostlin může být zapotřebí měřit také spektrum dopadajícího světla na rostliny.

### **2.1.4 pH, EC a TDS závlahové vody**

Každá rostlina potřebuje pro svůj správný růst různé hodnoty pH (kyselosti/zásaditosti) média, ve kterém roste. EC (electrical conductivity = elektrická vodivost) reflektuje množství rozpuštěných solí v závlahové vodě. TDS (Total dissolved solids = celkové množství minerálů) udává celkové množství rozpuštěných organických a anorganických minerálů v závlahové vodě. Všechny tyto hodnoty se dají ovlivnit jednak pěstebním médiem, ale také závlahovou vodou. Každý druh rostliny má jiné požadavky na množství minerálů, solí a pH. Vhodnou úpravou závlahové vody můžeme dosáhnout efektivního růstu rostlin a ovlivnit také množství a kvalitu plodů [13].

Hodnoty pH, EC a TDS závlahové vody by se měly měřit na místě, kde můžeme tyto hodnoty dále upravovat. Úpravou závlahové vody můžeme dosáhnout její požadované kvality. Úpravou závlahové vody se myslí korekce hodnot pH, EC a TDS na

požadovanou hodnotu přidáním různých hnojiv obsahující potřebné množství stopových prvků nebo látek pro změnu pH vody. Snížení množství minerálů a solí se provádí ve specializovaném zařízení pro úpravu vody.

Špatnou kvalitou závlahové vody dochází u rostlin k vývojovým vadám, snížení množství a kvality plodů nebo k estetickým vadám rostlin a plodů. Typické znaky špatných hodnot pH, EC a TDS jsou žloutnutí rostlin, odumírání kořenů, rezavění listů rostlin či degenerace povrchů listů a plodin.

### **2.1.5 Množství CO<sub>2</sub>**

Oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>) je základní složkou fotosyntézy. Fotosyntéza je chemický proces, který využívá světelnou energii k přeměně CO<sub>2</sub> a vody na glukózu a kyslík. Rostlina využívá tuto glukózu společně s dalšími prvky a faktory k růstu. Oxid uhličitý tedy v konečném důsledku ovlivňuje růst rostlin, vitalitu, výnos plodů a kvalitu květů.

Pro skleníkové systémy je tedy důležité udržovat ve skleníku stejnou nebo vyšší koncentraci CO<sub>2</sub> ve vzduchu jako je ve vnějším prostředí. Rostliny pěstované v prostředí obohaceném o CO<sub>2</sub> obecně produkují větší biomasu než rostliny v klasickém prostředí, zejména v kořenech, což umožňuje rychlejší růst a vede k silnějším rostlinám se zvýšenou rychlostí reprodukce. Pokud je naopak hladina CO<sub>2</sub> ve vzduchu příliš vysoká, může dojít k poškození rostlin nebo ke zpomalení jejich růstu. Jelikož rostliny využívají oxid uhličitý pouze ve fázi fotosyntézy, tedy během dne, není nutné koncentraci CO<sub>2</sub> zvyšovat v noci. Typicky se koncentrace oxidu uhličitého ve skleníku zvyšuje hodinu po východu slunce (nebo hodinu po zapnutí umělého přívitu) a s obohacením se přestává dvě až tři hodiny před západem slunce (nebo před zhasnutím umělého přívitu).

Snímače hladiny CO<sub>2</sub> ve vzduchu by měly být umístěny blízko rostlin, aby hodnota koncentrace vypovídala o koncentraci v okolí rostlin. Snímač by měl být také umístěn na takovém místě, které je reprezentativní pro větší oblast. V případě velkých skleníků je vhodné použít několik snímačů CO<sub>2</sub> zároveň.

Pro zvýšení koncentrace oxidu uhličitého ve vzduchu se používá několik metod, např. generátory CO<sub>2</sub>, hořáky produkující CO<sub>2</sub> nebo obohacování vzduchu stlačeným oxidem uhličitým v tlakové lahvi. Každá z metod má své výhody a nevýhody a je potřeba vybrat takovou metodu, která bude vhodná pro daný skleník [14].



## 2.2 Průzkum trhu snímačů procesních veličin

Pro účely průzkumu trhu byly vybírány takové snímače, jejichž použití by připadalo v úvahu v navrhovaném systému.

### 2.2.1 Teplota

Tabulka 2.1: Porovnání vybraných snímačů teploty

Snímač	Rozsah	Přesnost	Rozlišení	Opakovatel-nost	Komunikační rozhraní	Integrovaný další snímač	Cena
[Název]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[-]	[-]	[Kč]
DHT11 [15]	0–50	± 2,0	8 bit, 1,0000	± 1,0000	OneWire	Vlhkost	60,00
SHT4x [16]	-40–125	± 0,2	16 bit, 0,0100	± 0,0700	I <sup>2</sup> C	Vlhkost	70,00
TMP117 [17]	-55–150	± 0,1	16 bit, 0,0078	± 0,0078	I <sup>2</sup> C, SMBus	-	150,00
DS18B20 [18]	-55–125	± 0,5	16 bit, 0,0625	-	OneWire	-	45,00

Tabulka 2.1 porovnává vybrané snímače teploty. Jak můžeme vidět, rostoucí cena snímače odpovídá zvyšování jeho přesnosti, rozlišení a opakovatelnosti. Snímač DS18B20 je zde uveden z důvodu, že se vyrábí v pouzdru, které je vhodné pro umístění do vodotěsné měřicí sondy, a tím pádem je snímač vhodný pro měření teploty vody, půdy nebo teploty v hůře přístupných místech. Ostatní uvedené snímače jsou vhodné pro umístění na DPS.

Zajímavý je také kontrast mezi snímačem DHT11 a SHT4x. Snímač DHT11 je čínský snímač hojně používaný pro nízkonákladové projekty, avšak pouze o 10 Kč dražší snímač SHT4x má o mnohem lepší vlastnosti. Oba tyto snímače mají digitální komunikační rozhraní a obsahují také snímač vlhkosti.

### 2.2.2 Vlhkost

Tabulka 2.2: Porovnání vybraných snímačů vlhkosti

Snímač	Rozsah	Přesnost	Rozlišení	Opakovatel-nost	Komunikační rozhraní	Integrovaný další snímač	Cena
[Název]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	[-]	[Kč]
DHT11 [15]	20–90	± 5,0	8 bit, 1,00	± 1,0	OneWire	Teplota	60,00
HIH7120 [19]	0–100	± 3,0	14 bit, 0,04	-	I <sup>2</sup> C	Teplota	200,00
SHT4x [16]	0–100	± 1,8	16 bit, 0,01	± 0,15	I <sup>2</sup> C	Teplota	70,00

V tabulce 2.2 je uvedeno porovnání vybraných snímačů vlhkosti. Z tabulky vyplývá, že zvyšující se cena u snímačů vlhkosti neznamená zvýšení jejich kvalit. Je to způsobeno především tím, že většina snímačů vlhkosti obsahuje také snímač teploty. V ceně snímače se proto promítne také kvalita snímače teploty. U snímače HIH7120 se v ceně odráží také to, že je to snímač světového výrobce Honeywell.

Jak už bylo zmíněno u porovnání snímačů teploty, cenový rozdíl 10 Kč mezi snímači DHT11 a SHT4x je v podstatě zanedbatelný, když uvažíme, o kolik přesnější snímač teploty za tento příplatek dostaneme. Nejenže jsme schopni se snímačem SHT4x měřit celý rozsah od 0 do 100 % vzdušné vlhkosti, ale jsme schopni také tento snímač používat v prostředích s kondenzující vodou, jelikož je snímač opatřen ochrannou vrstvou proti kondenzující vlhkosti.

### 2.2.3 Osvětlení

Tabulka 2.3: Porovnání vybraných snímačů osvětlení

Snímač	Rozsah	Měřitelné spektrum	Rozlišení	Komunikační rozhraní	Cena
[Název]	[lx]	[nm]	[-]	[-]	[Kč]
VEML6031 [20]	0–228000	400–700 a 800–1000	16 bit, 0,0034 lx	I <sup>2</sup> C	60,00
TSL2572 [21]	0–60000	400–1100	16 bit	I <sup>2</sup> C	50,00
APDS-9306 [22]	0–20000	450–700	20 bit	I <sup>2</sup> C	40,00

V tabulce 2.3 je uvedeno porovnání vybraných snímačů osvětlení. Při výběru snímače osvětlení je důležité sledovat rozsah a citlivost snímače na spektrum vlnových délek. Cena těchto snímačů je velmi podobná, avšak každý snímač má jiný měřitelný rozsah a také jinou citlivost na různé vlnové délky světla. Obecně platí, že vlnové délky od 400 nm do 700 nm jsou viditelné spektrum světla. Snímač s tímto měřitelným spektrem tak odpovídá svým rozsahem lidskému oku.

### 2.2.4 pH, EC a TDS

Snímače pH, EC a TDS jsou snímače založené na měření pomocí sondy. Sonda je hlavní součást snímače, a proto na ní závisí veškeré jeho parametry.

U měření pH, EC a TDS nastává problém v délce životnosti sondy. Při měření dochází k opotřebování sondy a k degradaci měřicích elektrod. Sonda tedy po nějakém čase ztrácí své původní vlastnosti a dochází ke zhoršování přesnosti měření. Sonden napříč všemi výrobci se neliší v parametrech, jako jsou rozsah nebo přesnost. Sonden se liší převážně v životnosti a podmínkách, ve kterých mohou být používány. Cena sondy potom

odpovídá její životnosti. Příkladem modulu pro měření pH je modul od firmy DFRobot, který je k dostání s několika variantami měřicích sond [23].

### 2.2.5 CO<sub>2</sub>

Tabulka 2.4: Porovnání vybraných snímačů CO<sub>2</sub>

Snímač	Rozsah	Přesnost	Rychlost odezvy	Opakovatelnost	Komunikační rozhraní	Integrovaný další snímač	Cena
[Název]	[ppm]	[ppm]	[s]	[ppm]	[-]	[-]	[Kč]
MH-Z14 [24]	0–5000	± 50	<90	± 10	PWM, UART, analog	Teplota, vlhkost	1000,00
T6713 [25]	0–5000	± 30	<180	-	I <sup>2</sup> C, UART	-	2100,00
SCD30 [26]	0–10000	± 30	20	± 10	I <sup>2</sup> C, UART	Teplota, vlhkost	2200,00

V tabulce 2.4 je uvedeno porovnání vybraných snímačů CO<sub>2</sub>. V tabulce je možno pozorovat vyšší pořizovací náklady snímačů oxidu uhličitého oproti ostatním výše uvedeným snímačům. Je to dáno zejména principy, jakými se koncentrace CO<sub>2</sub> měří. Rychlost odezvy snímače (tj. čas, za který snímač zareaguje na změnu koncentrace CO<sub>2</sub>) také závisí na detekčním principu. Dražší snímače využívají principy s lepším rozsahem, přesností a rychlostí odezvy.

Většina snímačů CO<sub>2</sub> se vyrábí v provedení detektorů kvality ovzduší, kdy je snímáno více druhů plynů zároveň. Některé snímače také obsahují snímače teploty a vlhkosti.

### 3 NÁVRH ENERGETICKY ÚSPORNÉHO ZAŘÍZENÍ

Při návrhu elektrického zařízení, které má pracovat v režimu nízké spotřeby, je potřeba při návrhu dodržet několik základních kroků. Zařízení, které bude napájeno z bateriového zdroje, by mělo pracovat ve speciálním režimu, který je kompromisem mezi následujícími požadavky:

- okamžitá odezva na externí podnět,
- vysoký výpočetní výkon,
- nízká spotřeba.

Tyto požadavky na zařízení jsou protichůdné a je nutné hledat kompromis mezi vysokými požadavky na zařízení a jeho nízkou spotřebou.

Návrhář elektrického systému může ovlivnit celkovou spotřebu systému především optimalizací obvodového návrhu, ale také optimalizací softwarové části zařízení [27].

#### 3.1 Hardwarová část

Správným obvodovým návrhem systému značnou částí ovlivníme výslednou spotřebu celého zařízení. Hardwarová část obvodu je odpovědná za okamžitou spotřebu zařízení, ať už se nachází v režimu nečinnosti nebo režimu aktivním. Návrhář tedy musí pečlivě vybrat vhodné komponenty z hlediska spotřeby již při návrhu obvodového schématu. Vybrané komponenty musí splňovat kritérium nízké spotřeby nejen v době své nečinnosti (spánku), ale také v době aktivního využívání daného komponentu.

Moderní elektronické prvky se vyznačují minimální spotřebou, ale mohou být dražší než starší prvky se stejnou funkcionalitou. Produkty vhodné pro použití k bateriovému napájení nazývají jejich výrobci různě. Můžeme se tedy setkat s pojmy jako: “nanoWatt technology”, “ultra-low-power-mode”, “LowPower”, “eXtreme-LowPower” atd.

Elektronické prvky, které výrobci označují za prvky s minimální spotřebou, mají kromě svých výhod také nevýhody. Výrobci začali minimální spotřeby využívat jakožto reklamního taháku a většina dnešních elektrických prvků má na přední straně katalogového listu uveden některý z výše uvedených pojmů. Po bližším zkoumání však zjistíme, že některé prvky dosahují nízké spotřeby pouze za určitých podmínek. V některých případech jsme dokonce nuceni úplně omezit veškerou funkcionalitu prvku pro dosažení nízké spotřeby udávané výrobcem. Z takového, na první pohled energeticky úsporného a komplexního prvku získáváme prvek sice energeticky úsporný, ale se značně omezenou funkcionalitou [27].

Volbou moderního prvku s minimální spotřebou můžeme dosáhnout nižší okamžité spotřeby zařízení, a tím také docílit energetické úspornosti celého navrhovaného systému.

## 3.2 Softwarová část

Pro vytvoření energeticky úsporného zařízení je softwarová část zařízení stejně důležitou částí jako část hardwarová. Špatným návrhem programového vybavení zařízení lze proměnit zprvu energeticky úsporně vyhlížející systém (posuzováno dle hardwarového návrhu) v naprosto neúsporné a neefektivní zařízení. Systémy pracující s bateriovým napájením, tedy v módu nízké spotřeby, většinou zpracovávají jednotlivé procedury odlišným způsobem než v režimu síťového napájení [27].

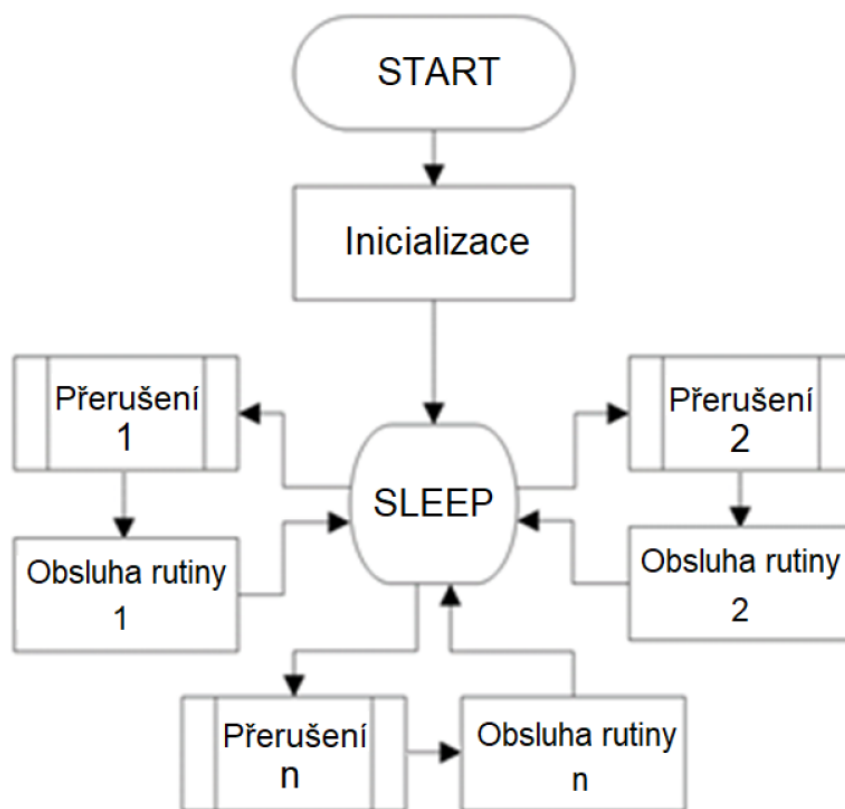
Systémy pracující v režimu nízké spotřeby hojně využívají tzv. sleep mode, ve kterém je zařízení usnáno, veškeré nepotřebné části jsou odstaveny od napájení a zařízení čeká na externí podnět pro probuzení. Spotřeba takového zařízení ve sleep modu se pohybuje v řádech  $\mu\text{A}$ . Mezi externí podněty pro uvedení zařízení do aktivního režimu patří například:

- změna logické úrovně na digitálním vstupu,
- překročení napětíové úrovně na analogovém vstupu,
- časová inkrementace modulu RTC,
- přerušení vyvolané prostřednictvím nízkoodběrového oscilátoru,
- překročení limitních hodnot snímačů,
- přerušení vyvolané externím zařízením [27].

Programové vybavení navrženo pro systém pracující v nízkoodběrovém režimu optimálně splňuje následující body:

- schopnost vyvolat přechod z režimu spánku do aktivního módu při minimálním proudovém odběru,
- rychlý přechod do výkonnostního (aktivního) režimu,
- provedení potřebných úkonů bez zbytečného prodlení v nejkratší možné době,
- nastavení parametrů nezbytných pro další probuzení zařízení,
- bezodkladný návrat do režimu spánku (režimu nízkého odběru) [28].

Správně navržené programové vybavení by se mělo chovat dle následujícího schématu. Systém je po provedení úvodní inicializace uveden do stavu nečinnosti (režimu spánku). V tomto módu zůstávají aktivní pouze nezbytně nutné moduly, například vstupní porty (IO), nízkoodběrový časovač (LPO), modul reálného času (RTC) či analogový komparátor. V okamžiku přijetí externího asynchronního podnětu je systém uveden do aktivního režimu, nastaví potřebnou periférii, obslouží procedury, inicializuje parametry potřebné k opětovnému probuzení a je opět uveden do stavu nečinnosti [27]. Na obrázku 3.1 je uveden blokový diagram optimálního chování zařízení navržený pro co nejmenší energetickou spotřebu.



Obrázek 3.1: Zpracování procesu v režimu nízké spotřeby [27]

## 4 NAVRŽENÝ KONCEPT ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

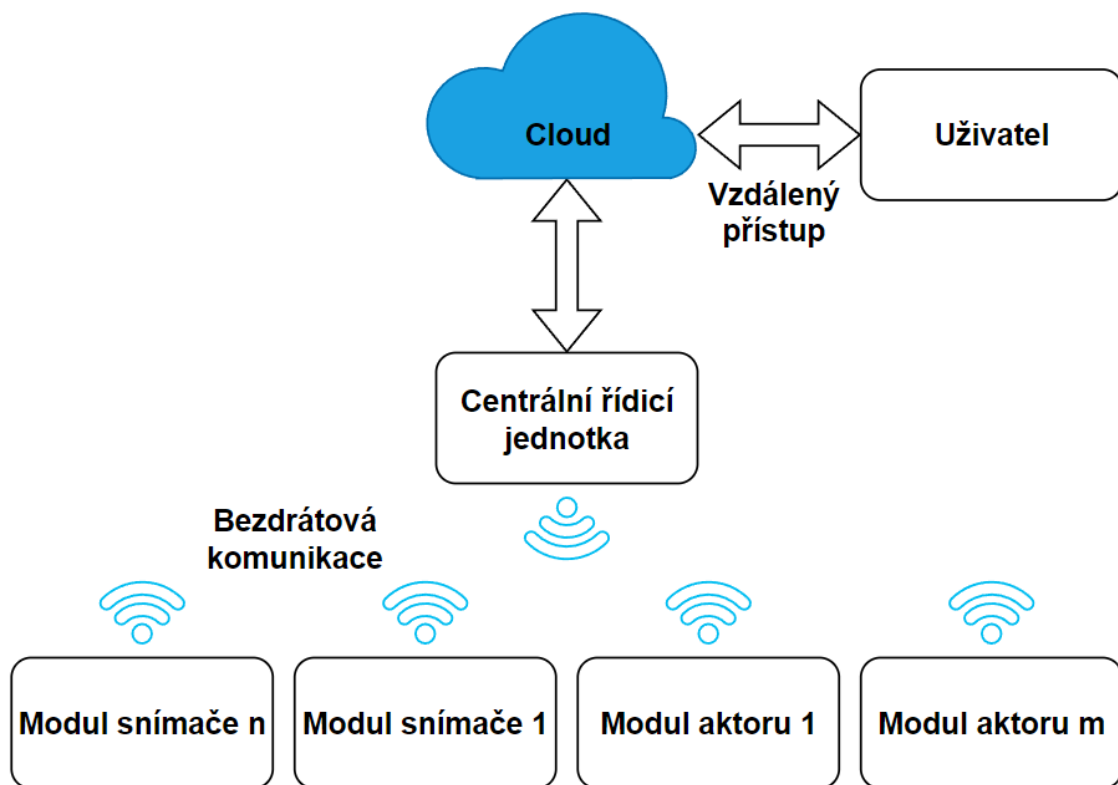
V první části této kapitoly jsou uvedeny základní požadavky na řídicí systém skleníku. Dále je v kapitole navržen koncept systému na základě požadavků, popsána komunikace a definováno napájení systému.

### 4.1 Požadavky na systém

Cílem diplomové práce je navrhnout a vytvořit komplexní systém řízení systému skleníků za využití technologií IoT. Dále má systém splňovat podmínku decentralizovaného snímání procesních veličin, jejich analýzu a poskytování uživateli přes cloud. Navržené zařízení by mělo splňovat podmínky pro snadnou instalaci a uvedení do provozu.

### 4.2 Koncept

Z požadavků na řídicí systém vyplývá, že se bude jednat o centrální řídicí systém s distribuovanými snímači a aktory. Centrální jednotka bude sloužit pro sběr naměřených dat pomocí modulů snímačů, povelování modulů aktorů a pro komunikaci s cloudem. Uživatel bude schopen kontrolovat a ovládat systém skrze webové rozhraní. Na obrázku 4.1 je uvedena koncepce systému.



Obrázek 4.1: Navržený koncept řídicího systému

## 4.3 Komunikace

Z požadavků vyplývá, že navržený systém má být snadno instalovatelný. Z tohoto důvodu se nabízí použití bezdrátové komunikace mezi moduly a řídicí jednotkou, aby se odstranila nutnost zřizovat drátovou komunikační sběrnici mezi centrální jednotkou a jednotlivými moduly.

Skleníky nejsou natolik rozlehlé, aby bylo nutné použití bezdrátových komunikačních technologií v pásmech 433 MHz nebo 868 MHz. Tyto komunikační technologie sice poskytují komunikaci na velké vzdálenosti, avšak komunikační rychlosti jsou velice malé a vytvoření správně fungujícího komunikačního protokolu by bylo složité. S technologií bezdrátové komunikace Bluetooth 5 je možné dosáhnout komunikační vzdálenosti v řádech desítek až stovek metrů, což je pro skleníky dostačující. Bluetooth 5 poskytuje také možnost využití systému mesh (viz obrázek 4.2), kdy je zpráva od odesílatele šířena přes ostatní zařízení v síti ke svému příjemci. Další výhodou využití tohoto typu bezdrátové komunikace je fakt, že spousta mikrokontrolérů má zabudovaný Bluetooth komunikační modul jako součást čipu.

### 4.3.1 Bluetooth 5

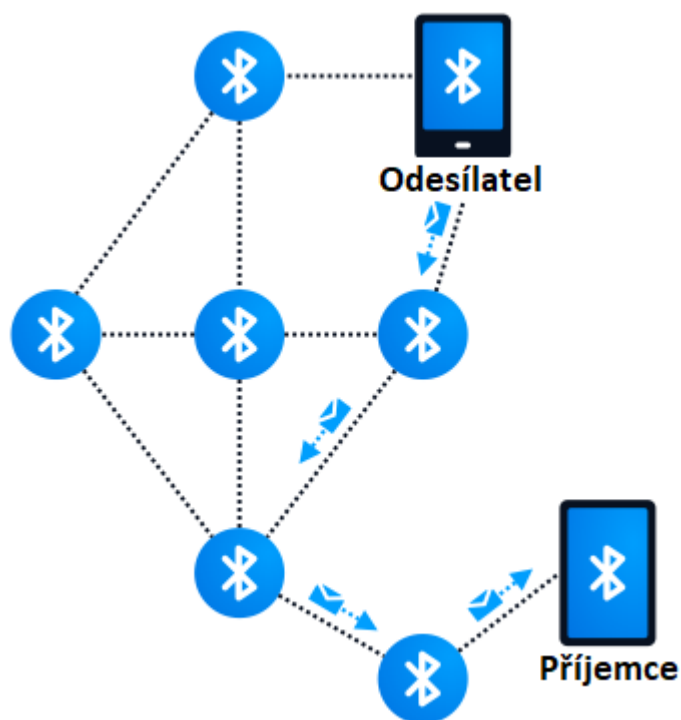
Bluetooth je technologie pro bezdrátovou komunikaci definovaná standardem IEEE 802.15.1. Spadá do kategorie osobních počítačových sítí, tzv. PAN (Personal Area Network). Vyskytuje se v několika verzích, z nichž nejnovější je verze 5.3 [29].

Komunikační protokol Bluetooth 5 byl vydán v prosinci roku 2016. Byl navržen tak, aby své využití našel kromě jiného také v oblasti neustále se rozšiřujícího internetu věcí (IoT). Protokol Bluetooth 5 nabízí o poznání vyšší přenosovou rychlost než jeho předchůdci. Zvýšil se ale také jeho dosah, který v otevřených prostorech činí až neuvěřitelných 200 metrů a v uzavřených prostorech až 40 metrů. Specifikace Bluetooth 5.1, která byla představena 21. ledna 2019, přinesla podporu mesh sítí a technologie angle of arrival (určení směru, odkud přichází signál) [30].

Technologie Bluetooth nabízí několik komunikačních protokolů, které mohou být použity pro přenos dat. V závislosti na použitém protokolu a na typu paketu mohou být jednotlivé pakety chráněny opravou chyb. Komunikační protokoly jsou také zabezpečeny technologií důvěrné autentizace a odvození klíče s vlastním algoritmem.

Bezdrátová komunikace Bluetooth se dá také využívat v režimech Long range nebo Low Energy. Long range režim se využívá pro aplikace, kde je nutné komunikovat na větší vzdálenosti (stovky metrů). Spotřeba energie pro komunikaci se však zvýší. Low energy režim najde využití právě v situacích, kdy potřebujeme provozovat bezdrátovou komunikaci s co nejmenší spotřebou elektrické energie.

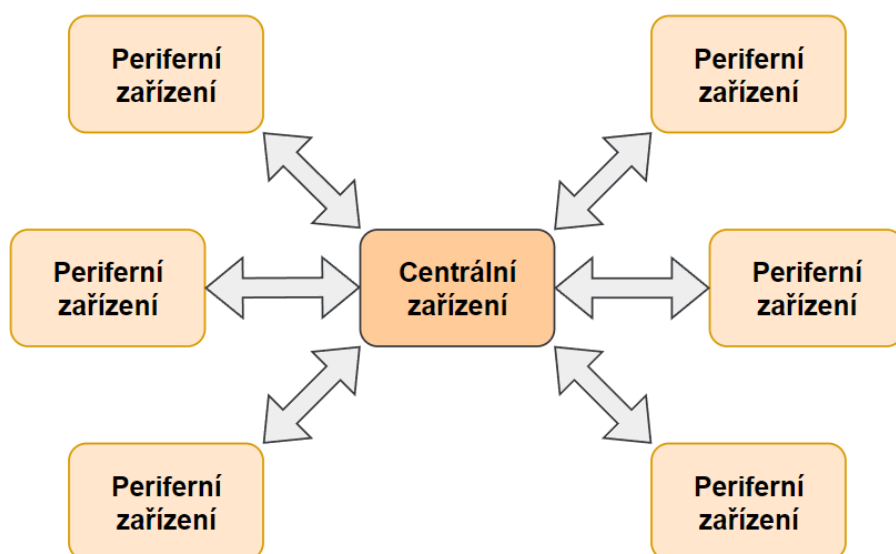




Obrázek 4.2: Bluetooth síť typu mesh [31]

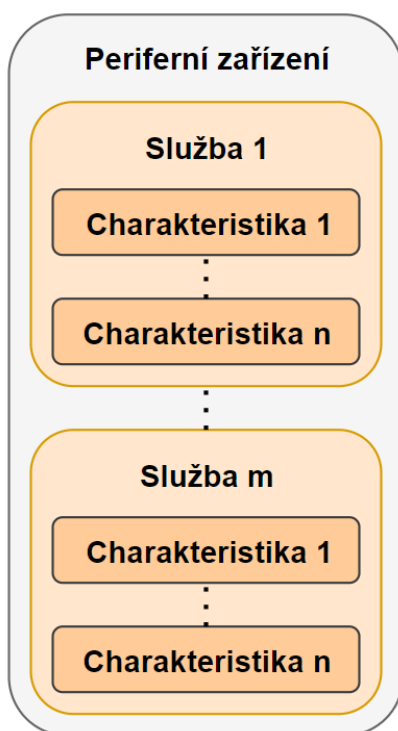
#### 4.3.2 Bluetooth Low Energy

Jak již bylo zmíněno výše, Bluetooth Low Energy se využívá především v aplikacích, kde je důležitá bezdrátová komunikace s nízkou energetickou zátěží pro daný systém. Profily standardu Bluetooth Low Energy jsou od profilů klasického standardu Bluetooth odlišné a jsou založeny na profilu GATT – Generic Attribute Profile. Topologie sítě Bluetooth Low Energy je uvedena na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Topologie připojení Bluetooth Low Energy

Důležitý koncept, který v GATT funguje, je vztah server-klient. Periferní zařízení je GATT server, který v sobě udržuje tzv. služby a charakteristiky. Centrální zařízení je potom GATT klient, který posílá požadavky na server (periferní zařízení). Veškeré transakce jsou iniciovány klientem (centrálním zařízením), který obdrží od serveru (periferního zařízení) odpověď. Příklad služeb a charakteristik periferního zařízení je uveden na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Služby a charakteristiky profilu GATT

Služby se používají k rozdělení dat na logické entity a obsahují specifické části dat nazývané charakteristiky. Služba může mít jednu nebo více charakteristik a každá služba se odlišuje od ostatních služeb pomocí jedinečného číselného ID nazývaného UUID, které může být buď 16bitové (pro oficiálně přijaté služby BLE [32]) nebo 128bitové (pro vlastní služby).

Nejnižší úroveň v transakcích GATT je charakteristika, která zapouzdřuje jeden datový bod (může však obsahovat pole souvisejících dat např. kartézské souřadnice x, y, z). Podobně jako u služeb se každá charakteristika odlišuje pomocí předem definovaného 16bitového standardizovaného [32] nebo 128bitového UUID. Používání standardizovaných charakteristik zajišťuje interoperabilitu napříč softwarem a hardwarem různých výrobců [33].

## 4.4 Napájení

Jelikož se jedná o řídicí systém skleníku, nepředpokládá se, že by byla možnost snímače umístěné v blízkosti rostlin napájet ze sítě. Z tohoto důvodu bude možné jednotlivé moduly zařízení napájet bateriově s možností nabíjet baterii skrze 5V adaptér. Možnost napájet moduly pomocí 5V adaptéru dodává zařízení na univerzalitě, kdy je možno moduly umístěné v blízkosti elektrické sítě napájet nepřetržitě ze sítě.

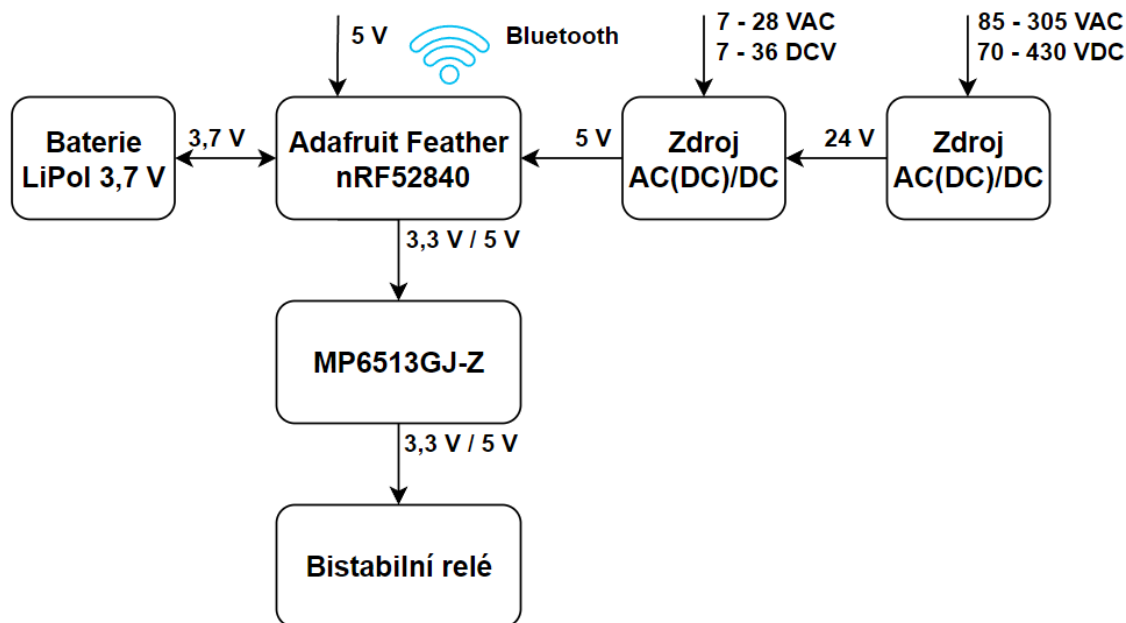
Jelikož se předpokládá, že řídicí modul aktoru bude řídit nějaký druh pohonu (čerpadlo, ventilátor, pohon stínící techniky atd.) v jeho blízkosti a tento pohon bude trvale napájen, je modul aktorů vybaven AC(DC)/DC zdroji. Pro zajištění velkého rozsahu vstupního napětí jsou na modulu dva zdroje zapojené kaskádně viz kapitola 5.5.

Stav nabití baterie v modulu bude monitorován a odesílán centrální řídicí jednotce. Jednotka bude tato data vyhodnocovat a v případě nízkého stavu nabití baterie upozorní uživatele na nutnost výměny baterie nebo dobítí.

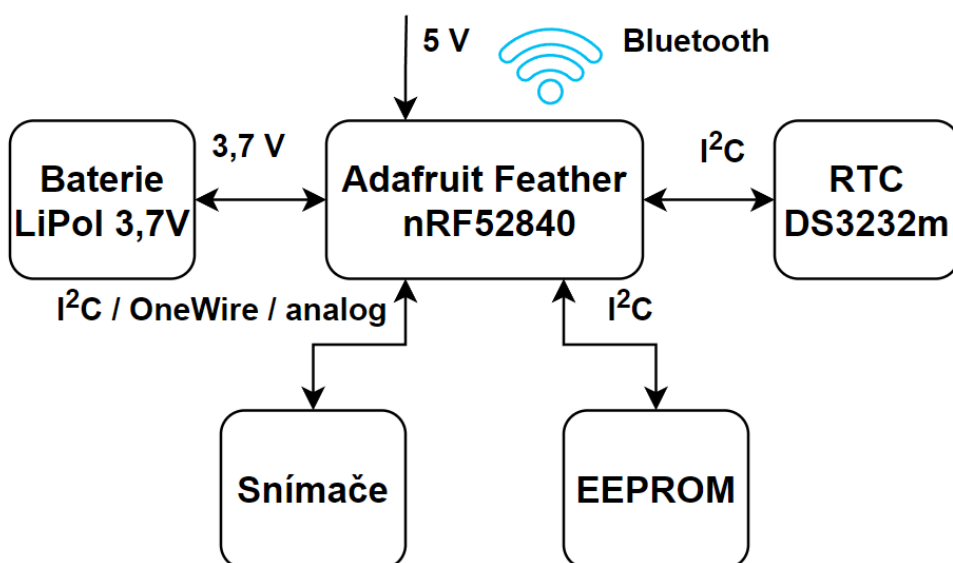
## 5 HARDWAROVÉ VYBAVENÍ

V této kapitole je uvedeno blokové schéma navrženého modulu snímačů a aktorů. Dále je v kapitole specifikován použitý mikrokontrolér, popsáno ovládání bistabilního relé, rozebrány napájecí obvody modulu a popsány doplňující obvody zařízení.

### 5.1 Blokové schéma



Obrázek 5.1: Blokové schéma modulu snímačů



Obrázek 5.2: Blokové schéma modulu aktorů

Řídicí modul senzorů se dá pomyslně rozdělit na 3 části. První část je část řídicí a je tvořena mikrokontrolérem Adafruit Feather nRF52840, který slouží pro obsluhu všech ostatních součástí zařízení a pro komunikaci s hlavní řídicí jednotkou. Druhou částí jsou doplňující obvody mikrokontroléru. Těmi jsou RTC DS3232m zajišťující reálný čas pro mikrokontrolér a tvorbu přerušení pro probuzení mikrokontroléru z režimu sleep a paměť EEPROM sloužící pro zálohu dat v případě nenavázání komunikace. Napájení řídicí části je možné buďto 5 V skrze micro usb konektor umístěný na mikrokontroléru nebo pomocí LiPol 3,7V baterie. Nabíjení baterie je možné skrze výše zmíněný micro usb konektor. Třetí částí je část snímačů. Pro ovládání aktorů slouží bistabilní relé, které je obsluhováno obvodem MP6513GJ-Z, což je obvod s H mostem používaný pro řízení DC motorů, relé atd. Sensorická část bude vždy tvořena konkrétními snímači potřebných v dané situaci. Snímače jsou k řídicímu modulu připojeny skrze I<sup>2</sup>C, OneWire nebo analogové rozhraní.

Řídicí modul aktorů se dá také pomyslně rozdělit na 3 části. První část je část řídicí a je opět tvořena mikrokontrolérem Adafruit Feather nRF52840, který slouží pro obsluhu všech ostatních součástí zařízení a pro komunikaci s hlavní řídicí jednotkou. Druhou částí je část napájecí. Stejně jako modul senzorů je také modul aktorů schopen pracovat s bateriovým napájením. Platí tedy stejné podmínky jako pro modul senzorů, tj. napájení z baterie, dobíjení baterie nebo napájení 5 V skrze usb port. Z důvodů, které byly zmíněny v kapitole 4.4, je však možno napájet zařízení také vyšším externím napětím. K tomuto slouží dva AC(DC)/DC zdroje, které jsou zapojené kaskádně. Více je uvedeno v kapitole 5.5. Třetí část je část pro ovládání aktorů. Pro toto slouží bistabilní relé, které je obsluhováno obvodem MP6513GJ-Z, což je obvod s H mostem používaný pro řízení DC motorů, relé atd. Celá tato část je navržena tak, aby bylo možné obsluhovat relé 3,3V, ale i 5V napětím. Více v kapitole 5.3 a 5.4.

## 5.2 Adafruit Feather nRF52840

Jedná se o mikrokontrolér s procesorem nRF52840 a integrovaným čipem pro nabíjení baterie a lineárním regulátorem. Tento mikrokontrolér je navržen přesně pro aplikace využívající Bluetooth komunikaci a napájení z baterie.

Na desce mikrokontroléru se nachází také programovatelná tlačítka, dvě programovatelné indikační LED a NeoPixel LED. Tyto LED diody mohou být využity pro signalizování stavu zařízení. Na desce se také nachází 2x5 0,05" konektor, který slouží pro připojení SWD (serial wire debug) debuggeru. Mikrokontrolér nabízí 21 GPIO, z toho 15 digitálních pinů, 6 x 12-bitové ADC piny a až 12 PWM výstupů (3 PWM moduly každý se 4 výstupy). Každý z 15-ti digitálních pinů může být libovolně namapován jako komunikační pin sběrnice I<sup>2</sup>C nebo SPI [34].

### 5.2.1 nRF52840

nRF52840 je postaven na 32bitovém CPU ARM® Cortex™-M4 s jednotkou s pohyblivou řádovou čárkou běžící na 64 MHz. nRF52840 je pokročilý SoC (system on a chip) vyvinutý zejména pro aplikace, kde je důležitá nízká spotřeba a bezdrátová komunikace. Nízké spotřeby čipu je dosaženo díky sofistikovanému systému adaptivního řízení spotřeby čipu.

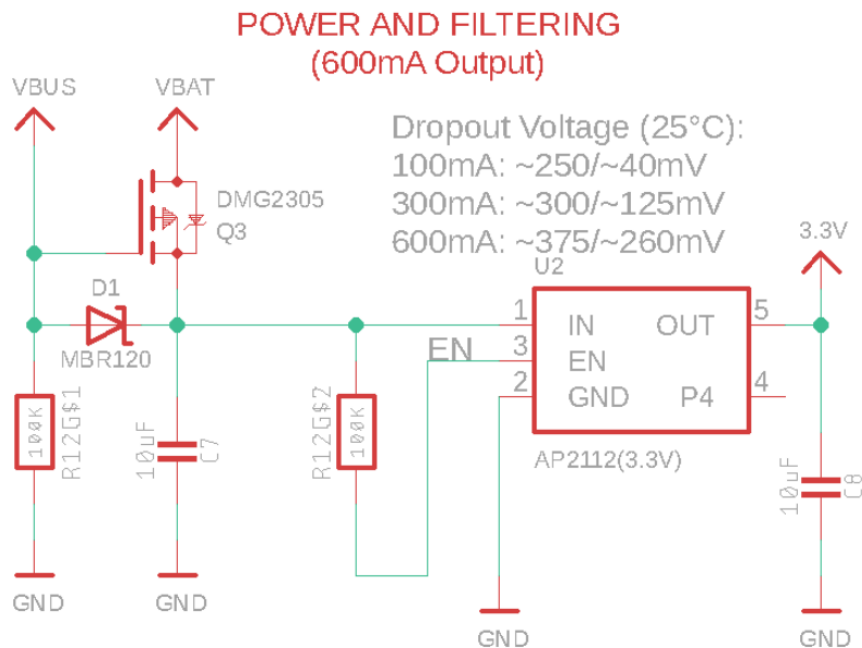
Byl navržen pro využití všech možností technologie Bluetooth 5, jako jsou Long range mód, Low power mód nebo systém mesh. nRF52840 je plně multiprotokolový s možností využití více komunikačních protokolů zároveň. Má podporu protokolů pro Bluetooth LE, Bluetooth mesh, Thread, Zigbee, 802.15.4, ANT atd.

Hlavními prvky čipu jsou Bluetooth 5, IEEE 802.15.4-2006, 2.4 GHz vysílač s přijímačem. Čip obsahuje dvě paměti, a to 1 MB flash a 256 kB RAM. Čip má také podporu easyDMA pro automatický přesun dat mezi pamětí mikroprocesoru a periferií. Čip také obsahuje několik oscilátorů jako např. interní 64 MHz oscilátor, interní 32,768 kHz RC oscilátor nebo externí 32,768 kHz. Dále obsahuje 5x časovač s možností nastavení bitové šířky časovače a 3x RTC časovač. Na čipu se nachází také teplotní senzor a modul NFC.

Co se týče periferních rozhraní, čip je vybaven 48 plně programovatelnými vstupně-výstupními porty, které nabídnou 12-bitový A/D převodník v 8 kanálech, 10x vstup pro dotykový senzor, 3x SPI rozhraní v režimu master a 3x SPI rozhraní v režimu slave, 2x I<sup>2</sup>C rozhraní v režimu master a 1x I<sup>2</sup>C rozhraní v režimu slave, 1x I<sup>2</sup>S rozhraní, 2x UART, 4 PWM moduly každý se 4 kanály, 64 úrovněvých komparátorů a 15 úrovněvých low power komparátorů [35].

### 5.2.2 Obvod lineárního regulátoru

Na desce plošného spoje mikrokontroléru se nachází mimo jiné lineární regulátor napětí, který je v navrhovaném modulu využit jako zdroj 3,3V napětí pro všechny obvody modulu. Jedná se konkrétně o CMOS nízkoubytkový lineární regulátor AP2112 [36]. Tento regulátor se vyrábí v několika verzích, kdy na mikrokontroléru je použita verze s výstupním napětím 3,3 V. Regulátor je schopen dodávat výstupní proud až 600 mA s úbytkem napětí 250 mV. Zapojení lineárního regulátoru na desce mikrokontroléru je uvedeno na obrázku 5.3.



Obrázek 5.3: Zapojení regulátoru AP2112 [37]

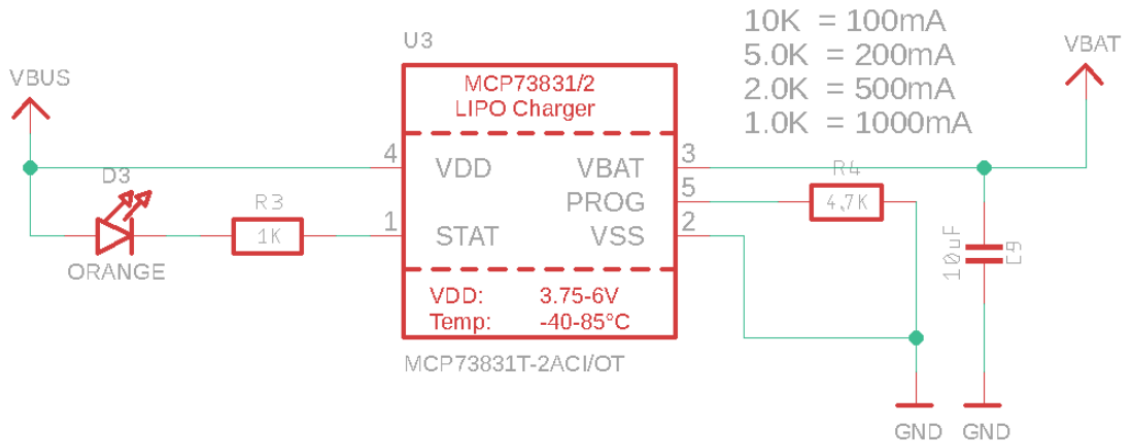
Regulátor je zapojen ve standardním zapojení doporučovaným výrobcem. Odpor R12G\$2 na vstupu EN slouží pro trvalé zapnutí regulátoru v případě, že je na jeho vstupu přivedeno napětí. Levá část schématu, což je tranzistor Q3, dioda D1 a odpor R12G\$1, slouží pro automatickou změnu vstupního napětí regulátoru. V případě, že je jako vstupní napětí použito napětí z baterie a dojde k připojení 5V napětí skrze micro usb konektor, dojde k automatickému přepnutí vstupního napětí regulátoru na toto napětí z usb. Při souběžném připojení 5V napětí skrze micro usb konektor a napětí z baterie dostává přednost 5V napětí z micro usb konektoru.

### 5.2.3 Obvod nabíjení baterie

Jak již bylo zmíněno výše, mikrokontrolér může být napájen z baterie. Pro napájení je doporučena baterie typu LiPol nebo LiIon. Aby bylo možné baterii nabíjet přímo skrze micro usb konektor mikrokontroléru, vybavili designéři mikrokontrolér obvodem pro dobíjení připojené baterie. Jedná se konkrétně o obvod MCP73831T-2ACI/OT, který slouží pro nabíjení LiPol a LiIon baterií. Obvod nabízí ochranu proti přepětí a podpětí na vstupu, ochranu proti přehřátí nebo ochranu proti zkratu na výstupu. Výstupní napětí tohoto nabíjecího obvodu je 4,2V. Výstupní nabíjecí proud se dá měnit v závislosti na kapacitě připojené baterie. Výstupní nabíjecí proud se nastavuje hodnotou rezistoru na vstupním pinu PROG [38]. Zapojení tohoto obvodu je uvedeno na obrázku 5.4.

## LIPO CHARGING

To charge the LIPO, insert the battery in the JST PH connector and connect USB at the same time.



Obrázek 5.4: Zapojení obvodu pro nabíjení baterie [37]

Jedná se o typické zapojení doporučené výrobcem. Vstupním napětím tohoto obvodu je napětí z micro usb konektoru. Signalizační dioda D3 slouží pro signalizaci průběhu nabíjení. Odpor R4 slouží pro již výše zmíněné nastavení výstupního nabíjecího proudu. Jeho hodnota 4,7 k udává, že výstupní nabíjecí proud se bude pohybovat kolem hodnoty 200 mA.

### 5.3 Bistabilní relé

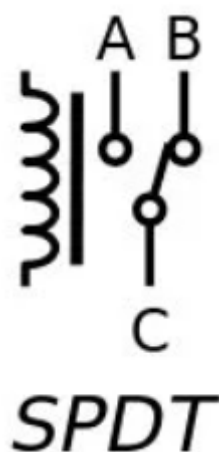
Pro ovládání aktorů bylo nutné vybavit modul výkonovým relé. Protože se jedná o zařízení, které je možno napájet také z baterie, použití klasických relé s kotvou uváděnou do výchozí polohy pomocí pružiny nebylo vyhovující. Proto byla zvolena varianta bistabilního SPDT relé.

Elektromagnetické bistabilní SPDT relé (uvedeno na obrázku 5.5) se skládá z cívky (elektromagnetu) a dvou přepínacích kontaktů. Klasické elektromagnetické DPDT relé má jeden stabilní stav. Při přivedení napětí na cívku změní klasické relé svůj stav (vstup C je přepnut na výstup B). Pokud je napětí od cívky odpojeno, relé se vrátí do svého původního stabilního stavu (vstup C je přepnut na výstup A) pomocí pružiny. Bistabilní elektromagnetické SPDT relé má stabilní stavy dva. Při přivedení napětí na cívku relé změní svůj stav (vstup C je přepnut na výstup B). Pokud je napětí od cívky odpojeno, relé svůj stav nezmění, nýbrž setrvává v předchozím stavu. Pro změnu stavu bistabilního relé je zapotřebí přivést na cívku napětí opačné polarity než napětí, které uvedlo relé do daného stavu. Při přivedení takového napětí na cívku změní relé svůj stav (vstup C je přepnut na výstup A) a setrvává v tomto stavu až do dalšího přepólování cívky [39].



Z popisu funkce bistabilního relé vyplývá, že ke změně stavu relé postačuje cívku napájet pouze po takovou dobu, která je nutná k přepnutí stavu relé. Pokud se relé přepne do požadovaného stavu, není nutné dále cívku napájet. Této výhody je využito také v navrhovaném systému, kdy cívky relé budou napájeny pouze po dobu nutnou k přepnutí stavu, a tím dojde k podstatné úspoře energie.

Jako konkrétní relé bylo vybráno relé od firmy OMRON s označením G5RL-U1-E-5DC. Toto relé má nominální napětí cívky 5 V a bezpečná hranice napětí pro změnu stavu relé je výrobcem udávána jako 70 % nominální hodnoty napětí cívky, tedy 3,5 V. Protože výstupní napětí integrovaného H mostu MP6513 je o 0,3 V větší než napětí napájecí (v případě napájení H mostu 3,3V napětím je výstupní napětí 3,6 V), je tak vhodné pro navržené zařízení pracující s 5V, ale i 3,3V napětím. Maximální zatížitelnost výstupních kontaktů relé je 16 A / 250 V AC a 16 A / 24 V DC [40].



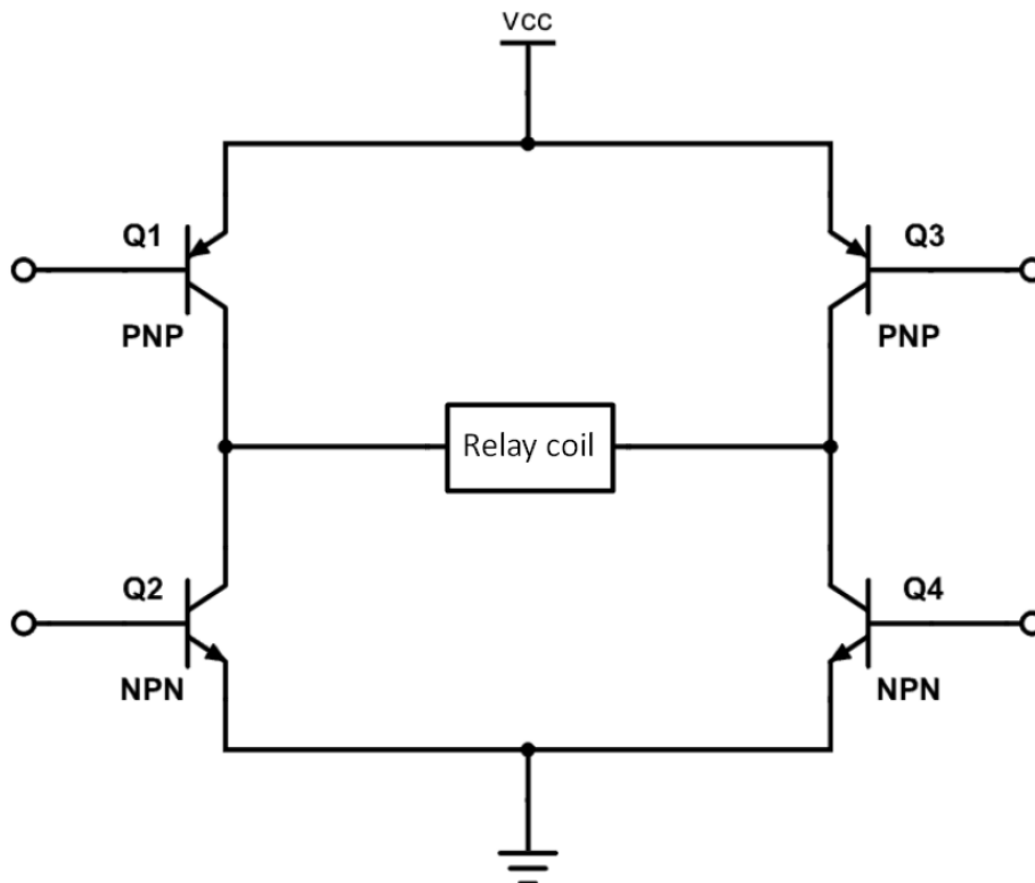
Obrázek 5.5: Schématická značka SPDT relé [39]

## 5.4 Ovládání relé

SPDT bistabilní relé mohou být přepínána mezi svými stavy pouze krátkými impulzy, což je pro úsporu energie a jednoduchost řízení ideální. K přepólování cívky bistabilního relé se běžně využívá H most, který se skládá ze 4 tranzistorů (viz obrázek 5.6). K přepínání relé mezi dvěma stavy postačuje ovládat dvojice tranzistorů (Q1 s Q2 a Q3 s Q4). Vzhledem k tomu, že u H mostu tvořeného z diskrétních součástek není možné zajistit odolnost zapojení vůči hazardním stavům, používají se k ovládání bistabilních relé integrované H mosty.

Pro ovládání relé byl tedy vybrán integrovaný H most MP6513. Tento obvod pracuje s napětím už od 2,5 V, což je výhoda, protože většina těchto integrovaných H mostů pracuje s napětím od 5 V, a to by bylo nevyhovující. Jedná se o H most řízený dvěma vstupními signály. Obvod obsahuje také ochranu proti zkratu, ochranu proti vysokému proudu, ochranu proti podpětí a tepelnou ochranu. Jeho maximální výstupní proud je 0,8 A, což je více než dostačující. Pokud jsou oba dva vstupní signály na napěťové úrovni low, obvod je uveden do režimu spánku a jeho spotřeba je pouze 12  $\mu$ A. Uvedení obvodu

do režimu spánku trvá 2 ms a jeho probuzení trvá 6,5  $\mu$ s. Jak už bylo zmíněno výše, obvod je ovládán pomocí dvou vstupních signálů. Jedná se o klasické digitální vstupy, tudíž odpadá nutnost řešit komunikaci mezi obvodem a mikrokontrolérem [40].

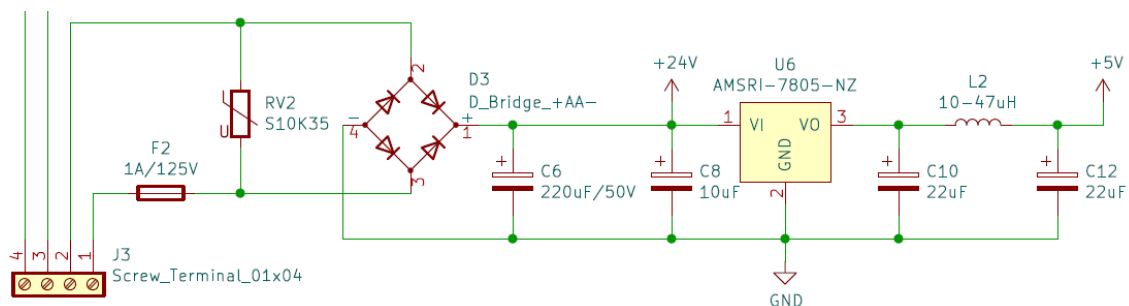


Obrázek 5.6: Schéma H mostu pro řízení bistabilního relé [42]

## 5.5 Napájecí zdroje modulu aktorů

### 5.5.1 AMSRI-78-NZ

Prvním ze dvou napájecích zdrojů umístěných na desce modulu aktorů je DC/DC měnič AMSRI-78-NZ od firmy AIMTEC [43]. Tento měnič je druhý v pořadí kaskády napájecích zdrojů a zajišťuje přeměnu vstupního napájecího napětí v rozsahu 6,5 – 36 VDC na 5V napětí, které je využito pro napájení mikrokontroléru Adafruit Feather nRF52840, případně také H mostu MP6513. Tento měnič má maximální výstupní proud 500 mA, což je více než dostačující. Zapojení měniče je uvedeno na obrázku 5.7.

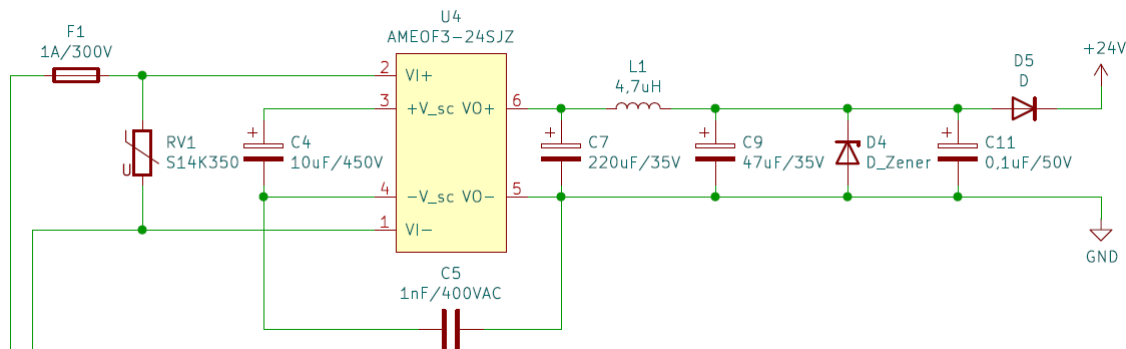


Obrázek 5.7: Zapojení měniče AMSRI-78-NZ

Toto zapojení vychází z doporučeného zapojení dané výrobcem. Na vstup měniče byl přidán usměrňovací můstek, který zajistí možnost připojení také střídavého napětí. Z tohoto důvodu jsou mírně upraveny hodnoty rozsahu vstupního napětí na 7–36 VDC a 7–28 VAC. Usměrňovacímu můstku je předřazena smd 1A pojistka a varistor RV2 jako přepět'ová ochrana. Na výstup měniče je připojena cívka L2 a kondenzátor C12 jako výrobcem doporučený filtr pro redukci šumu a zvlnění výstupního napětí.

### 5.5.2 AMEOF3-24SJZ

Druhým z napájecích zdrojů modulu aktoru je AC(DC)/DC měnič AMEOF3-24SJZ od firmy AIMTEC [44]. Tento měnič je umístěn jako první v kaskádě zdrojů a slouží pro konverzi vstupního napětí v rozsahu 85–305 VAC a 70–430 VDC na výstupní napětí 24 V, které je dále upraveno druhým zdrojem v kaskádě na 5 V. Maximální výstupní proud měniče je 125 mA, což je také vyhovující. Zapojení tohoto měniče je uvedeno na obrázku 5.8.



Obrázek 5.8: Zapojení měniče AMEOF3-24SJZ

Zapojení opět vychází z doporučeného zapojení dané výrobcem. Na vstupu měniče je připojena trubičková 1A pojistka a varistor RV1 jako přepět'ová ochrana. Na výstupu měniče je zapojeno několik součástek doporučených výrobcem, a to pro filtraci a stabilizaci výstupního napětí. Dioda D5 propojuje výstup tohoto zdroje se vstupem druhého zdroje. Slouží také jako ochrana tohoto zdroje před napětím, které by se mohlo dostávat na výstup ze vstupu druhého zdroje.

## 5.6 Doplnující obvody

Pro sledování reálného času je v obvodu použito externí RTC. Konkrétně se jedná o obvod DS3232M od firmy Maxim Integrated. Obvod pracuje s přesností  $\pm 5$  ppm a je navržen pro použití v zařízeních pracujících s nízkou spotřebou. Teplotní kompenzace obvodu zaručuje stálou přesnost  $\pm 5$  ppm v celém spektru pracovní teploty obvodu. Rozsah pracovní teploty je od  $-40$  °C do  $85$  °C, RTC obsahuje sekundy, minuty, hodiny, dny, den v měsíci, měsíc a rok. Datum je automaticky upraveno pro měsíce, které mají méně než 31 dní. RTC hlídá také přestupné roky. Formát času může být zvolen na 12h nebo 24h. Obvod obsahuje také dva programovatelné budíky (přerušení) a generátor obdélníkového signálu. RTC má dva napájecí vstupy, z nichž jeden je dedikován pro připojení externí baterie pro zálohu času v případě výpadku primárního napájecího zdroje. Obvod je schopen upravovat pracovní operace v závislosti na tom, z jakého zdroje je napájen. V případě, že je napájen z baterie, obvod upraví některé své funkce (např. prodlouží interval, kdy je teplotně kompenzován), aby uspořil co nejvíce energie. RTC bude sloužit pro generování přerušení pro probouzení mikrokontroléru z režimu spánku a také pro získání časové značky naměřených dat. RTC komunikuje s mikrokontrolérem pomocí sběrnice I<sup>2</sup>C [45].

Druhým doplňujícím obvodem modulu je paměť EEPROM. Konkrétně se jedná o čip CAT24C04WI-GT3 firmy Onsemi o velikosti 4 Kb. Tato paměť bude sloužit pro identifikaci modulu po připojení mikrokontroléru. Z EEPROM budou vyčtena data identifikující každý modul. Dle dat uložených v této paměti mikrokontrolér pozná, zda se jedná o modul se snímači nebo modul obsluhující aktory. V případě, že se bude jednat o modul se snímači, mikrokontrolér také rozezná, jaké snímače jsou k modulu připojeny a jaká data tedy bude měřit a přeposílat hlavní řídicí jednotce. EEPROM komunikuje s mikrokontrolérem pomocí sběrnice I<sup>2</sup>C. Spotřeba paměti v režimu nečinnosti je pouhých 1  $\mu$ A [46].

## 6 PRAKTICKÁ REALIZACE ZAŘÍZENÍ

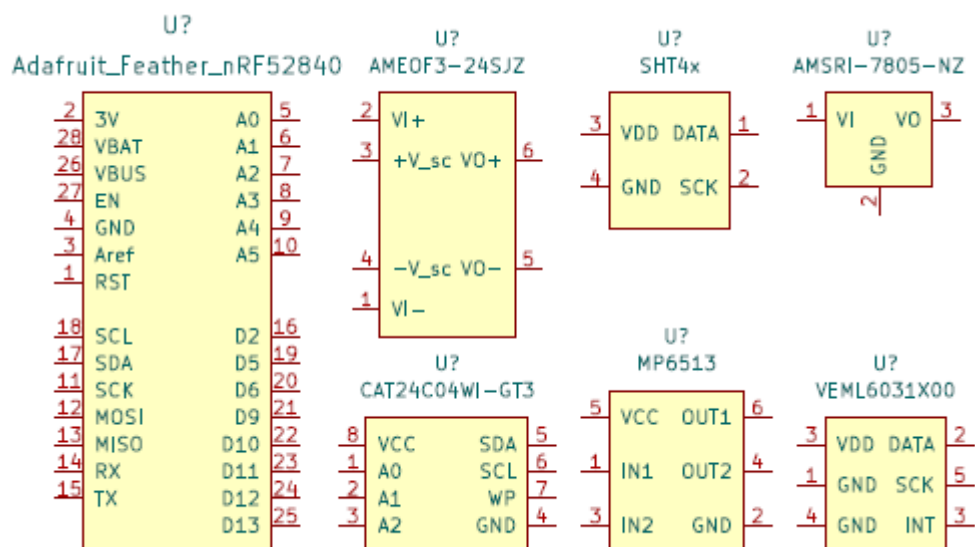
V této kapitole je popsán návrh desky plošného spoje a problémy, které při návrhu DPS vznikly. Dále jsou v kapitole specifikovány požadavky na ochranné krabičky zařízení a ukázka realizace krabiček.

### 6.1 Návrh desky plošného spoje

Pro návrh desky plošného spoje byl využit program KiCad. Program KiCad je open-source software pro tvorbu schémat a DPS a existuje pro něj mnoho knihoven a návodů také v češtině.

#### 6.1.1 Schéma

Při kreslení schématu bylo nutné vytvořit několik nových schématických značek, které se nenacházely v základním balíku knihoven KiCadu. Konkrétně se jedná o mikrokontrolér Adafruit Feather nRF52840, paměť EEPROM CAT24C04, driver pro řízení relé MP6513, DC/DC měnič AMSRI-78-NZ, AC/DC měnič AMEOF3-24SJZ, teplotní senzor SHT4X a senzor osvětlení VEML6031. Vytvořené schématické značky součástek jsou uvedeny na obrázku 6.1.

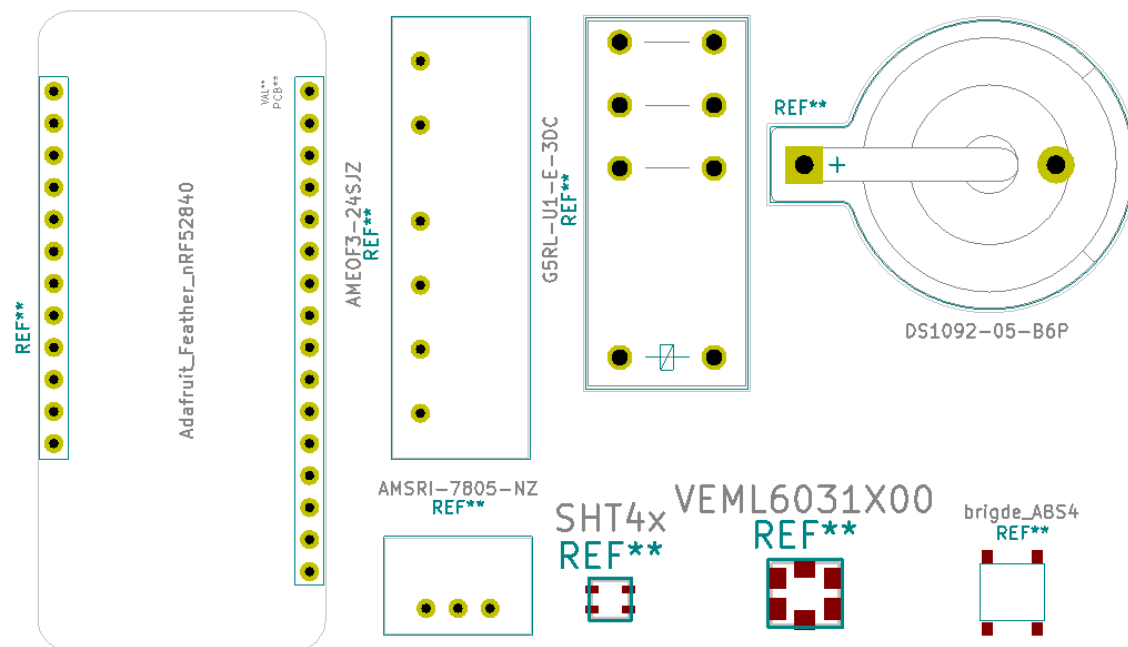


Obrázek 6.1: Vytvořené schématické značky součástek

#### 6.1.2 DPS

Jak již bylo zmíněno výše, pro některé součástky, které se nenacházely v základních knihovnách KiCadu, bylo nutné vytvořit schématické značky a pouzdra. Vytvoření nových pouzder se týkalo mikrokontroléru Adafruit Feather nRF52840, pouzdra pro záložní baterii RTC, bistabilního relé G5RL-U1-E-3DC, DC/DC měniče AMSRI-78-NZ,

AC/DC měniče AMEOF3-24SJZ, můstkového usměrňovače ABS4, teplotního senzoru SHT4X a senzoru osvětlení VEML6031. Senzor teploty a osvětlení jsou typu MEMS, a proto byla jejich pouzdra na obrázku 6.2 výrazně zvětšena.



Obrázek 6.2: Vytvořená pouzdra součástek

Výsledkem návrhu DPS jsou tři desky. 3D modely desek jsou vyobrazeny v příloze E. První je deska plošného spoje pro řídicí modul snímačů. Na této desce se nachází patice pro připojení mikrokontroléru Adafruit Feather nRF52840, obvody RTC a EEPROM a konektory pro připojení senzorů.

Druhou deskou je deska plošného spoje pro řídicí modul aktorů. Tato deska je rozšířena oproti předchozí o dva AC(DC)/DC měniče zapojené do kaskády, driver pro řízení relé, samotné relé, svorky kontaktů přepínacího relé a svorky pro připojení napájení.

Na třetí desce se nachází snímače teploty, vlhkosti a osvětlení. Tato deska bude vystavena vnějšímu prostředí a k hlavní řídicí desce bude připojena pomocí konektoru.

### 6.1.3 Návrh pull-up odporů pro I<sup>2</sup>C

Jelikož na desce mikrokontroléru nejsou pull-up rezistory pro I<sup>2</sup>C sběrnici, bylo nutné tyto rezistory osadit na desku modulu. Pro výpočet hodnoty pull-up rezistorů se ve specifikacích sběrnice udávají vzorce [47]:

$$R_{p(MIN)} = \frac{V_{DD} - V_{OL(MAX)}}{I_{OL}} \quad (1)$$

pro spodní hranici pull-up odporu, kde  $V_{DD}$  je napájecí napětí sběrnice,  $V_{OL(MAX)}$  je

maximální hodnota napětí úrovně LOW a  $I_{OL}$  je hodnota proudu odebíraného zařízením při úrovni LOW, a vzorec

$$R_{p(MAX)} = \frac{t_r}{0,8473 \cdot C_b} \quad (2)$$

pro horní hranici pull-up odporu, kde  $t_r$  je maximální doba náběhu signálu SDA a SCL a  $C_b$  je maximální kapacita sběrnice pro každý z vodičů SDA a SCL.

Pro správné určení hodnoty pull-up rezistorů bylo zapotřebí zjistit přibližnou kapacitu navrhované sběrnice. Toho bylo dosaženo vyčtením hodnot kapacity pinů jednotlivých zařízení na sběrnici z datasheetu těchto zařízení. Hodnota kapacity v součtu je 40 μF. Hodnotu kapacity navržené sběrnice samotné je problematické určit, proto byla celková kapacita sběrnice i s připojenými moduly stanovena na 100 μF. Pro komunikaci na sběrnici bude využit standardní mód, z čehož vyplývají hodnoty  $I_{OL} = 3 \text{ mA}$  a  $t_r = 1000 \text{ ns}$ . Napájecí napětí sběrnice  $V_{DD}$  je 3,3 V a  $V_{OL(MAX)} = 0,4 \text{ V}$ . Dosazením do rovnic (1) a (2) dostaneme

$$R_{p(MIN)} = \frac{V_{DD} - V_{OL(MAX)}}{I_{OL}} = \frac{3,3 - 0,4}{3 \cdot 10^{-3}} = 966,67 \, \Omega$$

$$R_{p(MAX)} = \frac{t_r}{0,8473 \cdot C_b} = \frac{1000 \cdot 10^{-9}}{0,8473 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = 11,80 \, k\Omega$$

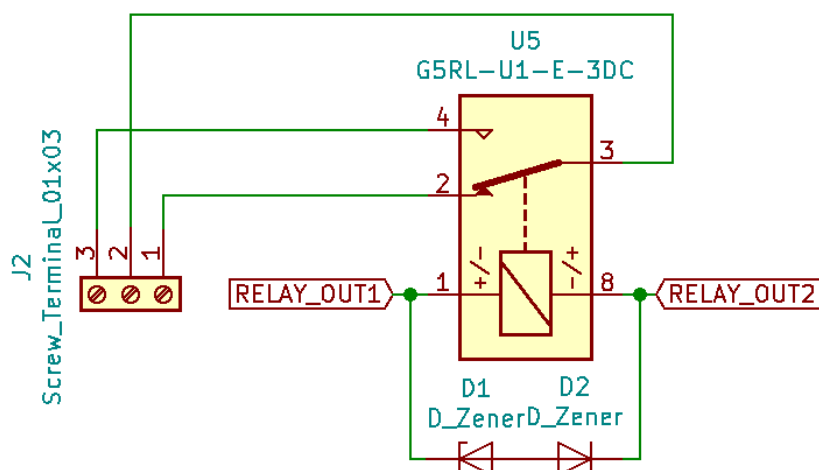
Rozsah pull-up odporu je tedy 966,67 – 11800 Ω. Protože se jedná o sběrnici navrženou pro standardní rychlosti a je možné, že k modulu bude některý ze senzorů komunikující po sběrnici I<sup>2</sup>C připojen pomocí kabelu neznámé délky, byla zvolena hodnota pull-up rezistoru 10 kΩ.

#### 6.1.4 Ochranné diody pro relé

SPDT relé obsahuje cívku, která přepíná výstupní kontakty relé. Více o bistabilním relé v kapitole 5.3. Jelikož cívka relé je induktivní zátěž, dochází při jejím spínání a rozpínání k tvorbě napěťových impulzů. Tyto impulzy mohou způsobit poškození řídicího obvodu, který relé spíná.

Proto bylo pro ochranu tohoto obvodu využito zapojení cívky relé společně se dvěma antisériově zapojenými zenerovými diodami. Schéma tohoto zapojení je uvedeno na obrázku 6.3.

Takto zapojené zenerovy diody D1 a D2 se zenerovým napětím v rozmezí zhruba 5–6 V slouží jako zhášecí obvod pro napěťové pulzy generované cívkou relé.



Obrázek 6.3: Zapojení ochranných diod u cívky relé

### 6.1.5 Izolační mezery na PCB v silové části

Na DPS řídicího modulu aktoru bude osazeno relé, které má dimenzované výstupní kontakty na 240 V / 16 A. Proto bylo nutné zajistit dostatečné ochranné mezery na DPS mezi jednotlivými silovými cestami. Dle normy IPC-2221B je bezpečná izolační mezera mezi dvěma silovými cestami na DPS s napětím 301-500 Vpp 2,5 mm. Na navržené desce plošného spoje je proto minimální vzdálenost mezi všemi silovými cestami nacházejících se na jedné straně desky minimálně 2,5 mm [48].

Tabulka 6.1: Výňatek z normy IPC-2221B [48]

Napětí mezi vodiči (DC nebo AC peak-to-peak)	Minimální vzdálenost mezi dvěma vodiči na DPS			
	[mm]			
	B1	B2	B3	B4
0-15	0,05	0,1	0,1	0,05
16-30	0,05	0,1	0,1	0,05
31-50	0,1	0,6	0,6	0,13
51-100	0,1	0,6	1,5	0,13
101-150	0,2	0,6	3,2	0,4
151-170	0,2	1,25	3,2	0,4
171-250	0,2	1,25	6,4	0,4
251-300	0,2	1,25	12,5	0,4
<b>301-500</b>	0,25	<b>2,5</b>	12,5	0,8
>500	0,0025/V	0,005/V	0,025/V	0,00305/V

B1 – Vnitřní vodiče

B2 – Vnější vodiče, nekryté, do výšky 3050 m.n.m.

B3 – Vnější vodiče, nekryté, nad 3050 m.n.m.

B4 – Vnější vodiče, kryté vrstvou polymeru, libovolná výška



## 6.2 Ochranné krabičky

V prostoru skleníku je teplým vzduchem obecně zadržováno více vlhkosti, než je tomu v klasickém prostředí. Jelikož je zařízení navrhováno pro snímání a ovládání procesních veličin přímo v prostoru skleníku, je zapotřebí zajistit dostatečnou ochranu zařízení proti vniknutí kapalin, zejména kondenzující vodě a vlhkosti. Tisk krabiček na 3D tiskárně je v tomto případě nevyhovující z důvodu složitého zajištění zcela vodotěsných stěn. Z tohoto důvodu byly použity klasické instalační ochranné plastové krabičky, které jsou na trhu běžně dostupné. Jedná se konkrétně o krabičky vyrobené z plastu ABS a třídou ochrany IP65 (Chráněno proti tryskající vodě. Voda míří 6,3 mm tryskou ve všech úhlech při průtoku 12,5 litrů za minutu při tlaku 30 kN/m<sup>2</sup> po dobu nejméně 3 minuty ze vzdálenosti 3 metry [49]).

Pro zajištění co jak nejlepší ochrany zařízení před vniknutím vody jsou zařízení v krabičkách přichycena na distančních sloupcích, které jsou ke krabičce přilepeny. Tímto je zajištěn minimální počet otvorů v krabičce, kterými by se mohla vlhkost nebo voda dostat do krabičky. Pro případy, kdy je nutné mít v krabičce průchozí otvor (napájení, měření teploty a vlhkosti, teplotní sonda, pH sonda atd.), je pro tento otvor použita kabelová vývodka Pg, která zajišťuje třídu ochrany IP68 pro tento otvor.

Senzor teploty a vlhkosti musí být z principu vystaven vnějšímu prostředí. Stejně tak jako celé zařízení musí však být deska s tímto senzorem chráněna před kondenzující vodou. Toho je docíleno pomocí speciálního krytu ze slinutého polyetylénu s velikostí pórů 25 µm. Tento kryt je přímo určen k použití se snímači vlhkosti. Díky malé velikosti pórů odpuzuje vodu a chrání desku před prachem a stříkající vodou [50]. Výsledná zařízení v krabičkách jsou vyobrazena v příloze F.

Software výsledného zařízení modulu snímačů bude navržen tak, že se zařízení bude nacházet po většinu času v režimu spánku (více v kapitole 7). Protože by někdy mohlo být potřeba zařízení z režimu spánku probudit manuálně, jsou v krabičkách modulů snímačů umístěny magnetické spínací kontakty (jazýčkové relé), které lze magnetem skrze krabičku sepnout, a tak zařízení uvést do aktivního režimu. Řešení uvedení zařízení do aktivního režimu pomocí tlačítka, které by se nacházelo na krabičce, je značně problémové z důvodu zajištění vodotěsnosti tlačítka, případně jeho spínací části. Řešení s magnetickým kontaktem, který se nachází uvnitř krabičky, nenarušuje vodotěsnost zařízení. Jedinou nevýhodou tohoto řešení je nutnost dbát na umístění zařízení mimo zdroje magnetického pole, které by mohlo nevyžádaně uvádět zařízení do aktivního režimu. Ukázka praktické realizace ochranných krabiček je uvedena v příloze F.

## 7 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ MODULŮ

V této kapitole jsou popsány programy použité v rámci řešení této práce, použité knihovny a blokové diagramy řídicích programů.

### 7.1 Vývojové prostředí PlatformIO

PlatformIO je open source multiplatformní vývojové prostředí používané pro vývoj softwaru pro embedded aplikace. Jedná se o rozšíření pro editor zdrojového kódu Visual Studio Code. Platformio obsahuje správce knihoven, sad pro vývoj softwaru (SDK) a frameworků, nástroje pro překlad a nahrání výsledného projektu do mikrokontroléru, debugger a další nástroje potřebné pro vývoj aplikace pro emmbeded systémy. Toto vývojové prostředí lze provozovat jak pod operačním systémem Windows, tak Linux nebo Mac OS. V současnosti podporuje více než 47 platforem (Espressif, Atmel AVR, Atmel SAM, Freescale Kinetis, stm32 atd.), více než 1300 vývojových desek a 25 frameworků (CMSIS, WiringPi, mBed, Arduino, Espidf apod.). Velkou výhodou tohoto prostředí je také více než 12 tisíc knihoven připravených k okamžitému použití. Jedná se o oficiální knihovny spravované PlatformIO labs, ověřené knihovny spravované výrobci daných zařízení a komunitní knihovny [51].

### 7.2 Použité knihovny

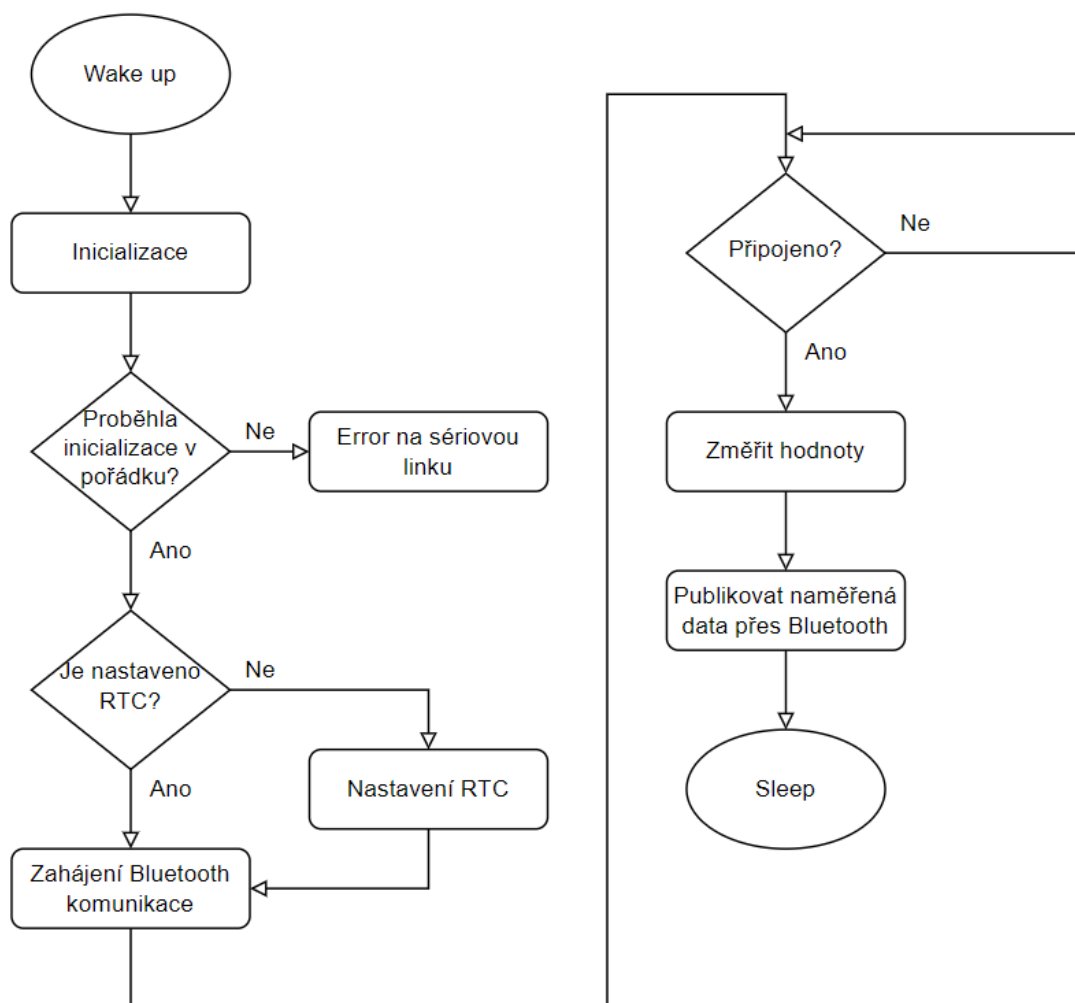
V projektu jsou použity základní knihovny nezbytné pro základní fungování mikroprocesoru nRF52840, ale také specifické knihovny k jednotlivým částem řídicího systému, zejména pak snímačům. Všechny tyto knihovny jsou volně k dispozici v seznamu knihoven PlatformIO:

- Arduino.h – oficiální arduino framework. Tato knihovna přidává další knihovny pro základní fungování mikroprocesoru nRF52840 a jeho periférií.
- Wire.h – knihovna pro obsluhu sběrnice I<sup>2</sup>C
- OneWire.h – knihovna pro obsluhu sběrnice OneWire
- bluefruit.h – knihovna společnosti Adafruit pro obsluhu Bluetooth Low Energy mikrokontroléru Adafruit Feather nRF52840
- Adafruit\_SHT4x.h – knihovna pro obsluhu snímače teploty a vlhkosti SHT4x
- DallasTemperature.h – knihovna pro obsluhu snímače teploty DS18B20

Dále jsou v projektu vytvořeny a použity vlastní knihovny:

- veml6031.h – knihovna pro obsluhu senzoru osvětlení VEML6031
- relay.h – knihovna pro obsluhu relé pomocí driveru MP6513GJ-Z
- tempHumiSens.h, illuSens.h – knihovny pro obsluhu modulů senzorů
- BLEUtils.h – definice UUID a callbacky pro Bluetooth komunikaci

### 7.3 Řídicí program modulu snímačů



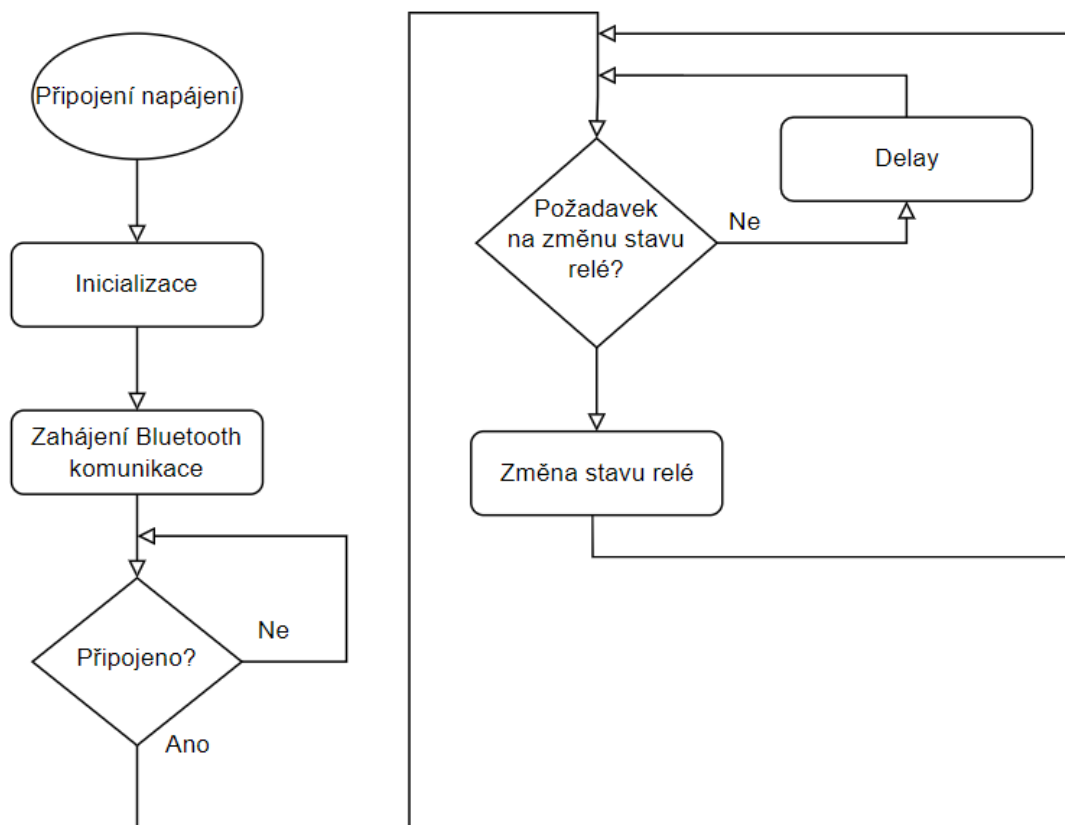
Obrázek 7.1: Blokový diagram řídicího programu modulu snímačů

Blokový diagram řídicího programu modulu snímačů je uveden na obrázku 7.1. Probuzení zařízení může být iniciováno dvěma způsoby. Buďto periodicky pomocí přerušení generované RTC obvodem, nebo mimo periodu sepnutím magnetického kontaktu pomocí magnetu. Po připojení napájení nebo probuzení řídicího modulu snímačů přejde program do fáze inicializace. V tomto kroku jsou inicializovány veškeré periferie připojené k tomuto modulu. Pokud inicializace některého ze zařízení neproběhne správně, program vypíše chybové hlášení na sériovou linku a dále již neprovádí žádnou činnost až do vyřešení této chyby a restartu programu. Pokud proběhla inicializace v pořádku, program zkontroluje, zda je nastaveno periodické buzení zařízení pomocí RTC. Pokud toto nastaveno není, program provede konfiguraci RTC a nastavení periodického buzení.

Po této kontrole jsou nastaveny parametry Bluetooth a zahájena komunikace. Po připojení k centrální řídicí jednotce (Raspberry PI 4 model B, popsáno v kapitole 8.4.2)

se provede naměření dat ze všech připojených senzorů. Po naměření všech dat dochází k publikování hodnot centrální řídicí jednotce a přechodu zařízení do režimu spánku.

## 7.4 Řídicí program modulu aktorů



Obrázek 7.2: Blokový diagram řídicího programu modulu aktorů

Blokový diagram řídicího programu modulu aktorů je uveden na obrázku 7.2. Protože je nutné, aby aktory reagovaly na požadavky centrální řídicí jednotky v řádech desítek sekund, nepřechází řídicí program modulu aktorů do režimu spánku. Jelikož se předpokládá napájení modulu externím napájením nebo velkokapacitní baterií, není přechod zařízení do režimu spánku nutný.

Po připojení napájení provede program inicializační nastavení. Poté je provedeno nastavení parametrů komunikace Bluetooth a zahájení komunikace. Po připojení zařízení k centrální řídicí jednotce (Raspberry PI 4 model B, popsáno v kapitole 8.4.2) program čeká na požadavek centrální jednotky na změnu stavu relé. Pokud tento požadavek obdrží, provede se změna stavu relé a program dále vyčkává na další požadavky.

## 8 CLOUDOVÁ PLATFORMA

V první části této kapitoly jsou stanoveny požadavky na cloud, dále je proveden průzkum trhu cloudových služeb. V další části je blíže popsána cloudová služba ThingsBoard použita v řešení diplomové práce.

### 8.1 Požadavky na cloud

Navrhovaný řídicí systém pracuje se senzory, ale také obsluhuje aktory. Základním požadavkem na cloudovou službu tedy je, aby byla schopna obousměrně komunikovat se zařízením. Tuto podmínku dnes splňuje většina cloudových služeb. Jelikož je pro pěstování ve sklenících nejdůležitější sledování procesních veličin a jejich vývoj v čase, dalším z požadavků je možnost data vizualizovat ve formě grafů. Navržený systém pracuje s bezdrátovou komunikací Bluetooth Low Energy, a proto byla podmínkou snadná implementace této bezdrátové komunikace do celkového systému cloudu.

### 8.2 Průzkum trhu

Na trhu cloudových služeb pro IoT je nespočetně mnoho produktů, které se dají pro tuto aplikaci použít. Některé produkty nabízí univerzálnější řešení pro pokrytí co jak největšího spektra uživatelů, jiné se snaží nabídnout své jedinečné řešení vyvinuté pro použití ve specifických případech. Cloudových služeb existuje opravdu mnoho, a proto byli do tohoto průzkumu vybráni zástupci velkých, ale i menších cloudových řešení pro IoT.

#### 8.2.1 Amazon Web Services IoT

Službou, která dominuje na trhu cloudových řešení, je Amazon Web Services IoT. Amazon jako první skutečně proměnil prostý cloud pro zálohu dat na nástroj, který je schopen s daty dále pracovat. Jelikož své řešení vyvíjí už od roku 2004, má pravděpodobně nejkomplexnější paletu funkcí a dostupných nástrojů na trhu.

Web Services IoT je extrémně škálovatelná platforma, která se chlubí možností připojit miliardy zařízení a provádět biliony interakcí mezi nimi. Zde nastává otázka, zda je vůbec někdo schopen takto velké kapacity využít či se k nim alespoň přiblížit. Amazon také nabízí online kurzy, které pomohou novým uživatelům rychleji proniknout do nabízených možností cloudu. Součástí služby je také sada pro vývoj vlastního softwaru, která pomáhá vývojářům rychleji vyvíjet aplikace určené pro Amazon Web Services IoT.

Nejkomplexnější paleta funkcí a dostupných nástrojů na trhu se ovšem promítá v ceně produktu. Amazon účtuje poplatky za milion zpráv odeslaných nebo přijatých mezi koncovými body. V případě rozsáhlého systému nebo systému se složitějším zpracováním dat proto může zákazník zaplatit více než u služeb jiných společností.

Amazon se toto snaží kompenzovat možností množstevních slev při větším využití cloudových služeb [52].

### **8.2.2 Microsoft Azure IoT Suite**

Jedním z dalších gigantů na trhu cloudových služeb pro IoT je služba Azure IoT Suite od společnosti Microsoft. Tato služba cílí spíše na větší firmy, a tak nabízí komplexní řešení se širokým zaměřením.

Azure láká své zákazníky na bezkonkurenční zabezpečení svého systému. Na svém webu se prezentuje jako služba, kterou využívají především podniky a státní instituce, pro které je zabezpečení cloudových služeb na prvním místě. Dalším lákadlem je funkce, která zajišťuje publikování, distribuci a správu bezdrátových aktualizací pro všechny zařízení od malých senzorů po zařízení na úrovni brány. Mezi další výhody patří možnost integrace služeb třetích stran do cloudu nebo integrace s dalšími službami společnosti Microsoft.

Pro nováčky ve světě IoT cloudových služeb může být zavedení takto rozsáhlého systému složité. Pro tyto případy nabízí Azure možnost online kurzů, které by měly uživatele zaškolit natolik, aby byl schopen nabízené možnosti cloudu plně využít a implementovat. Tyto online kurzy ve formě videí jsou zdarma, obsáhlejší kurzy pod vedením instruktora jsou poté zpoplatněny. Cena cloudové služby se odvíjí od počtu odeslaných/přijatých zpráv (platí omezení velikosti jednotlivých zpráv na 4 Kb) a velkou nevýhodou je potom nutnost platit vyšší stupeň předplatného pro možnost odesílat data z cloudu do zařízení [53].

### **8.2.3 Google Cloud IoT**

Dalším zástupcem velkých cloudových služeb je řešení Google Cloud IoT. Tato služba cílí také na velké společnosti. Hlavním cílem této platformy je dělat věci snadno a rychle. Poskytuje širokou platformu funkcionalit pro široké spektrum zákazníků.

Hlavní předností tohoto systému je efektivní práce s velkoobjemovými daty. Zákazníci tuto službu vyhledávají také z důvodu velkokapacitních uložišť, která Google nabízí. Další výhodou je možnost propojit tento cloud s Google Maps Platform a vizualizovat tak polohu IoT zařízení v reálném čase. Další doménou tohoto řešení je možnost využití a implementace dalších služeb společnosti Google v oblasti zpracování dat, analýzy, strojové inteligence a zpracování obrazu. Zákazníci dostávají také možnost využívat soukromou globální optickou síť. Ceny Google Cloud IoT se odvíjí od minut, po které jsou využívány jednotlivé nástroje. Toto řešení může být pro zákazníka výrazně výhodnější než poplatky za množství odeslaných/přijatých zpráv.

Jelikož se opět jedná o komplexní službu zasahující široké spektrum využitelnosti, nemusí být pro potenciální klienty jednoduché do tohoto složitého systému proniknout. Další možnou nevýhodou je fakt, že většina služeb, které je možné integrovat, je od společnosti Google, a nenabízí tak velkou integraci služeb třetích stran [54].

### 8.2.4 ThingSpeak

ThingSpeak je open-source software, který uživatelům umožňuje vizualizovat, agregovat a analyzovat data ze zařízení pro IoT v prostředí cloudu. Jedná se o cloudovou službu zaměřující se na užší spektrum zákazníků než velké cloudové služby popsané výše.

ThingSpeak má integrovanou podporu numerického výpočetního softwaru MATLAB od společnosti MathWorks. Umožňuje uživatelům ThingSpeak analyzovat a vizualizovat nahraná data pomocí MATLABu bez nutnosti nákupu licence. Uživatelé, kteří mají zkušenosti se softwarem MATLAB, tak mohou velice snadno a rychle psát a spouštět programy v tomto jazyce. Jak z předchozího popisu vyplývá, tato cloudová platforma se zaměřuje na vizualizaci a práci s daty, a přestože nenabízí svým uživatelům tak komplexní služby jako velké společnosti, integrace MATLABu je pro mnoho uživatelů velkou výhodou. Jelikož se jedná o open-source řešení, vznikla kolem služby ThingSpeak početná komunita uživatelů, kteří jsou ochotni novým uživatelům pomoci se zaškolením a rovněž vytváří různé návody a dokumentaci pro tento software.

Předplatné služby ThingSpeak je roční a je nabízeno v několika verzích. Verze jsou rozděleny podle způsobu použití platformy (domácí/komerční) a také jsou dostupné verze pro studenty nebo akademický výzkum. Jednotlivé verze předplatného se liší počtem možných přenesených zpráv ročně, počtem připojených zařízení nebo časem, který je dostupný pro výpočet v softwaru MATLAB [55].

### 8.2.5 ThingsBoard

ThingsBoard je taktéž open-source platforma, která opět cílí na skupinu uživatelů, kteří nevyžadují komplexní nástroje cloudových služeb. ThingsBoard se stejně jako ThingSpeak zaměřuje výhradně na sběr, zpracování a vizualizaci dat.

Hlavní předností ThingsBoard je možnost vytvořit cloud na lokálním serveru a mít tak cloud plně pod svou kontrolou. ThingsBoard se snaží přijít s řešením, které bude jednoduché na správu, a noví zákazníci zvládnou zavedení této cloudové služby velice snadno a rychle. Příkladem je nástroj “Rule Engine“, což je pracovní nástroj pro vytváření pracovních postupů založených na událostech (např. po obdržení zprávy zpracovat informace). Tento nástroj využívá jednoduché grafické prostředí, kde je možné jednotlivé funkční bloky propojovat mezi sebou a vytvářet tak hierarchii postupu. Dalším příkladem je nástroj “White Labeling“, který se používá pro nastavení jednotné grafické úpravy vytvářené aplikace. Jednotný grafický styl je poté přenesen do celé aplikace. ThingsBoard nabízí více než 30 předpřipravených konfigurovatelných “Widgetů“ (grafy, tabulky, ovládací prvky atd.), které jsou určeny k okamžitému použití. Je zde také možnost vytvářet vlastní widgety pomocí vestavěného editoru.

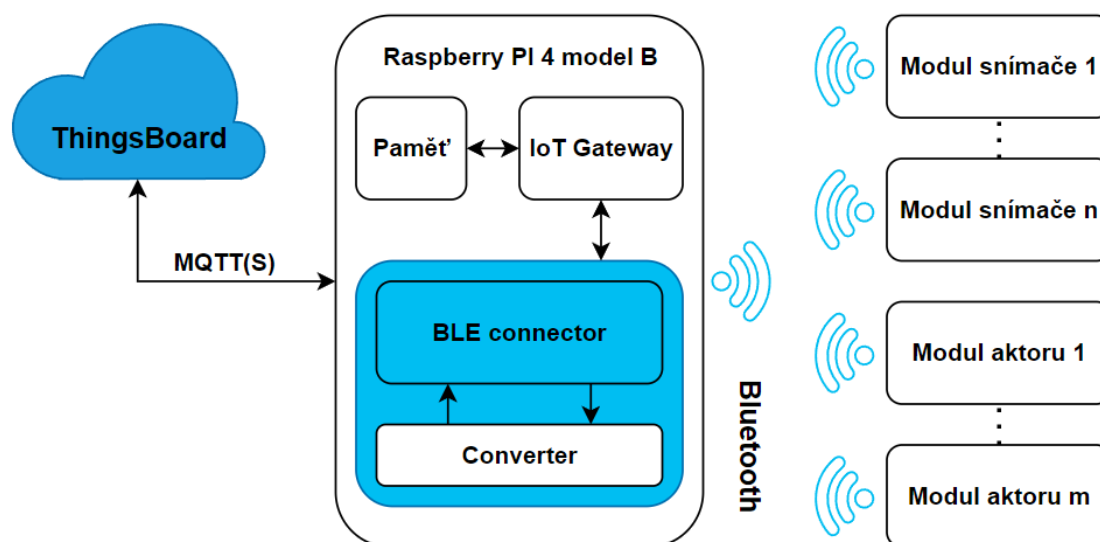
Komunitní verze této služby pro nekomerční účely se dá používat zcela zdarma na lokálním serveru. Neomezuje uživatele počtem zařízení ani počtem přenesených zpráv.

Edice pro komerční účely je poté zpoplatněna měsíčním předplatným nebo jednorázovým poplatkem a záleží na uživateli, zda se rozhodne provozovat cloud na svém vlastním lokálním serveru, nebo si připlatí za hosting na serverech ThingsBoard [56].

### 8.3 ThingsBoard

Jelikož je pro řízení skleníkového hospodářství nejdůležitějším prvkem sběr, analýza a vizualizace dat, byla pro tuto aplikaci vybrána cloudová služba ThingsBoard, která sice neposkytuje pokročilé nástroje, ale zaměřuje se přesně na problematiku sběru a vizualizace dat.

### 8.4 Blokové schéma



Obrázek 8.1: Struktura komunikace modulu a cloudu

Struktura komunikace navržených modulů s cloudem je uvedena na obrázku 8.1. Jako propojovací můstek mezi cloudovým serverem ThingsBoard a navrženými moduly bylo použito Raspberry PI 4 model B. Toto Raspberry zajišťuje bezdrátovou komunikaci s navrženými moduly pomocí Bluetooth Low Energy, dále konverzi přijatých dat na formát, který dokáže cloud zpracovat, a s pomocí IoT Gateway pak zajišťuje komunikaci s ThingsBoard cloudem skrze MQTT(S) komunikační protokol. Výhodou tohoto řešení je také možnost použít samotné Raspberry jako lokální cloud server. V následujících podkapitolách budou detailněji popsány jednotlivé prvky této struktury.

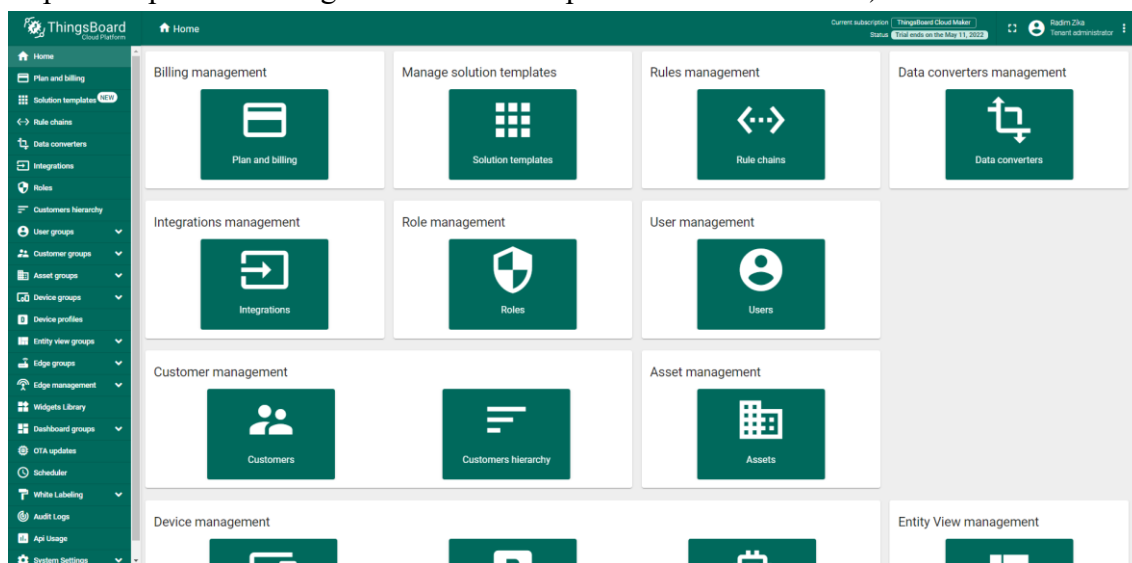
#### 8.4.1 ThingsBoard cloud

ThingsBoard cloud je základním stavebním prvkem v celé hierarchii. V tomto případě je využít hosting na serverech ThingsBoard z důvodu pohodlného sledování a ovládání skleníkového hospodářství téměř odkudkoliv. Pro testovací účely bylo využito možnosti



používat cloud na serverech ThingsBoard po dobu jednoho měsíce zdarma. V případě dalšího využití je hosting zpoplatněn částkou 10 \$ měsíčně. V této částce je zahrnut hosting serveru, ale také sms a e-mailové služby. Toto předplatné je základní a poskytuje až 30 připojených zařízení a 10 miliónů přenesených hodnot (5 miliónů zpráv) za měsíc (cca 230 hodnot za minutu). Pro potřeby sledování a ovládání procesních veličin ve skleníku je tato hodnota přenesených zpráv naprosto dostačující, protože není nutné tyto hodnoty sledovat s vysokou frekvencí.

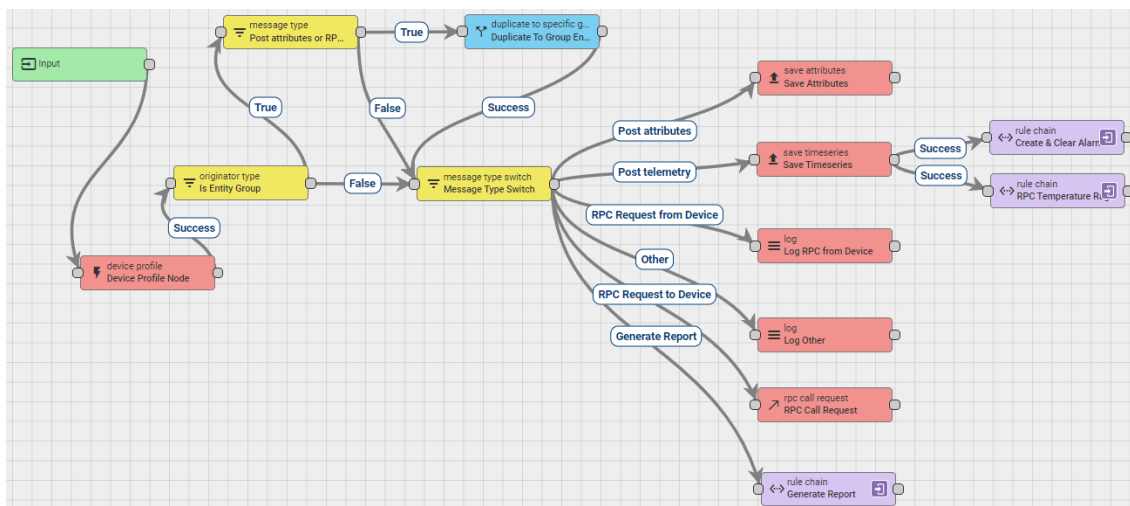
Veškeré nastavení a administrace cloudu se provádí v grafickém prostředí, které je vyobrazeno na obrázku 8.2 (vyjma nastavení gateway, BLE connectoru a converteru, to se provádí pomocí konfiguračních souborů přímo v daném zařízení).



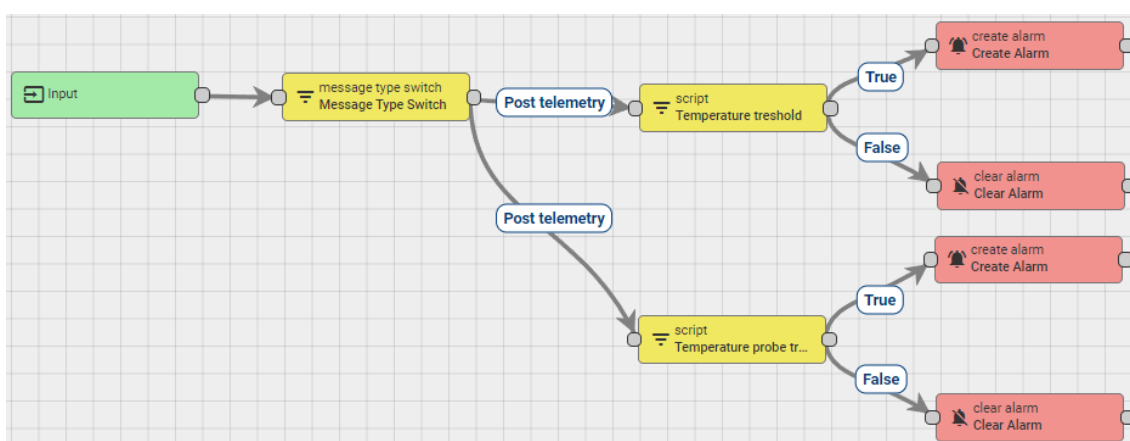
Obrázek 8.2: Úvodní obrazovka prostředí ThingsBoard cloud

Nejdůležitějšími položkami, se kterými se zároveň pracuje, nejčastěji jsou “Rule chains“, “Device groups“ a “Dashboard groups“.

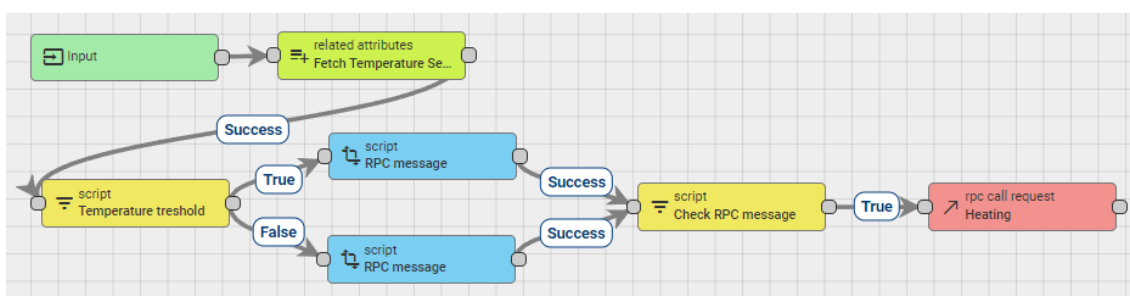
Rule chains slouží pro nastavení již výše zmiňovaných pracovních postupů založených na událostech. V tomto případě je vycházeno ze základního, předem definovaného rule chainu, který se stará o správné zpracování všech příchozích dat a událostí. Do tohoto rule chainu jsou doplněny další dva rule chainy starající se o tvorbu alarmů v případě překročení nastavených limitů měřených veličin (např. teplota větší nebo menší než zadaný limit) a zajišťující spuštění vytápění v případě překročení nastaveného limitu teploty. Použitý rule chain je zobrazen na obrázku 8.3, detail rule chainu pro obsluhu alarmů na obrázku 8.4 a detail rule chainu pro obsluhu vytápění potom na obrázku 8.5.



Obrázek 8.3: Použitý rule chain



Obrázek 8.4: Rule chain pro obsluhu alarmů



Obrázek 8.5: Rulechain pro obsluhu vytápění

Nástroj “Device groups“ slouží pro správu připojených zařízení a ruční vložení zařízení do systému. Jsou zde uvedena všechna zařízení připojena do systému, jejich profily, atributy (vlastní, na straně serveru a sdílené), poslední odeslané hodnoty na server, vygenerované alarmy a také vztah zařízení k ostatním zařízením v systému. Zařízení připojena do systému správy skleníku jsou uvedena v tabulce 8.1. Důležitým zařízením je zde Gateway 1, které zajišťuje propojení cloudu a ostatních zařízení skrze Bluetooth Low Energy. Při vytváření zařízení je každému zařízení přidělen speciální klíč

“Acces token“, který je využíván jako přístupový klíč k danému zařízení ze strany serveru. Pro nastavení Gateway 1 je proto nutné tento klíč zkopírovat a vložit do konfiguračního souboru přímo v zařízení Gateway 1 (v tomto případě Raspberry PI 4 model B). Zařízení připojená skrze Gateway není nutné vkládat ručně. Pokud se zařízení úspěšně spojí s gateway, při prvním odeslání dat na server se nové zařízení samo vloží do tohoto seznamu.

Tabulka 8.1: Zařízení připojená na server ThingsBoard

Název	Profil zařízení
Temperature and humidity sensor 1	Temperature and humidity sensor
Illuminance sensor 1	Illuminance sensor
Watering relay 1	Watering relay
Heating relay 1	Heating relay
Gateway 1	Gateway

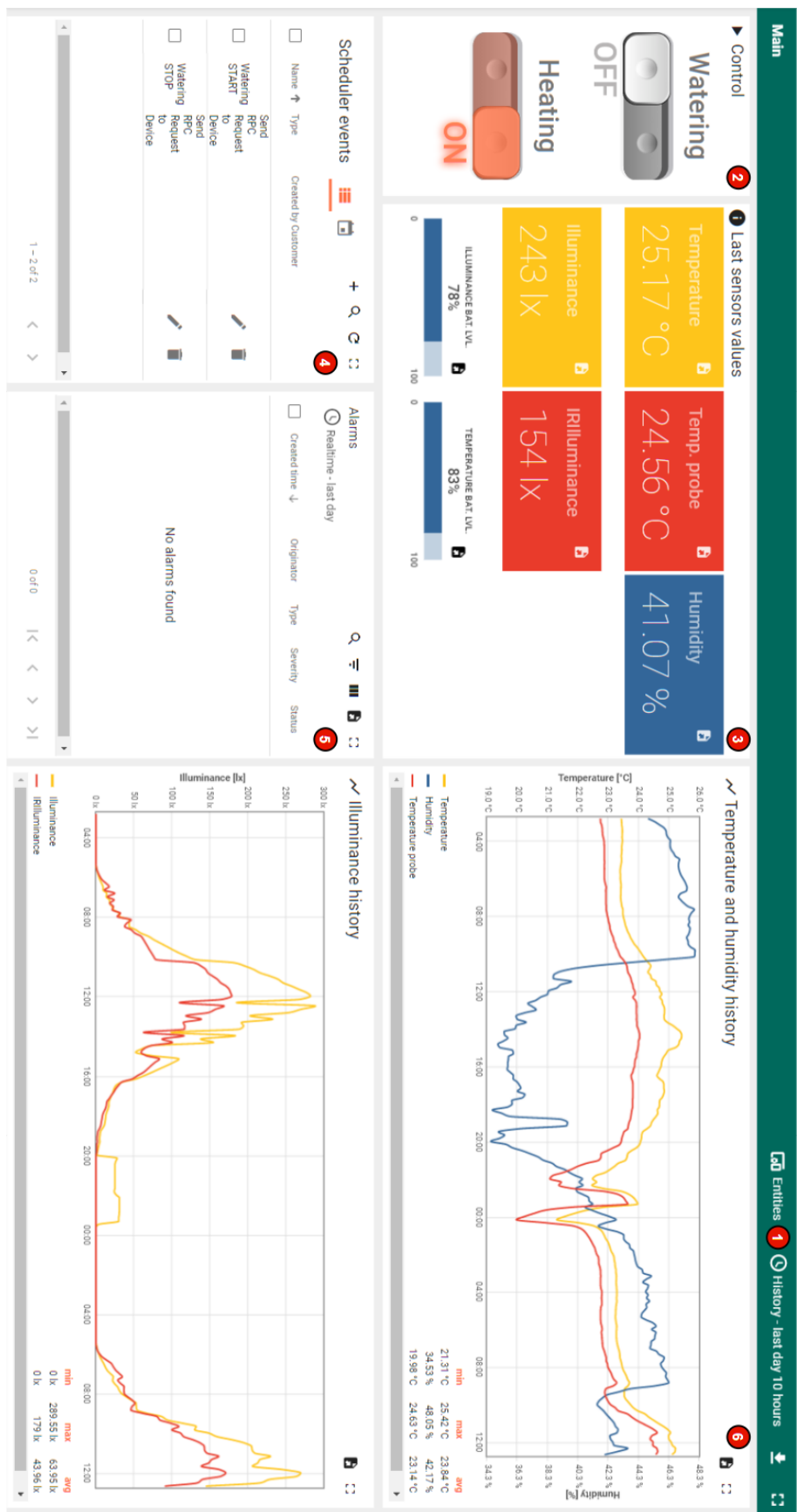
V záložce “Dashboard groups“ najdeme seznam vytvořených řídicích panelů. V této záložce je možnost nové řídicí panely zakládat, ale také je organizovat do skupin. Pro systém správy skleníkového hospodářství byl vytvořen jeden řídicí panel obsahující veškeré důležité informace o stavu skleníku. Vytvořený panel je zobrazen na obrázku 8.6.

Jednotlivé části řídicího panelu jsou:

1. Nastavení časového okna – V horní části panelu se nachází tlačítko s piktogramem hodin. Toto slouží pro nastavení zobrazovaného časového okna pro grafy hodnot. Na výběr je také možnost zobrazit historii naměřených hodnot. Zde se také nastavuje funkce pro agregaci dat zobrazovaných v grafu. V základním nastavení se jedná o průměr hodnot za určitý interval.
2. Manuální řízení – V této části řídicího panelu se nachází přepínače pro ruční řízení skleníkového hospodářství. V tomto případě je v systému pouze modul ovládající vytápění a modul ovládající zavlažování. Pomocí kliknutí na příslušné tlačítko obsluha odešle do příslušného zařízení příkaz pro spuštění nebo zastavení dané funkce.
3. Poslední naměřené hodnoty – V tomto sektoru jsou pohromadě veškeré poslední naměřené hodnoty všech senzorů umístěných ve skleníku. Nachází se zde také hodnoty stavu baterií jednotlivých modulů snímačů. Zde může tedy obsluha sledovat veškeré procesní veličiny najednou.
4. Kalendář pro tvorbu rozvrhů – Kalendář slouží pro vytvoření rozvrhů pro řízení procesních veličin ve skleníku v předem definovaných časech. Kalendář umožňuje nastavit rozvrhy pro jakoukoli činnost (v tomto případě vytápění a zavlažování) s časovým krokem 1 minuta. Pro každou položku v kalendáři se dá také nastavit její opakování s definovaným časovým krokem.

5. Přehled alarmů – V tomto okně jsou zobrazeny veškeré alarmy, které vygeneruje rule chain pro obsluhu alarmů popsány výše. V tabulce se dají alarmy řadit podle času, kdy nastaly, podle důležitosti nebo podle toho, jaké zařízení alarm vyvolalo. Obsluha tak má detailní přehled o tom, které mezní hodnoty byly překročeny, a může jednoduše zasáhnout.
6. Grafy hodnot – Grafické znázornění měřených hodnot v čase se nachází v pravé části obrazovky. Jsou zde dva grafy. Jeden graf znázorňuje teplotu, vlhkost a teplotu sondy z jednoho modulu senzorů, druhý graf potom znázorňuje hodnoty intenzity osvětlení ve viditelném a IR spektru z druhého modulu senzorů. Ve spodní části grafů se nachází legenda a také statistické hodnoty minimum, maximum a průměr dané veličiny v právě zobrazeném časovém okně grafu. Grafy jsou interaktivní a při najetí myši do oblasti hodnot se zobrazí svislá čára s časovou značkou a hodnotami všech zobrazených veličin v tomto čase. Pro detailnější pohled na určitou část křivky se dá v grafech také přibližovat označením žádaného časového intervalu pomocí myši. Dvojklikem do oblasti grafu se obnoví předešlé časové okno. Pomocí kliknutí na název veličiny v legendě se tato veličina v grafu skryje, což může být výhodné pro separaci požadovaného průběhu.

Kalendář, přehled alarmů a grafy se dají zobrazit také v režimu celé obrazovky, což zejména u grafů napomáhá k detailnějšímu zobrazení hodnot. Veškerá data z posledních naměřených hodnot, přehledů alarmů nebo grafů se dají velice snadno exportovat do souborů s příponami .csv, .xls a .xlsx. Celý řídicí panel je velice snadno modifikovatelný a škálovatelný. Po připojení dalších řídicích modulů tedy není problém jejich naměřené hodnoty zobrazit a přidat do grafů. Řídicí panel má dynamickou velikost, proto teoreticky může být nekonečně dlouhý a široký. Do panelu se dají přidávat také náhledy dalších panelů, čehož je využito při zobrazování posledních naměřených hodnot a manuálního řízení.



Obrázek 8.6: Řídicí panel skleníku

### 8.4.2 IoT Gateway

IoT Gateway je v hierarchii ThingsBoard propojovací můstek mezi cloudem a dalšími zařízeními, které nekomunikují s cloudem pomocí síťového protokolu MQTT(S). V tomto případě bylo jako gateway použito Raspberry PI 4 model B s operačním systémem Ubuntu 20.04 LTS.

Po nainstalování ThingsBoard IoT Gateway dle návodu [57] bylo provedeno její nastavení. Nastavení Gateway se provádí v konfiguračním souboru *tb\_gateway.yaml*, který se nachází v adresáři */etc/thingsboard-gateway/config*. Detail konfiguračního souboru je uveden níže.

Výpis 8.1: Konfigurační soubor ThingsBoard Gateway

```
thingsboard:
  host: thingsboard.cloud           # hostname / IP adresa serveru
  port: 1883
  remoteShell: true
  remoteConfiguration: false
  security:
    accessToken: G6E8a3jzikADfYIUfQRp # AccessToken vygenerovaný cloudem pro danou gateway
  storage:                             # Nastavení dočasné paměti pro přicházející data ze senzoru
    type: memory
    read_records_count: 10
    max_records_count: 1000
  connectors:                         # Definice connectoru používaných gateway
    -
      name: BLE Connector
      type: ble
      configuration: ble.json
```

Důležitým nastavením pro správné navázání komunikace mezi cloudem a Gateway je host (hostname nebo ip adresa serveru, kde se nachází ThingsBoard cloud), port (port MQTT servisu serveru, kde se nachází ThingsBoard cloud) a accessToken (přístupový klíč k zařízení vygenerovaný v cloudu). Nastavení v oblasti “storage:“ definuje, kam a jak budou ukládána příchozí data z řídicích modulů, než jsou odeslána na server. V tomto případě se jedná o uložení dat do RAM s maximálním možným počtem 1000 hodnot. V případě výpadku spojení Gateway se serverem funguje tato paměť také jako buffer. V oblasti “connectors:“ jsou definovány connectory a jejich konfigurační soubory, které Gateway bude využívat, v tomto případě BLE Connector. Více o nastavení gateway je uvedeno zde [58].

### 8.4.3 BLE connector

Účelem connectoru je propojení externího systému nebo zařízení s gateway. V tomto případě je využit BLE connector pomocí něhož gateway komunikuje s řídicími moduly skrze Bluetooth Low Energy.

Pro správnou funkci BLE connectoru je nutno na Raspberry doinstalovat několik důležitých komponent, zejména pak linuxový Bluetooth protokol BlueZ [59] a klientský

software Bleak [60]. Dále je nutné provést nastavení BLE connectoru pomocí konfiguračního souboru *ble.json*, který se nachází v adresáři */etc/thingsboard-gateway/config*. Podrobný návod pro instalaci a nastavení BLE connectoru je uveden zde [61]. Dále budou popsány některé důležité části konfiguračního souboru BLE connectoru.

#### Výpis 8.2: Konfigurační soubor BLE connectoru

```
"name": "BLE Connector",
"rescanIntervalSeconds": 30,
"checkIntervalSeconds": 30,
"scanTimeSeconds": 10,
"passiveScanMode": true,
"devices": [
{
  "name": "Temperature and humidity sensor 1",
  "MACAddress": "E8:AD:68:53:09:F1",
  "telemetry": [
    {
      "key": "temperature",
      "method": "notify",
      "characteristicUUID": "f610d4dd-4105-443d-9815-4dfddd8f2ed7",
      "valueExpression": "[:]"
    },
    .
    .
    .
  ],
  {
    "name": "Watering relay 1",
    "MACAddress": "DA:43:02:4F:10:8C",
    "attributes": [
      {
        "key": "relayStatus",
        "characteristicUUID": "10cef9c3-b6d6-4e3c-b8f2-f82e3238b42e",
        "method": "read",
        "valueExpression": "[0:3]"
      }
    ],
    "attributeUpdates": [
      {
        "attributeOnThingsBoard": "relayStatus",
        "characteristicUUID": "10cef9c3-b6d6-4e3c-b8f2-f82e3238b42e"
      }
    ],
    "serverSideRpc": [
      {
        "methodRPC": "relayOnOff",
        "withResponse": false,
        "characteristicUUID": "10cef9c3-b6d6-4e3c-b8f2-f82e3238b42e",
        "methodProcessing": "write"
      }
    ]
  }
]
```

První položkou konfiguračního souboru je název connectoru. Jelikož je možné na Gateway provozovat několik (i stejných) connectorů zároveň, je nutné dodržet unikátní názvy pro každý connector. Dalšími položkami jsou nastavení Bluetooth scanneru.

V druhé části “devices“ jsou uvedena všechna zařízení, se kterými má BLE connector komunikovat. Pro ukázkou jsou uvedena nastavení jednoho modulu snímačů a jednoho modulu aktorů. Důležitou částí je “MACAddress:“, což je MAC adresa daného zařízení, kterou je potřeba předem zjistit. Dále je zde nutné uvést UUID Bluetooth charakteristik, se kterými má connector pracovat. Nastavení “method:“ u daných charakteristik dává connectoru informaci, jak má s daty pracovat (číst, psát, reagovat na změnu). “key:“ je klíč, pod kterým jsou uloženy naměřené hodnoty dané charakteristiky. Pro řídicí moduly aktorů je také nutné definovat RPC metody, které jsou tímto svázány s danou charakteristikou, na které bude dané zařízení reagovat.

#### **8.4.4 Converter**

Converter je podprogram, který connector využívá pro převod dat ze specifického formátu daného komunikačního protokolu na formát, který používá ThingsBoard. Pro každý connector může existovat jedinečný converter (dva BLE connectory mohou využívat různé convertery). Pro případ použitého BLE connectoru byl využit předpřipravený converter s úpravou, kdy jsou příchozí data nejprve převedena na datový typ float. Předpřipravený converter převáděl příchozí data pouze na řetězec, což bylo nevyhovující z důvodu, že Bluetooth Low Energy využívá pro přenos dat pole datového typu uint8. Naměřená hodnota typu float byla tedy přijata v podobě 4 bytů uint8. Upravený converter je součástí přílohy.



## 9 PARAMETRY NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ

V první části této kapitoly je uvedena energetická bilance navržených řídicích modulů. Podkapitola je rozdělena na teoretickou energetickou bilanci a reálnou spotřebu zařízení. V druhé části jsou uvedeny výsledky z měření maximální komunikační vzdálenosti použité technologie Bluetooth Low Energy.

### 9.1 Energetická bilance

Protože budou navržené řídicí moduly napájeny primárně z baterie, je vhodné uvést zde energetickou bilanci zařízení.

#### 9.1.1 Teoretická energetická bilance

Tabulka 9.1: Teoretická energetická bilance navržených zařízení

	Snímač teploty a vlhkosti			Snímač intenzity osvětlení			Řídicí modul aktoru	
	Režim			Režim			Režim	
Zařízení	Spánek	Aktivní	Měření	Spánek	Aktivní	Měření	Aktivní	Změna
Adafruit feather nRF52840	0,41 $\mu$ A	0,10 mA	16,40 mA	0,41 $\mu$ A	0,10 mA	16,40 mA	0,10 mA	16,40 mA
RTC DS3232M	0,20 mA	0,20 mA	0,20 mA	0,20 mA	0,20 mA	0,20 mA	-	-
EEPROM CAT24C04	1,00 $\mu$ A	1,00 $\mu$ A	2,00 mA	1,00 $\mu$ A	1,00 $\mu$ A	2,00 mA	-	-
SHT4x	0,10 $\mu$ A	0,10 $\mu$ A	2,40 $\mu$ A	-	-	-	-	-
DA18B20	0,75 $\mu$ A	0,75 $\mu$ A	1,00 mA	-	-	-	-	-
VEML6031	-	-	-	0,50 $\mu$ A	0,50 $\mu$ A	0,28 $\mu$ A	-	-
MP6513GJ	-	-	-	-	-	-	12,00 $\mu$ A	0,82 mA
$\Sigma$	0,20 mA	0,30 mA	19,6 mA	0,20 mA	0,30 mA	18,88 mA	0,11 mA	17,22 mA

Teoretická energetická bilance řídicího modulu snímačů záleží na množství a typu připojených snímačů k danému modulu. Pro názornou ukázkou jsou zde uvedeny dva moduly, které byly v rámci práce zhotoveny. V tabulce 9.1 se nachází podrobná teoretická energetická bilance řídicích modulů.

Řídicí moduly se mohou nacházet ve třech režimech. První režim je režim spánku. Tento režim bude v řídicích modulech snímačů aktivní po většinu času. Mikroprocesor nRF52840 se nachází v režimu spánku a na desce mikrokontroléru je aktivní pouze regulátor napětí. Ostatní zařízení a snímače připojené k modulu snímačů se také nachází v úsporných režimech. Pro řídicí modul aktoru se režim spánku neuvažuje.

Druhým režimem je aktivní režim. Tento režim v zařízení nastane, pokud je zařízení probuzeno a probíhají v něm inicializační činnosti a navázání komunikace. Mikroprocesor nRF52840 a RTC DS3232M se nachází v aktivním režimu, ostatní

zařízení a snímače připojené k modulu snímačů jsou stále v úsporných režimech. Pro řídicí modul aktorů platí, že po provedení inicializace a navázání komunikace modul setrvává v tomto režimu, dokud nezaznamená pokyn pro změnu stavu relé.

Třetím režimem je režim měření/změna. Tento režim u modulu snímačů nastává bezprostředně po navázání komunikace. V tomto režimu jsou aktivní všechna zařízení a snímače připojená k modulu a ke spotřebě mikrokontroléru je také připočtena spotřeba energie pro bezdrátový přenos dat. Pro případ modulu aktorů je tento režim vyvolán požadavkem na změnu stavu relé.

Z předchozího popisu a tabulky 9.1 je patrné, že celková teoretická spotřeba zařízení je velice závislá na době, po kterou se budou moduly nacházet v daných režimech. Z teoretického hlediska je obtížné tuto dobu stanovit, jelikož ji ovlivňuje mnoho faktorů. Zejména pak doba, po kterou bude zařízení navazovat komunikaci s centrální jednotkou. Spotřeba modulů v režimu měření/změny je oproti dalším dvěma režimům několikanásobná, avšak moduly se v těchto režimech budou nacházet mnohonásobně kratší dobu.

### 9.1.2 Reálná spotřeba zařízení

Jelikož je přesné měření reálné spotřeby navrženého zařízení velice metodicky a časově náročné a není pro tuto aplikaci potřebné skutečnou spotřebu změřit přesně, bylo měření spotřeby elektrické energie zařízení provedeno pouze pomocí multimetru UNI-T UT70A.

Měření bylo provedeno zjednodušenou formou, kdy byly naměřeny proudové odběry z baterie jednotlivých režimů a doby jejich trvání, a poté byla dopočítána celková spotřeba zařízení. Protože režim měření/změna trvá v programu velice krátkou dobu, nebylo možné multimetrem spotřebu tohoto režimu změřit. Do výpočtu spotřeby energie tedy vstupuje pouze spotřeba v režimu spánku a spotřeba v aktivním režimu. Naměřené hodnoty spotřeby v daných režimech jsou uvedeny v tabulce 9.2.

Tabulka 9.2: Naměřené hodnoty reálné spotřeby zařízení v jednotlivých režimech

Snímač teploty a vlhkosti												
	Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{I}$
Spánek	I [mA]	0,338	0,333	0,335	0,332	0,337	0,336	0,335	0,332	0,335	0,338	0,335
Aktivní	I [mA]	2,8	2,7	2,8	2,8	2,7	2,8	2,8	2,7	2,7	2,8	2,8
Snímač intenzity osvětlení												
	Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{I}$
Spánek	I [mA]	0,324	0,328	0,327	0,325	0,322	0,325	0,324	0,328	0,325	0,327	0,326
Aktivní	I [mA]	3,1	3,2	3,2	3,1	3,2	3,2	3,1	3,1	3,2	3,2	3,2

V rámci měření byly stanoveny hodnoty nejistot, které jsou definovány jako [62]:  
Nejistota typu A:

$$u_A(I) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2} \quad (3)$$

kde  $n$  je počet měření. Nejistota typu B:

$$u_B(I) = \frac{\Delta_{MAX}(I)}{\chi} \quad (4)$$

kde  $\chi$  je součinitel pravděpodobnostního rozdělení.  $\Delta_{MAX}(I)$  je potom:

$$\Delta_{MAX}(I) = \frac{\delta_H \cdot \bar{I} + \frac{d}{D} \cdot 100 \cdot I_{roz}}{100} \quad (5)$$

kde  $\delta_H$  je chyba měřicího přístroje z měřené hodnoty,  $d$  je chyba udaná v počtu digitů posledního místa displeje,  $D$  je maximální počet indikovaných jednotek. Kombinovaná standardní nejistota:

$$u_C(I) = \sqrt{u_A^2(I) + u_B^2(I)} \quad (6)$$

a rozšířená standardní nejistota:

$$U = k \cdot u_C(I) \quad (7)$$

kde  $k$  je koeficient rozšíření a určuje pravděpodobnostní interval, ve kterém se měřená hodnota nachází.

Pro měření odběru proudu v režimu spánku byl nastaven rozsah 2 mA s parametry multimetru  $\delta_H=0,8 \%$  a  $d = 1$  a pro měření odběru proudu pro aktivní režim rozsah 200 mA s parametry multimetru  $\delta_H=1,5 \%$  a  $d = 1$ . Pro výpočet hodnoty nejistoty typu B byla použita hodnota  $\chi = \sqrt{3}$  (normální rozdělení). Koeficient rozšíření  $k = 2$  udává, že naměřená hodnota leží v daném intervalu s pravděpodobností 95 %. V tabulce 9.3 jsou uvedeny hodnoty reálné spotřeby zařízení v jednotlivých režimech s nejistotou vypočtenou dle vztahů (3), (4), (5), (6) a (7). Hodnoty v tabulce jsou uvedeny s pravděpodobností 95 %.

Tabulka 9.3: Reálné spotřeby zařízení v jednotlivých režimech

Režim	Smímač teploty a vlhkosti	Snímač intenzity osvětlení
Spánek	$335,0 \pm 7,4 \mu\text{A}$	$326,0 \pm 7,2 \mu\text{A}$
Aktivní	$2,80 \pm 0,29 \text{ mA}$	$3,20 \pm 0,30 \text{ mA}$

Pro výpočet délky výdrže zařízení na baterii je použit následující vztah [27]:

$$t_L = \frac{Q_{BAT}}{\sum \frac{Q_P}{T_P} + I_C} \quad (8)$$

kde  $Q_{BAT}$  je jmenovitá kapacita použité baterie v zařízení,  $Q_P$  je celkový náboj spotřebovaný zařízením v aktivním režimu s periodou  $T_P$  a  $I_C$  značí proud spotřebovaný zařízením v režimu spánku.

Do tohoto výpočtu tedy vstupuje pouze kontinuální spotřeba zařízení v režimu spánku a periodická spotřeba aktivního režimu. Aktivní režim v zařízení nastává každých 15 minut a jeho doba trvání byla stanovena na 15 s (doba trvání aktivního režimu se liší podle délky času, za který je zařízení schopno navázat komunikaci s centrální jednotkou). V modulech byly využity baterie se jmenovitou kapacitou 500 mAh. Dosazením do vzorce (8) dostáváme pro snímač teploty a vlhkosti:

$$t_L = \frac{Q_{BAT}}{\sum \frac{Q_P}{T_P} + I_C} = \frac{500}{\frac{2,8 \cdot 15}{\frac{3600}{0,25}} + 0,335} = 1310h \approx 54 \text{ dní}$$

a pro snímač intenzity osvětlení:

$$t_L = \frac{Q_{BAT}}{\sum \frac{Q_P}{T_P} + I_C} = \frac{500}{\frac{3,2 \cdot 15}{\frac{3600}{0,25}} + 0,326} = 1318h \approx 55 \text{ dní}$$

## 9.2 Dosah Bluetooth 5 Low Energy

V této podkapitole byly naměřeny reálné hodnoty dosahu bezdrátové komunikace Bluetooth 5 Low Energy. Měření bylo provedeno ve dvou prostředích. Na otevřeném prostranství, vždy s přímou viditelností přijímač-vysílač, a v budově, jejíž půdorys je zobrazen na obrázku 9.4.

### 9.2.1 Měření dosahu na otevřeném prostranství

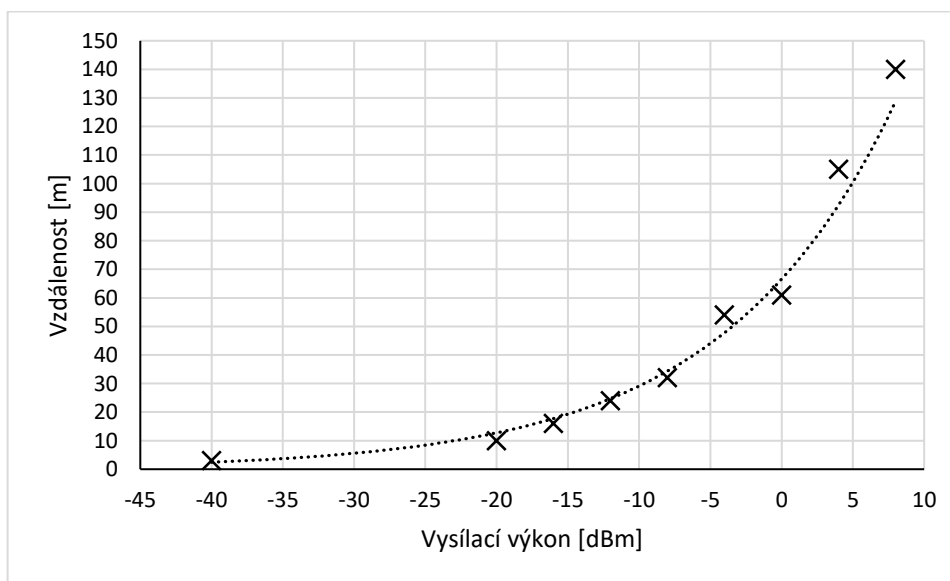
Měření dosahu Bluetooth 5 Low Energy bylo provedeno na otevřeném prostranství. Místem měření byla volná plocha nad Vědecko-technickým parkem Profesora Lista viz. Obrázek 9.2.

Měření bylo provedeno tak, že centrální jednotka byla umístěna na statickém místě a řídicí modul snímače byl přemísťován. Vždy byla zajištěna přímá viditelnost přijímač-vysílač. Naměřená vzdálenost je vzdálenost, kdy byl řídicí modul snímačů ještě schopen připojit se k centrální jednotce a odeslat naměřená data. Vzdálenost byla zjištěna pomocí nástroje “Měření vzdálenosti a plochy“ mapového portálu Mapy.cz. Nejedná se tedy o přesnou, nýbrž orientační hodnotu vzdálenosti. Měření bylo provedeno pro všechny vysílací výkony, které nRF52840 nabízí. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 9.4.

Tabulka 9.4: Naměřené hodnoty dosahu Bluetooth 5 Low Energy na otevřeném prostoru

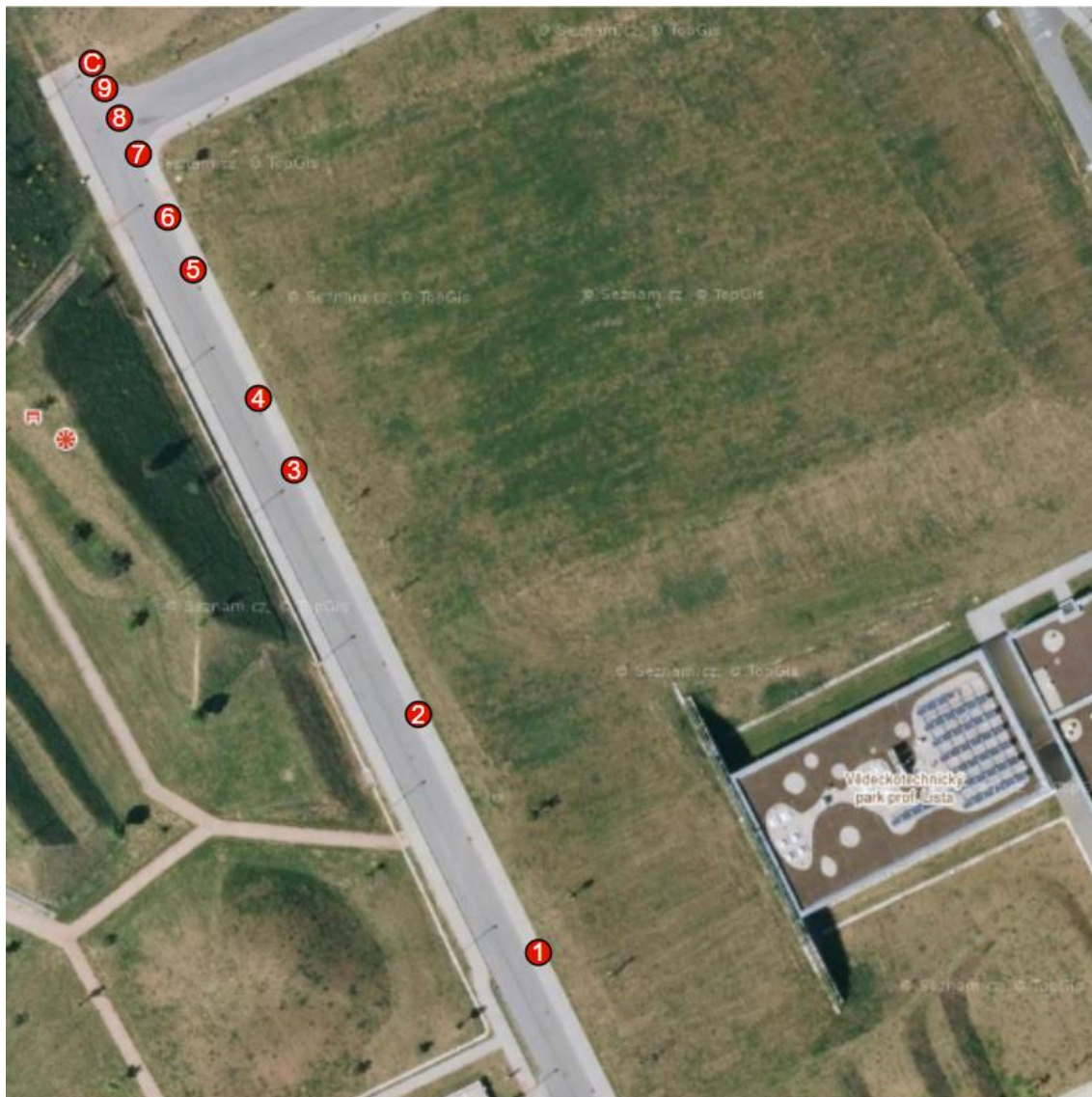
Podmínky měření		Číslo	T <sub>x</sub>	Dist	I
Teplota	19 °C	[-]	[dBm]	[m]	[mA]
Vlhkost	31 %	1	8	140	32,2
Tlak	1020 hPa	2	4	105	20,6
		3	0	61	11,6
		4	-4	54	9,2
		5	-8	32	8,3
		6	-12	24	7,6
		7	-16	16	7,1
		8	-20	10	6,8
		9	-40	3	5,8

Pro jednotlivé vysílací výkony jsou v tabulce 9.4 uvedeny také teoretické spotřeby proudu mikroprocesoru nRF52840 při přenosu dat uváděné výrobcem. Graf závislosti dosažené vzdálenosti na vysílacím výkonu je uveden na obrázku 9.1. Jak můžeme z grafu pozorovat, závislost dosažené vzdálenosti na vysílacím výkonu je exponenciální, což ovšem neplatí pro teoretické spotřeby proudu. Z tohoto lze usoudit, že není výhodné používat vysílací výkony pod 0 dBm, jelikož dosažená vzdálenost klesá pod touto hranicí exponenciálně, zatímco spotřeba proudu je téměř lineární. Skokový nárůst spotřeby proudu pozorujeme nad hranicí 0 dBm. Proces přenosu dat je však otázkou několika set  $\mu$ s, a je tak otázkou, zda v kadenci několika odesílaných zpráv za hodinu vůbec nastavení vysílacího výkonu nějak výrazně ovlivní celkovou dlouhodobou spotřebu zařízení.



Obrázek 9.1: Graf závislosti dosažené vzdálenosti na vysílacím výkonu na volném prostoru

Na obrázku 9.2 je znázorněna orientační mapa měření na volném prostranství. Na mapě jsou vyznačeny body, které odpovídají naměřeným vzdálenostem. Bod s písmenem C je potom bod umístění centrální jednotky při měření.



Obrázek 9.2: Orientační plán měření na volném prostranství

### 9.2.2 Měření dosahu v budově

Dosah bezdrátové technologie Bluetooth Low Energy také velmi závisí na překážkách, které jsou postaveny v cestě mezi přijímačem a vysílačem. Proto bylo provedeno také orientační měření dosahu v budově. Na obrázku 9.4 je uveden orientační půdorys budovy, ve které bylo měření provedeno.

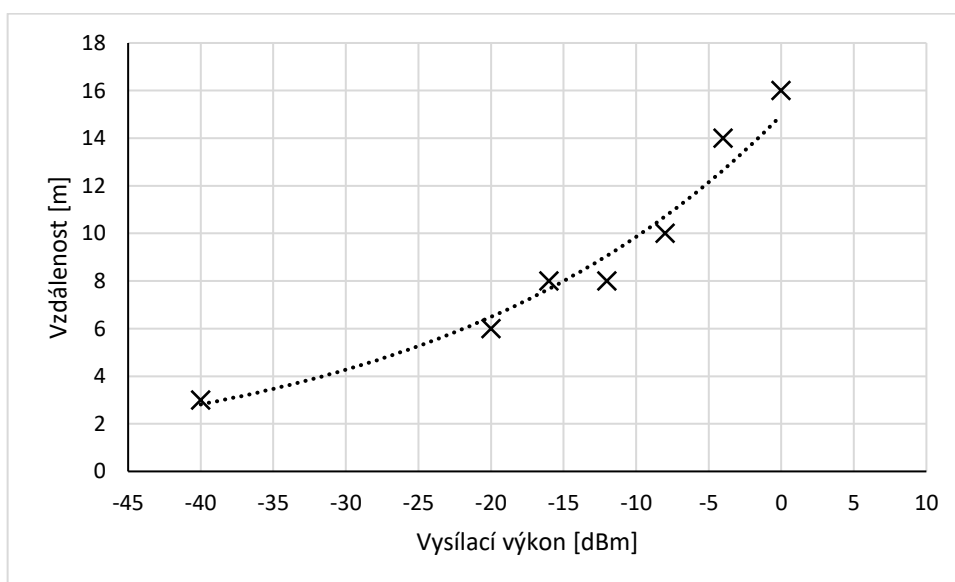
Měření bylo opět provedeno tak, že centrální jednotka byla umístěna na statickém místě a řídicí modul snímače byl přemísťován. Naměřená vzdálenost je vzdálenost, kdy byl řídicí modul snímačů ještě schopen připojit se k centrální jednotce a odeslat naměřená

data. Vzdálenost byla stanovena ze známých rozměrů půdorysu. Měření bylo provedeno pro všechny vysílací výkony, které nRF52840 nabízí. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 9.5.

Tabulka 9.5: Naměřené hodnoty dosahu Bluetooth 5 Low Energy v interiéru

Podmínky měření		Číslo	T <sub>x</sub>	Dist	I
Teplota	23 °C	[-]	[dBm]	[m]	[mA]
Vlhkost	45 %	1	8	>16	32,2
Tlak	1020 hPa	2	4	>16	20,6
		3	0	16	11,6
		4	-4	14	9,2
		5	-8	10	8,3
		6	-12	8	7,6
		7	-16	8	7,1
		8	-20	6	6,8
		9	-40	3	5,8

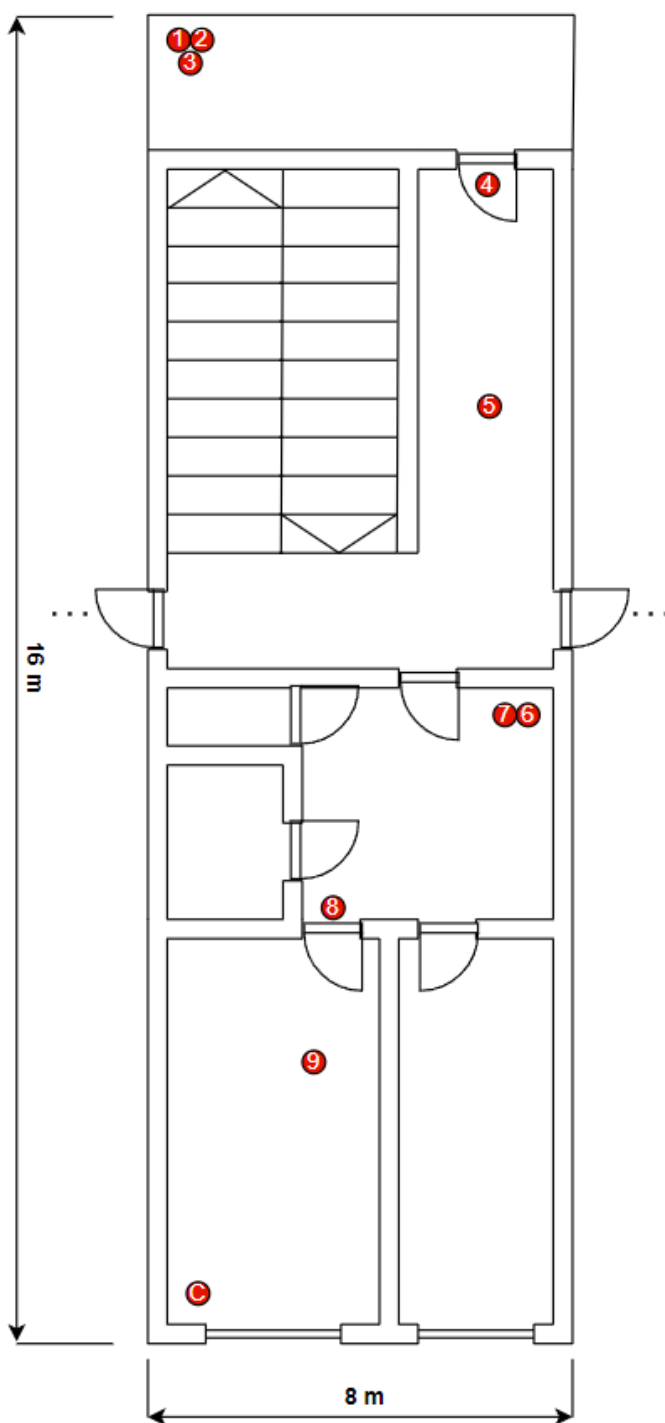
Graf závislosti dosažené vzdálenosti na vysílacím výkonu je uveden na obrázku 9.3. Hodnoty číslo 1 a 2 nebyly do grafu zaneseny, jelikož nebylo možné změřit vzdálenost větší jak 16 m (měření bylo prováděno ve 3 patře bytového domu), které dané vysílací výkony dosahovaly. Jak můžeme z grafu pozorovat, závislost dosažené vzdálenosti na vysílacím výkonu je znovu téměř exponenciální. Citelně se zde projevuje vliv jednotlivých překážek (zdí, dveří, nábytku). Zvýšení vysílacího výkonu tedy může mít za následek překonání dané překážky a zvětšení dosahu v interiéru.



Obrázek 9.3: Graf závislosti dosažené vzdálenosti na vysílacím výkonu v interiéru



Na obrázku 9.4 je znázorněn orientační půdorys měření v interiéru. Intériové zdi jsou vystavěny z YTONGu a jejich šířka je 15 cm. V půdorysu jsou vyznačeny body, které odpovídají naměřeným vzdálenostem. Bod s písmenem C je potom bod umístění centrální jednotky při měření. V půdorysu je vidět shluk bodů 6 a 7, kdy vysílací výkon -12 dBm nedokázal vysílat přes druhou zeď v pořadí od vysílače, ale vysílací výkon -16 dBm dostačoval pro přenos dat ze stejného místa.



Obrázek 9.4: Orientační půdorys měření v interiéru



## 10 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout komplexní systém pro snímání procesních veličin ve skleníku a ovládání celého skleníkového hospodářství za využití technologií IoT. Při porovnání navrženého systému s komerčními systémy uvedenými v kapitole 1.3 Průzkum trhu se dá říci, že navržený systém je konkurenceschopný, především v oblasti bezdrátové komunikace.

Řídicí modul snímačů byl navržen tak, aby bylo možné do systému připojit téměř jakýkoli snímač. Na desce modulu snímačů se nachází konektor pro připojení snímačů pomocí sběrnice I<sup>2</sup>C, konektor s vyvedenou sběrnicí OneWire, ale také konektor se dvěma analogovými kanály pro připojení analogových snímačů. Analogové vstupy se dají využít také jako vstupy digitální pro připojení například plovákového snímače výšky hladiny. Takto nakombinované rozhraní umožňuje připojení širokého spektra snímačů do systému. Řídicí modul snímačů je napájen z LiPol baterie, nebo může být trvale napájen z 5V adaptéru. Baterie s kapacitou 500 mAh, která je momentálně využita pro napájení modulu snímačů, je schopna zařízení napájet po dobu až 55 dní. V případě použití větší ochranné krabičky by mohla být využita také baterie s větší kapacitou (např. 2000 mAh, která by byla schopna napájet zařízení po dobu až 220 dní). Informace o stavu nabití baterie každého modulu je systémem signalizována. Ochranná krabička modulu snímačů byla navržena tak, aby v co největší míře odolávala nepříznivému prostředí ve skleníku, zejména pak vlhkosti. V případě potřeby probuzení zařízení z režimu spánku mimo periodický interval je možné toto provést přiblížením magnetu ke krabičce. Magnetický spínací kontakt umístěný v krabičce se sepne a uvede zařízení do aktivního režimu (vhodné zejména při instalaci či testování funkčnosti).

Řídicí modul aktorů obsahuje jedno přepínací relé s kontakty dimenzovanými na 16 A / 250 V AC a 16 A / 24 V DC, a je tak vhodný k přímému ovládání jedné procesní veličiny ve skleníku. Modul aktorů je možné napájet širokým rozsahem napětí (viz kapitola 5.5 Napájecí zdroje modulu aktorů), čehož bylo dosaženo pomocí dvou zdrojů zapojených do kaskády. Při instalaci tedy není nutné zajišťovat vlastní zdroj napájení pro řídicí modul aktorů, jelikož je možné pohodlně využít napájecího zdroje ovládané technologie (v rámci rozsahů stanovených v kapitole 5.5 Napájecí zdroje modulu aktorů). Řídicí modul aktorů je možné napájet také z baterie, není to však primárně uvažovaný napájecí zdroj modulu. Ochranná krabička modulu aktorů je stejně jako krabička modulu snímačů navržena tak, aby co nejlépe odolávala nepříznivému klimatu ve skleníku, zejména vlhkosti.

Cloudová služba ThingsBoard, která byla využita v rámci řešení této práce, nabízí uživateli plnou kontrolu nad skleníkovým hospodářstvím. Tato platforma je velice jednoduše škálovatelná a modifikovatelná. Uživatel je schopen prostředí velice snadno přizpůsobit svým potřebám. Detailní pohled na řídicí panel cloudu je zobrazen v kapitole 8.4.1 ThingsBoard cloud. Uživatel má možnost z řídicího panelu ovládat jednotlivé

procesní veličiny pomocí modulu aktorů a také vidí veškeré naměřené hodnoty snímačů, ať už v grafech nebo jako poslední naměřené hodnoty. Prostředí řídicího panelu je interaktivní a umožňuje uživateli pohodlnou práci s daty. Je rovněž možné jednoduše přidat další řídicí panely pro ovládání a monitorování dalších skleníků, ať už za využití stejné centrální jednotky nebo centrální jednotky nové (kvůli dodržení maximálního dosahu Bluetooth Low Energy). Je možné také vytvořit centrální řídicí panel pro více skleníků, kde budou zobrazeny nejdůležitější informace ze všech řízených a monitorovaných skleníků.

Pro ověření maximálního dosahu bezdrátové komunikace Bluetooth Low Energy bylo v kapitole 9.2 Dosah Bluetooth 5 Low Energy provedeno měření dosahu ve dvou případech. Měření dosahu na volném prostranství vypovídá o maximální možné komunikační vzdálenosti, kterou lze s řídicími moduly dosáhnout. Měření dosahu v interiéru zase vypovídá o vlivu překážek na dosah komunikace. Skleníky jsou většinou rozlehlé haly, kde jsou překážkami pro bezdrátovou komunikaci maximálně samotné rostliny. Při vhodném umístění centrální jednotky (doprostřed a ke stropu skleníku) je reálné dosáhnout komunikačních vzdáleností desítek až sta metrů, a pokrýt tak skleníky i velké rozlohy.

## 10.1 Problematické oblasti řešení

### 10.1.1 Znovu připojení zařízení k centrální jednotce

Centrální jednotka (ThingsBoard Gateway) po svém spuštění začne aktivně vyhledávat zařízení uvedená v nastavení BLE connectoru a snaží se s nimi navázat spojení. Po prvním úspěšném připojení zařízení Gateway považuje zařízení za připojené. Jakmile dojde k odpojení zařízení (režim spánku), Gateway tuto informaci vůbec neregistruje, a i když je v nastavení BLE connectoru (*ble.json*) uvedeno, že by měla Gateway každých 30 s provést scan dostupných zařízení a navázat s nimi spojení, již se tak nestane. Jedná se nejspíše o chybu ve zdrojovém kódu ThingsBoard Gateway.

Z tohoto důvodu jsou zařízení uváděna pouze do režimu “hibernace“, kdy zůstává zachováno Bluetooth spojení s centrální jednotkou, ale zařízení nevykonává žádnou činnost a veškeré komponenty jsou uvedeny do režimu nízké spotřeby. Tento režim zařízení je však energeticky náročnější než režim spánku. Řídicí programy modulu snímačů jsou napsány tak, že jednoduchým odstraněním příkazu `#define HIBERN` lze provést změnu chování a zařízení je po odeslání dat centrální jednotce uvedeno do režimu spánku. V případě opravy této chyby Gateway je tak možné zařízení provozovat s režimem spánku namísto režimu hibernace.

### 10.1.2 Využití EEPROM

Zamýšlené využití EEPROM jako paměti, kde budou uložena data k identifikaci modulu, bohužel nebylo možné realizovat. ThingsBoard Gateway se připojuje k danému zařízení pomocí jeho MAC adresy, která je jedinečná pro každý mikrokontrolér. Pokud by tedy došlo k výměně mikrokontroléru v některém z řídicích modulů za jiný, Gateway nebude schopna se k tomuto modulu připojit. Scénář, kdy si mikrokontrolér podle dat z EEPROM nastaví svůj řídicí program, tedy nebylo možné realizovat.

Dalším využitím EEPROM mohlo být dočasné uložení naměřených dat v případě výpadku spojení s centrální jednotkou. Do EEPROM by byla uložena naměřená data včetně časové značky a po úspěšném navázání komunikace s centrální jednotkou by dříve naměřená data byla z paměti vyzvednuta a poslána centrální řídicí jednotce. Zde nastal problém právě s časovou značkou, kdy ThingsBoard Gateway přiděluje časovou značku dat při jejich obdržení (ve speciálních případech může časovou značku přiřazovat až cloud po přijetí a zpracování dat cloudem). Data naměřená v průběhu výpadku komunikace proto dostanou stejnou časovou značku, jakou dostala data právě naměřená. Označování dříve naměřených dat speciální značkou a jejich následné zpracování v cloudu (výpočet časové značky) by bylo značně komplikované a neefektivní. Z tohoto důvodu nebyla paměť EEPROM využita ani pro tento scénář a zůstává tak nevyužitou součástí na deskách plošných spojů.

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a vytvořit komplexní systém řízení systému skleníků za využití technologií IoT.

V první kapitole jsou stručně popsány skleníkové systémy, jejich rozdělení a konfigurace. Součástí první kapitoly je také průzkum trhu, kde byly vybrány a popsány tři komerční skleníkové systémy.

Druhá kapitola se zabývá procesními veličinami ve skleníku. Jednotlivé veličiny jsou detailněji popsány a v jednotlivých kapitolách je vysvětleno, proč je nutné danou veličinu sledovat a kde by měla být měřena. V rámci kapitoly byl rovněž proveden průzkum trhu snímačů jednotlivých procesních veličin. Do průzkumu byly vybírány snímače, které by bylo možné použít v navrhovaném systému.

Další část práce pak pojednává o návrhu energeticky úsporných zařízení. Jsou v ní shrnuty metody návrhu jak hardwarové, tak softwarové části zařízení.

Koncept navrženého systému je uveden v kapitole 4. Na začátku kapitoly jsou uvedeny požadavky na systém vycházející ze zadání. Dále je uvedeno blokové schéma navrženého systému vyjadřující způsob fungování a předávání informací v systému. V kapitole se také nachází stručná charakteristika komunikační technologie Bluetooth 5 Low Energy, která bude v systému využita.

Pátá kapitola shrnuje hardwarové vybavení řídicího modulu. V úvodu kapitoly je uvedeno blokové schéma vyjadřující princip fungování navrhovaného řídicího modulu. Dále jsou v kapitole rozebrány jednotlivé prvky řídicího modulu a jejich funkce.

Další kapitola popisuje praktickou realizaci zařízení a návrh desky plošných spojů v programu KiCad. Jsou zde uvedeny schématické značky a pouzdra součástek, které bylo nutné vytvořit. Dále je v kapitole popsán návrh pull-up rezistorů pro sběrnici I<sup>2</sup>C a použití ochranných diod cívky relé. Součástí podkapitoly návrhu desek plošných spojů je také výňatek z normy IPC-2221B pro návrh desek plošných spojů pojednávající o minimální vzdálenosti mezi dvěma vodiči na desce plošného spoje. V poslední podkapitole jsou detailněji popsány ochranné krabičky modulů snímačů a aktorů.

Sedmá kapitola se zabývá programovým vybavením navržených modulů. V první části je popsáno použité vývojové prostředí PlatformIO a použité knihovny. Dále jsou uvedena bloková schémata řídicích programů pro moduly snímačů a aktorů.

Osmá kapitola je věnována použité cloudové službě ThingsBoard. Na začátku kapitoly jsou uvedeny požadavky na cloudovou službu a je zde rovněž uveden průzkum trhu cloudových služeb. Druhá část kapitoly detailněji popisuje fungování cloudové služby ThingsBoard a nastavení jednotlivých prvků této služby.

V rámci deváté kapitoly bylo provedeno měření reálné spotřeby navrženého zařízení a dosahu bezdrátové komunikace Bluetooth Low Energy na volném prostranství a v interiéru. S použitou baterií se jmenovitou kapacitou 500 mAh je zařízení schopno na baterii fungovat po dobu asi 54 dnů. Při měření dosahu bezdrátové komunikace na volném

prostranství bylo dosaženo maximální hodnoty 140 m, což je pro použití v malých či středně velkých sklenících dostačující. Měření dosahu v interiéru vypovídá o vlivu překážek (stěn) na dosah Bluetooth Low Energy.

Výsledkem této diplomové práce je systém pro snímání procesních veličin a ovládání skleníkového hospodářství za využití technologií IoT. Systém umožňuje bateriové napájení modulů s možností napájet moduly také stálým 5V zdrojem. Celý systém je navržen tak, aby byl snadno škálovatelný a uživatelsky přívětivý. Při porovnání navrženého systému s komerčně využívanými systémy je vytvořený systém konkurenceschopný. Vytvořený systém je připraven k instalaci a uvedení do ostrého provozu.

## LITERATURA

- [1] LYER, S. *Gain maximum yields with commercial greenhouse automation control system*. Softweb Solutions [online]. 2021 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.softwebsolutions.com/resources/commercial-greenhouse-automation-control-system.html>
- [2] AUTOGROW. *Autogrow products*. Autogrow [online]. 2021 [cit. 2021-11-17] Dostupné z: <https://autogrow.com/our-products-solutions/all-products>
- [3] AUTOGROW. *IntelliClimate*. Autogrow [online]. 2021 [cit. 2021-11-17] Dostupné z: <https://autogrow.com/products/intelliclimate>
- [4] AUTOGROW. *IntelliDose*. Autogrow [online]. 2021 [cit. 2021-11-17] Dostupné z: <https://autogrow.com/products/intellidose-system>
- [5] AUTOGROW. *MultiGrow*. Autogrow [online]. 2021 [cit. 2021-11-17] Dostupné z: <https://autogrow.com/products/multigrow>
- [6] CLIMATE CONTROL SYSTEMS. *Climate Control Systems* [online]. 2021 [cit. 2021-11-17] Dostupné z: <https://www.climatecontrol.com/>
- [7] CLIMATE CONTROL SYSTEMS. *Climate Manager*. Climate Control Systems [online]. 2021 [cit. 2021-11-17] Dostupné z: <https://www.climatecontrol.com/climate-manager/>
- [8] GROWTRONIX. *Growtronix* [online]. [cit. 2021-11-17] Dostupné z: <https://www.growtronix.com/cart/>
- [9] GROWTRONIX. *How Growtronix Works*. Growtronix [online]. [cit. 2021-11-17] Dostupné z: <https://www.growtronix.com/cart/blog/how-growtronix-works-n5>
- [10] RUNKLE, E. *Measuring greenhouse temperature*. Michigan State university [online]. [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <https://www.canr.msu.edu/resources/measuring-greenhouse-temperature>
- [11] BARTOK, J. *Reducing Humidity in the Greenhouse*. University of Massachusetts Amherst [online]. 2021 [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <https://ag.umass.edu/greenhouse-floriculture/fact-sheets/reducing-humidity-in-greenhouse>
- [12] GROWSPAN. *Understanding greenhouse lighting*. Growspan [online]. [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <https://www.growspan.com/news/understanding-greenhouse-lighting/>
- [13] COX, D. *How to Use pH and EC "Pens" to Monitor Greenhouse Crop Nutrition*. University of Massachusetts Amherst [online]. 2021 [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <https://ag.umass.edu/greenhouse-floriculture/fact-sheets/how-to-use-ph-ec-pens-to-monitor-greenhouse-crop-nutrition>
- [14] BLOM, T.J., STRAVER, W.A. a další. *Carbondioxide in greenhouses*. Ministry of Agriculture, Food and Rural affairs, Ontario [online]. [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <http://www.omafr.gov.on.ca/english/crops/facts/00-077.htm>

- [15] AOSONG. *DHT 11 Humidity & Temperature Sensor Datasheet*. Mouser Electronics [online]. 2021 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>
- [16] SENSIRION. *Digital Humidity Sensor SHT4x Datasheet*. Sensirion AG Switzerland [online]. 2021 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/humidity-sensors/humidity-sensor-sht4x/>
- [17] TEXAS INSTRUMENTS. *TMP117 Datasheet*. Texas Instruments Incorporated [online]. 2021 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmp117.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&DCM=yes&ref\\_url=https%3A%2F%2Fcz.mouser.com%2F&distId=26](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmp117.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&DCM=yes&ref_url=https%3A%2F%2Fcz.mouser.com%2F&distId=26)
- [18] MAXIM INTEGRATED. *DS18B20 Datasheet*. Maxim Integrated [online]. 2021 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [19] HONEYWELL. *Honeywell HumidIcon™ Digital Humidity/Temperature Sensors HIH7000 Series*. Honeywell International [online]. 2021 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-humidicon-hih7000-series-product-sheet-009074-6-en.pdf>
- [20] VISHAY. *VEML6031X00 Datasheet*. Vishay Intertechnology [online]. 2021 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/80007/veml6031x00.pdf>
- [21] AMS. *TSL2572 Datasheet*. ams AG [online]. 2021 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: [https://ams.com/documents/20143/36005/TSL2572\\_DS000178\\_4-00.pdf/fb4f7438-f772-abd6-4405-79c5e3ca1315](https://ams.com/documents/20143/36005/TSL2572_DS000178_4-00.pdf/fb4f7438-f772-abd6-4405-79c5e3ca1315)
- [22] AVAGO. *APDS-9306/APDS-9306-065 Datasheet*. Mouser Electronics [online]. 2021 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: [https://cz.mouser.com/datasheet/2/678/AVGO\\_S\\_A0002854364\\_1-2574547.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/678/AVGO_S_A0002854364_1-2574547.pdf)
- [23] DRFROBOT. *Gravity: Analog pH Sensor / Meter Pro Kit V2*. DRFRobot [online]. [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://www.dfrobot.com/product-2069.html>
- [24] LASKAKIT. *MH-Z14 Intelligent Infrared Gas Module Datasheet*. Laskakit.cz [online]. 2021 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: [https://www.laskakit.cz/user/related\\_files/mh-z14\\_co2.pdf](https://www.laskakit.cz/user/related_files/mh-z14_co2.pdf)
- [25] TELAIRE. *T6713 Datasheet*. Mouser Electronics [online]. 2021 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/18/AAS-920-634F-Telaire-T6713-Series-100417-web-1315857.pdf>
- [26] SENSIRION. *Sensirion SCD30 Sensor Module Datasheet*. Sensirion AG Switzerland [online]. 2021 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: [https://www.sensirion.com/fileadmin/user\\_upload/customers/sensirion/Dokument/e/9.5\\_CO2/Sensirion\\_CO2\\_Sensors\\_SCD30\\_Datasheet.pdf](https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokument/e/9.5_CO2/Sensirion_CO2_Sensors_SCD30_Datasheet.pdf)

- [27] LEVEK, V. a ŠTEFFAN, P. *Zásady návrhu bateriově napájených zařízení*. Elektorevue [online]. 2013 [cit. 2021-12-05] Dostupné z: <http://www.elektorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/zasady-navrhu-bateriove-napajenych-zarizeni/>
- [28] SAMEK, M. *Modern Embedded Systems Programming* [online]. [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.state-machine.com/doc/Samek0710.pdf>
- [29] *Bluetooth*. Wikipedia [online]. 2021 [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Bluetooth#Bluetooth\\_5.0](https://cs.wikipedia.org/wiki/Bluetooth#Bluetooth_5.0)
- [30] UVIT. *Protokol Bluetooth 5.0 – co umí a jak využít jeho přednosti*. ÚVT Internet [online]. 2020 [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://uvtnet.cz/protokol-bluetooth-50-co-umi-jak-vyuzit-jeho-prednosti>
- [31] SOLOVEV, A. a PETROVA, A. *Bluetooth Mesh: Technology Overview, Examples, Alternatives, and First-Hand Experience*. Integra Sources [online]. 2021 [cit. 2021-12-8]. Dostupné z: <https://www.integrasources.com/blog/bluetooth-mesh-network-tutorial/>
- [32] BLUETOOTH. *Assigned Numbers*. Bluetooth, Inc. [online]. 2022 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/specifications/assigned-numbers/>
- [33] ADAFRUIT. *GATT*. Adafruit [online]. 2022 [cit. 2022-03-24] <https://learn.adafruit.com/introduction-to-bluetooth-low-energy/gatt>
- [34] HALBERT, D., TOWNSEND, K., REMBOR, K. a další. *Introducing the Adafruit nRF52840 Feather*. Adafruit [online]. [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/introducing-the-adafruit-nrf52840-feather?view=all>
- [35] NORDIC SEMICONDUCTOR. *nRF52840 infocenter*. Nordic Semiconductor [online]. [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: [https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fstruct\\_nrf52%2Fstruct%2Fnrf52840.html](https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fstruct_nrf52%2Fstruct%2Fnrf52840.html)
- [36] DIODES. *AP2112 Datasheet*. Diodes Incorporated [online]. 2021 [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/AP2112.pdf>
- [37] HALBERT, D., TOWNSEND, K., REMBOR, K. a ostatní. *Introducing the Adafruit nRF52840 Feather schematic*. Adafruit [online]. [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: [https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/068/545/original/circuitpython\\_nRF52840\\_Schematic\\_REV-D.png?1546364754](https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/068/545/original/circuitpython_nRF52840_Schematic_REV-D.png?1546364754)
- [38] MICROCHIP. *MCP73831/2 Datasheet*. Microchip Technology [online]. 2021 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP73831-Family-Data-Sheet-DS20001984H.pdf>
- [39] JONATHANRJPEREIRA. *All you need to know about a relays*. Instructables circuits Autodesk [online]. 2021 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/All-You-Need-to-Know-About-Relays/>
- [40] OMRON. *G5RL-U/-K*. OMRON Corporation [online]. 2021 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: [https://components.omron.com/us-en/datasheet\\_pdf/K265-E1.pdf](https://components.omron.com/us-en/datasheet_pdf/K265-E1.pdf)



- [41] MPS. *MP6513 Datasheet*. Monolithic Power Systems [online]. 2021 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.monolithicpower.com/en/mp6513.html>
- [42] DAHL, Ø. *What is an H-Bridge*. Build Electronic Circuits Ohmify AS [online]. 2021 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.build-electronic-circuits.com/h-bridge/>
- [43] AIMTEC. *AMSRI-78-NZ Datasheet*. Aimtec [online]. [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <http://www.aimtec.com/site/Aimtec/files/Datasheet/HighResolution/amsri-78-nz.pdf?ft4=23-614>
- [44] AIMTEC. *AMEOF3-JZ Datasheet*. Aimtec [online]. [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <http://www.aimtec.com/site/Aimtec/files/Datasheet/HighResolution/ameof3-jz.pdf>
- [45] MAXIM INTEGRATED. *DS3232M Datasheet*. Maxim Integrated [online]. 2021 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3232M.pdf>
- [46] ONSEMI. *CAT24C04: EEPROM Serial 4-Kb I<sup>2</sup>C*. Semiconductor Components Industries [online]. 2021 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/cat24c01-d.pdf>
- [47] NXP. *I<sup>2</sup>C-bus specification and user manual*. NXP Semiconductors [online]. 2021 [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- [48] PETERSON, Z. *Using an IPC-2221 calculator for high voltage design*. Altium Limited [online]. 2021. [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://resources.altium.com/p/using-an-ipc-2221-calculator-for-high-voltage-design>
- [49] *Stupeň krytí*. Wikipedia [online]. 2022 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Stupe%C5%88\\_kryt%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Stupe%C5%88_kryt%C3%AD)
- [50] B+B SENSOR. *Polyethylen sinter filter 12 x 25 mm for humidity probes*. B+B Thermo-Technik GmbH [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: [https://shop.bb-sensors.com/out/media/Datasheet\\_Sintered%20filter\\_0133%200011.pdf](https://shop.bb-sensors.com/out/media/Datasheet_Sintered%20filter_0133%200011.pdf)
- [51] PLATFORMIO. *What is PlatformIO?*. PlatformIO [online]. 2022 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://docs.platformio.org/en/latest/what-is-platformio.html>
- [52] AMAZON. *AWS IoT*. Amazon Web Services [online]. 2022 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://aws.amazon.com/iot/>
- [53] AZURE IOT. *Azure IoT Hub*. Microsoft [online]. 2022 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://azure.microsoft.com/cs-cz/services/iot-hub/#overview>
- [54] GOOGLE CLOUD. *Google Cloud IoT solutions*. Google [online]. 2022 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://cloud.google.com/solutions/iot>
- [55] THINGSPEAK. *ThingSpeak for IoT Projects*. The MathWorks [online]. 2022 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://thingspeak.com/>
- [56] THINGSBOARD. *ThingsBoard Open-Source IoT Platform*. The ThingsBoard [online]. 2022 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://thingsboard.io/>

- [57] THINGSBOARD. *Install ThingsBoard IoT gateway*. The ThingsBoard [online]. 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://thingsboard.io/docs/iot-gateway/install/deb-installation/>
- [58] THINGSBOARD. *IoT Gateway configuration*. The ThingsBoard [online]. 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://thingsboard.io/docs/iot-gateway/configuration/>
- [59] BLUEZ. *Official Linux Bluetooth protocol stack*. BlueZ Project [online]. 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <http://www.bluez.org/>
- [60] LECHNER, D., BLIDH, H., DAVIS, K. a další. *BLEAK GATT client software*. GitHub [online]. 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://github.com/hbldh/bleak>
- [61] THINGSBOARD. *BLE connector configuration*. The ThingsBoard [online]. 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://thingsboard.io/docs/iot-gateway/config/ble/>
- [62] PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F. a HALAJ, M. *Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot*. Automa [online]. [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: [http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/10960.pdf](http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10960.pdf)

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

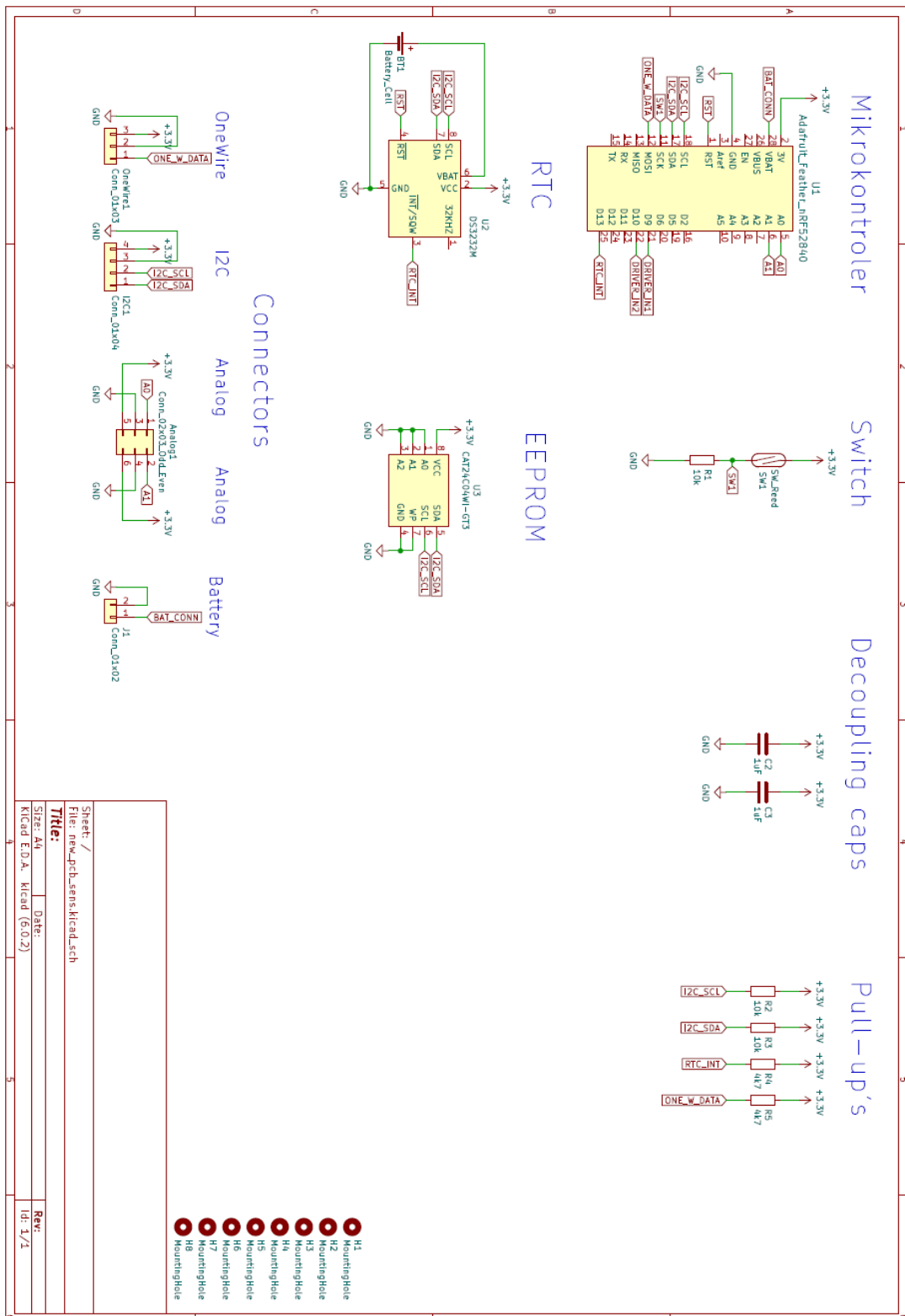
AC	Alternating Current
ADC	Analog to Digital Converter
BLE	Bluetooth Low Energy
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CPU	Central Processing Unit
DC	Direct Current
DMA	Direct Memory Access
DPDT	Double Pole Double Throw
DPS	Deska Plošného Spoje
EC	Electrical Conductivity
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
GATT	Generic ATtribute Profile
GPIO	General-Purpose Input/Output
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit bus
IoT	Internet of Things
LED	Light-Emitting Diode
LiIon	Lithium-Iontový akumulátor
LiPol	Lithium-Polymerový akumulátor
LPO	Low Power Oscillator
MEMS	MicroElectroMechanical Systems
MQTT(S)	Message Queuing Telemetry Transport (Secure)
NFC	Near Field Communication
OS	Operation System
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
RTC	Real Time Clock
SCL	Serial Clock Line
SDA	Serial Data line
SDK	Software Development Kit
SoC	System of a Chip
SPDT	Single Pole Double Throw
SPI	Serial Peripheral Interface
SWD	Serial Wire Debug
TDS	Total Dissolved Solids
UARTE	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter with EasyDMA
USB	Universal Serial Bus
UUID	Universally Unique Identifier

## SEZNAM PŘÍLOH

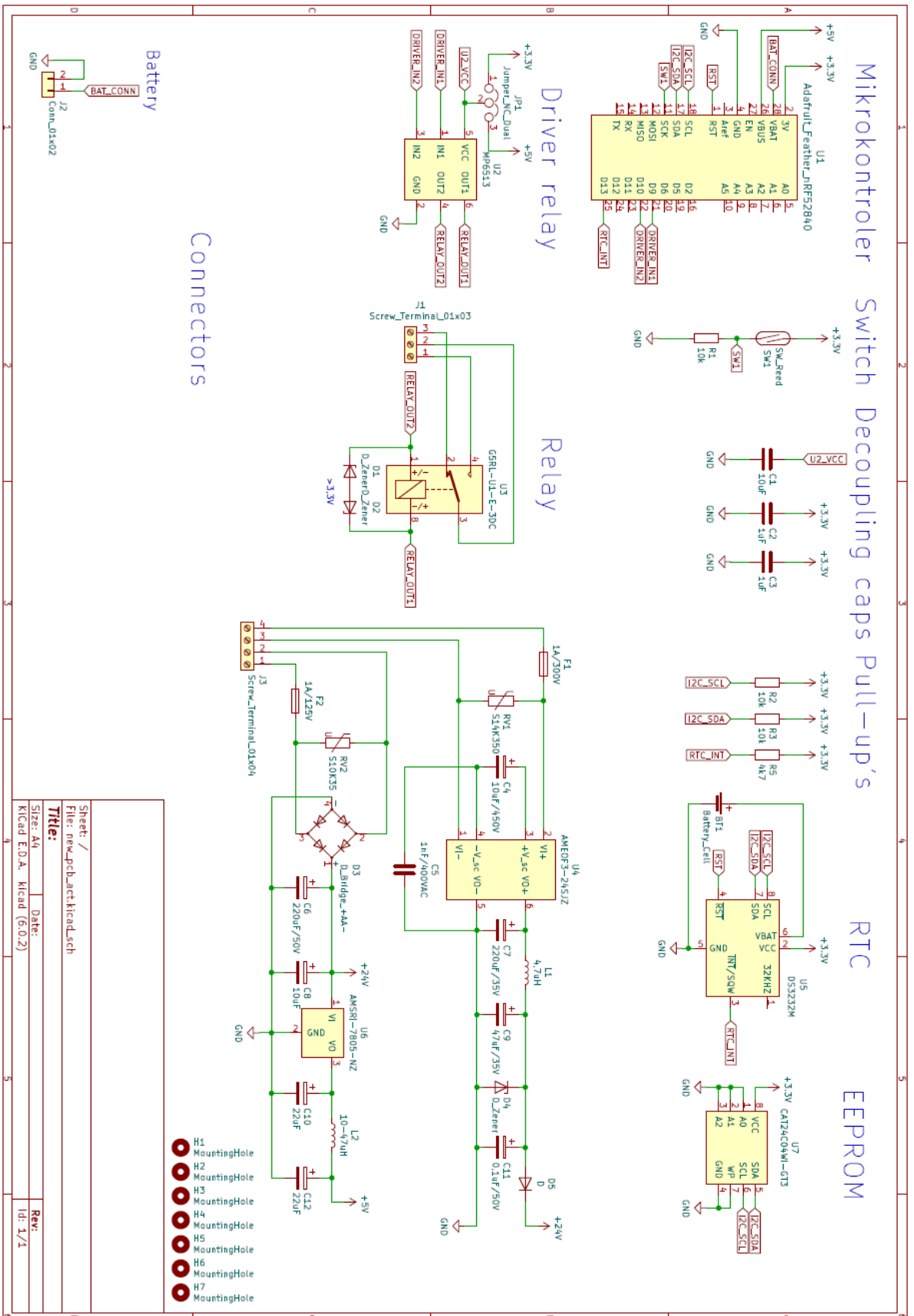
PŘÍLOHA A - SCHÉMATA NAVRŽENÉHO ŘÍDICÍHO SYSTÉMU .....	85
PŘÍLOHA B - PODKLADY PRO VÝROBU DPS ŘÍDICÍHO MODULU SNÍMAČŮ 2:1 .....	88
PŘÍLOHA C - PODKLADY PRO VÝROBU DPS ŘÍDICÍHO MODULU AKTORŮ 2:1.....	90
PŘÍLOHA D - PODKLADY PRO VÝROBU DPS SNÍMAČŮ 3:1.....	94
PŘÍLOHA E - 3D MODELY NAVRŽENÝCH DPS .....	95
PŘÍLOHA F - REÁLNÉ FOTOGRAFIE VÝSLEDNÝCH ZAŘÍZENÍ .....	98
PŘÍLOHA G - OBSAH PŘÍLOHY NA CD .....	101

# Příloha A - Schémata navrženého řídicího systému

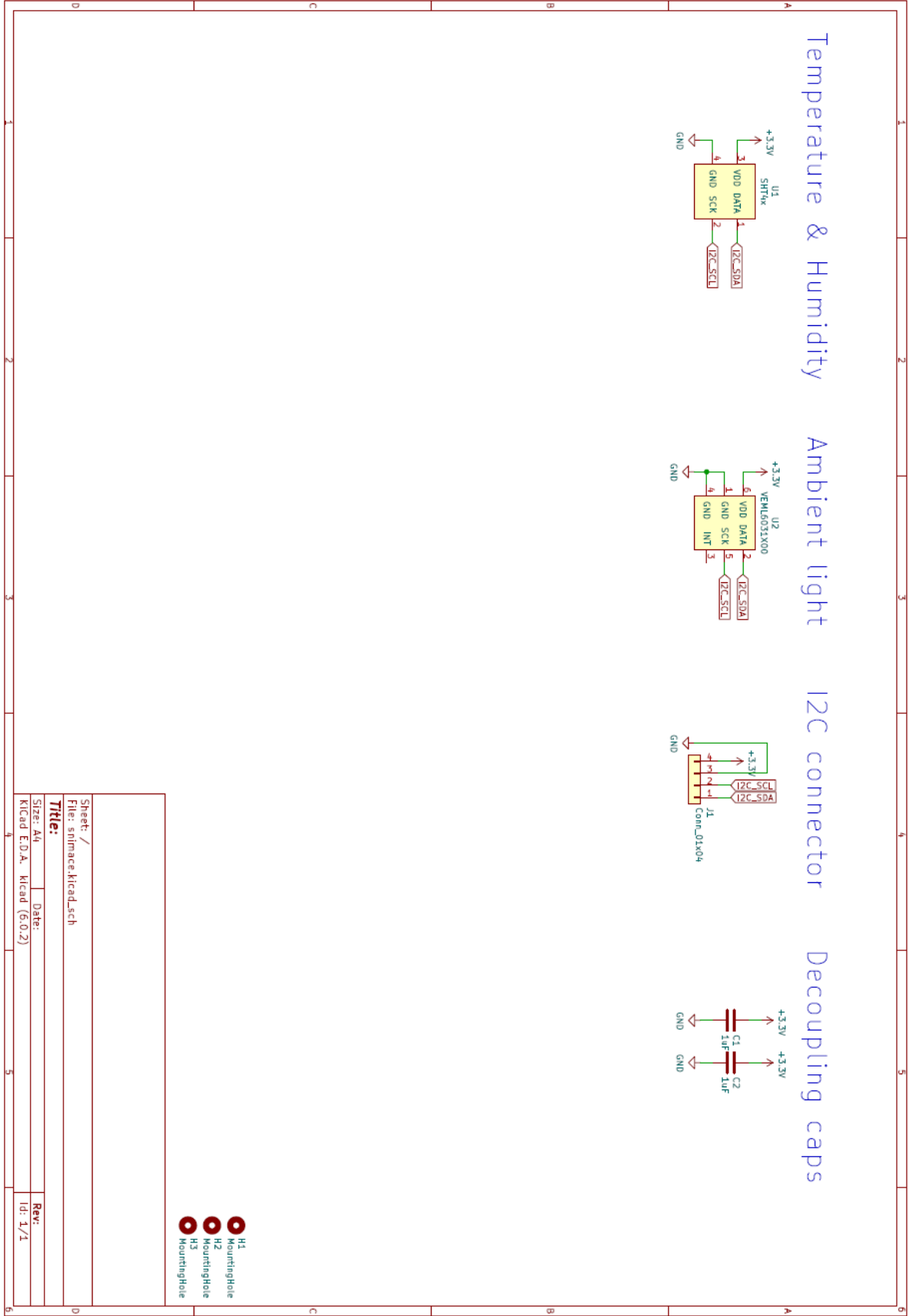
## A.1 Schéma řídicího modulu snímačů



## A.2 Schéma řídicího modulu aktorů

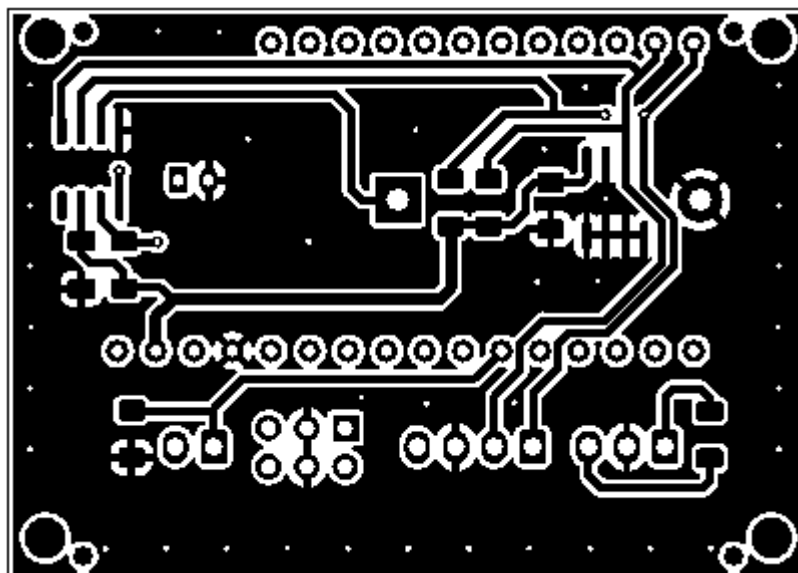


# A.3 Schéma desky snímačů

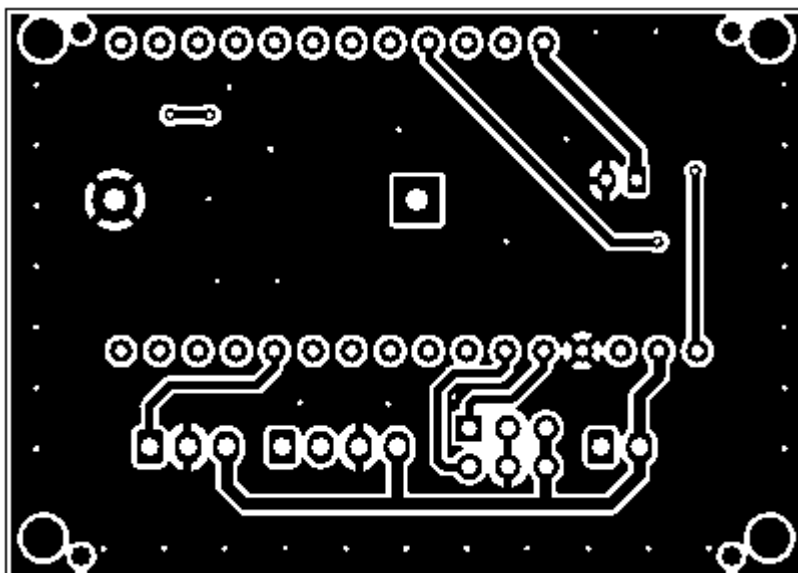


## **Příloha B - Podklady pro výrobu DPS řídicího modulu snímačů 2:1**

### **B.1 Maska mědi (front)**

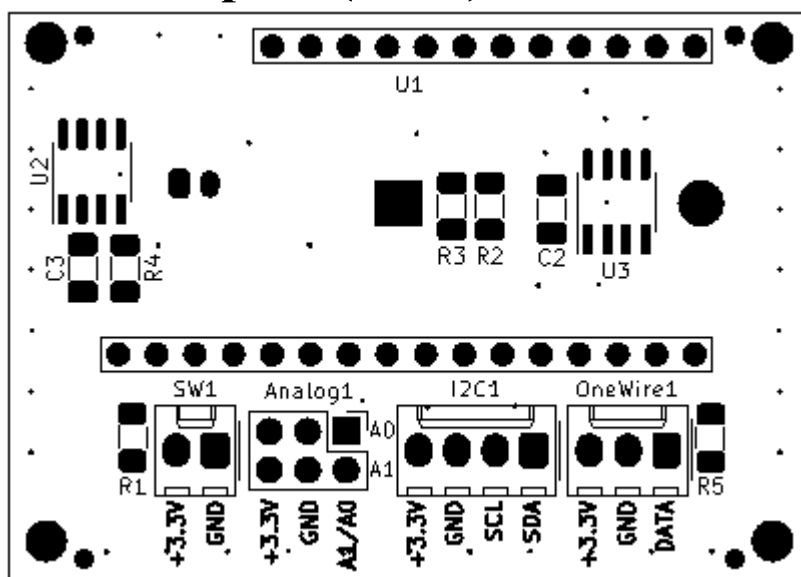


### **B.2 Maska mědi (bottom)**

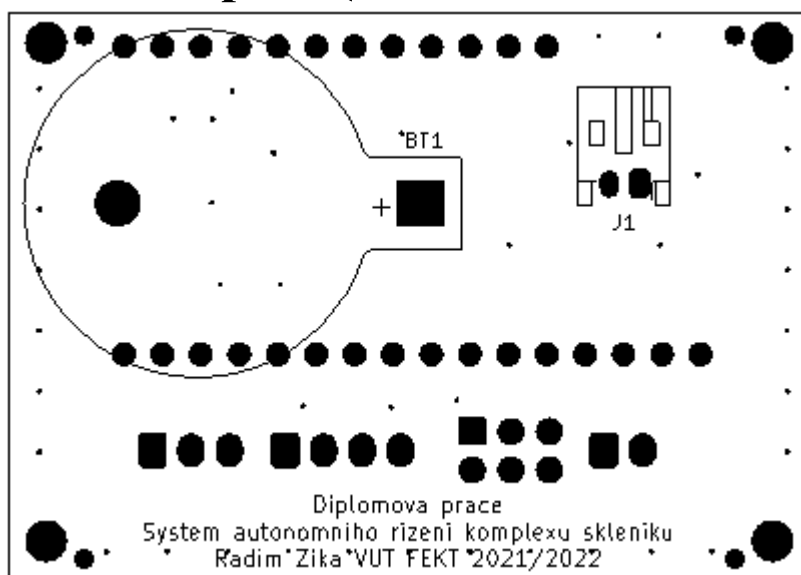




### B.3 Osazovací plán (front)

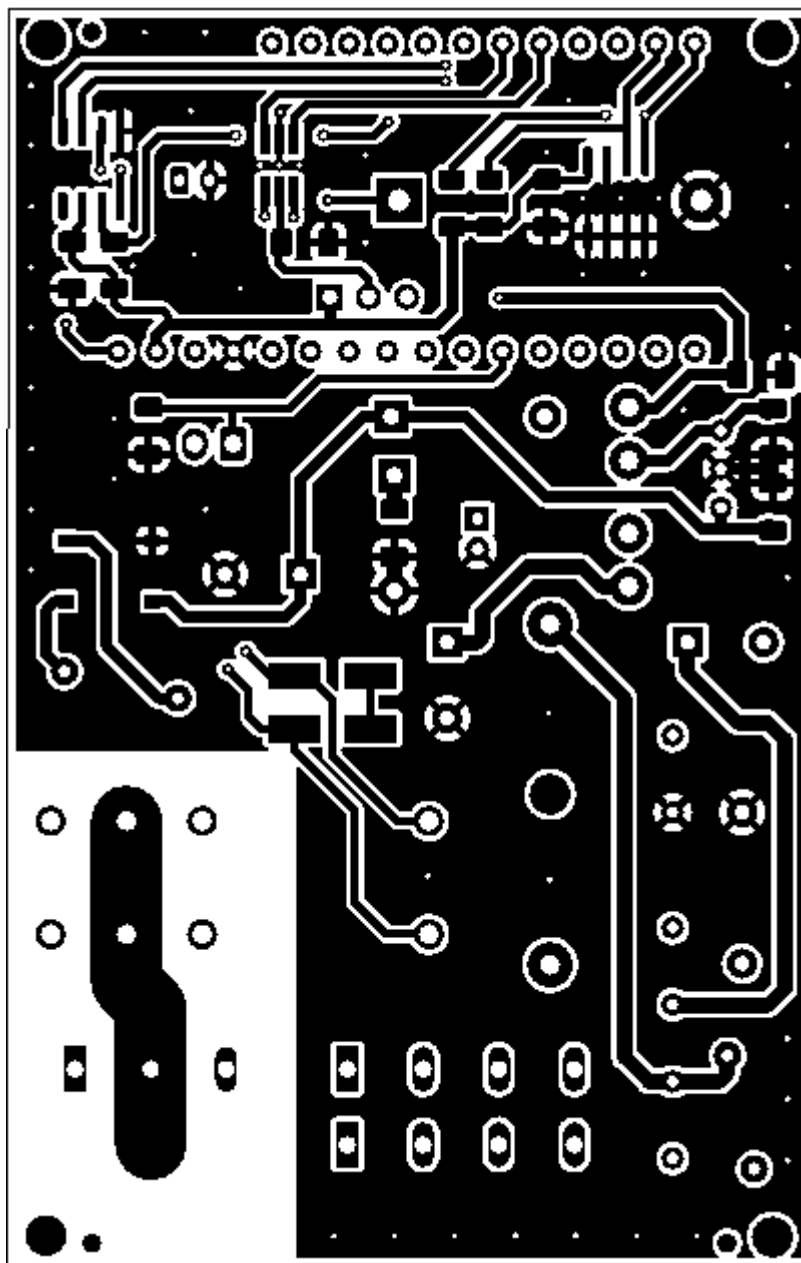


### B.4 Osazovací plán (bottom)

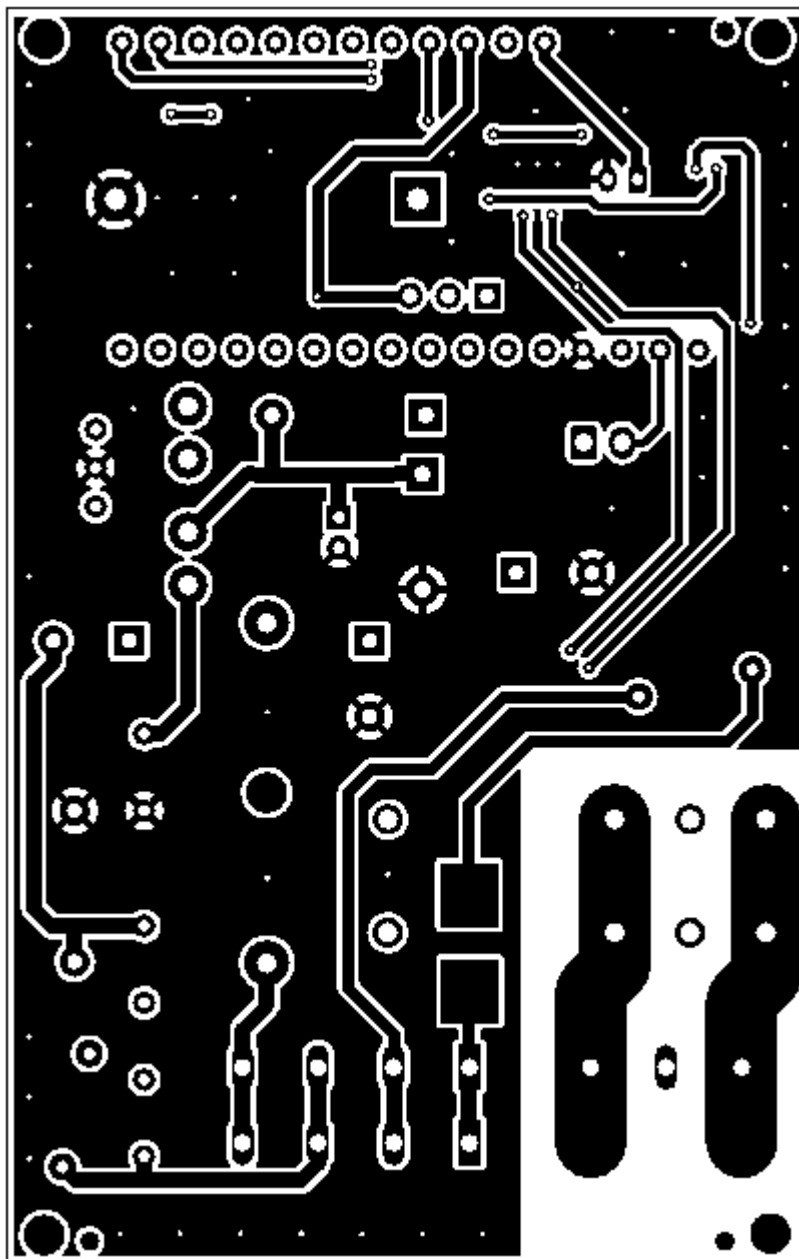


## Příloha C - Podklady pro výrobu DPS řídicího modulu aktorů 2:1

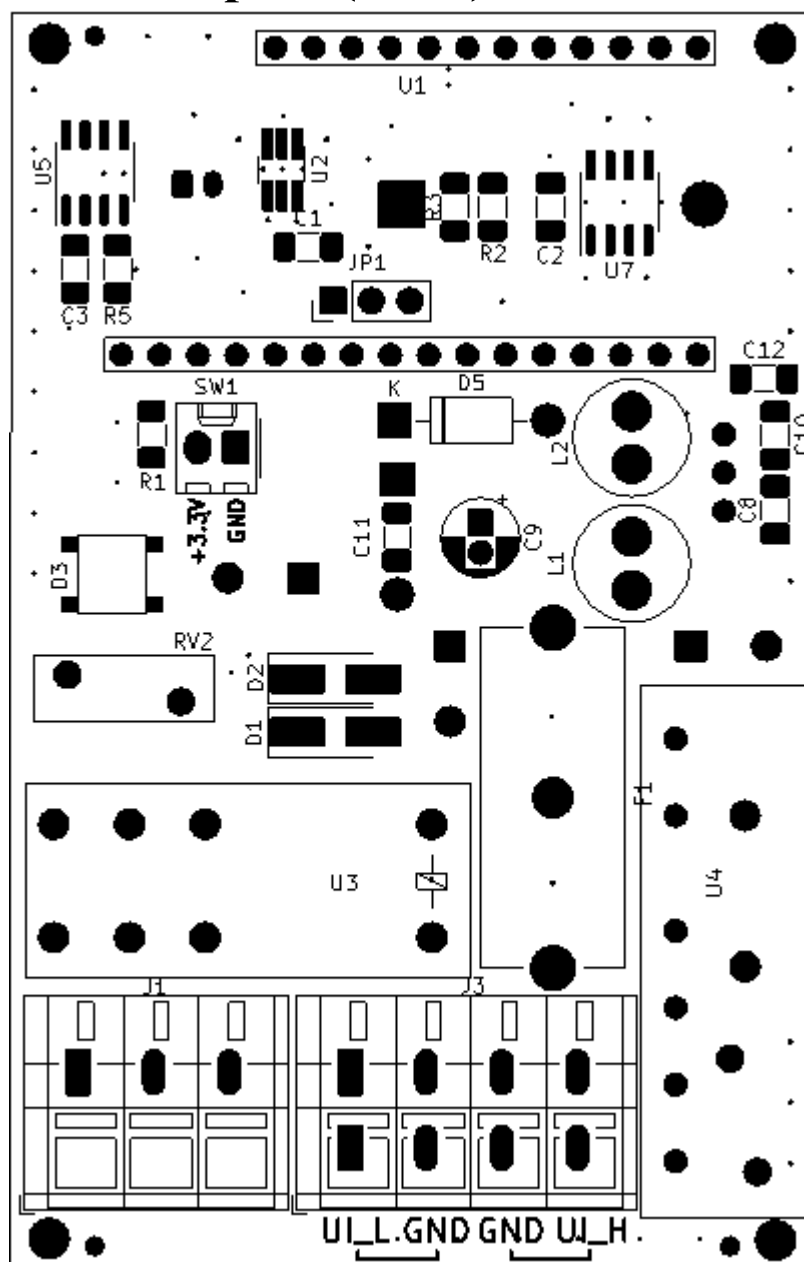
### C.1 Maska mědi (front)



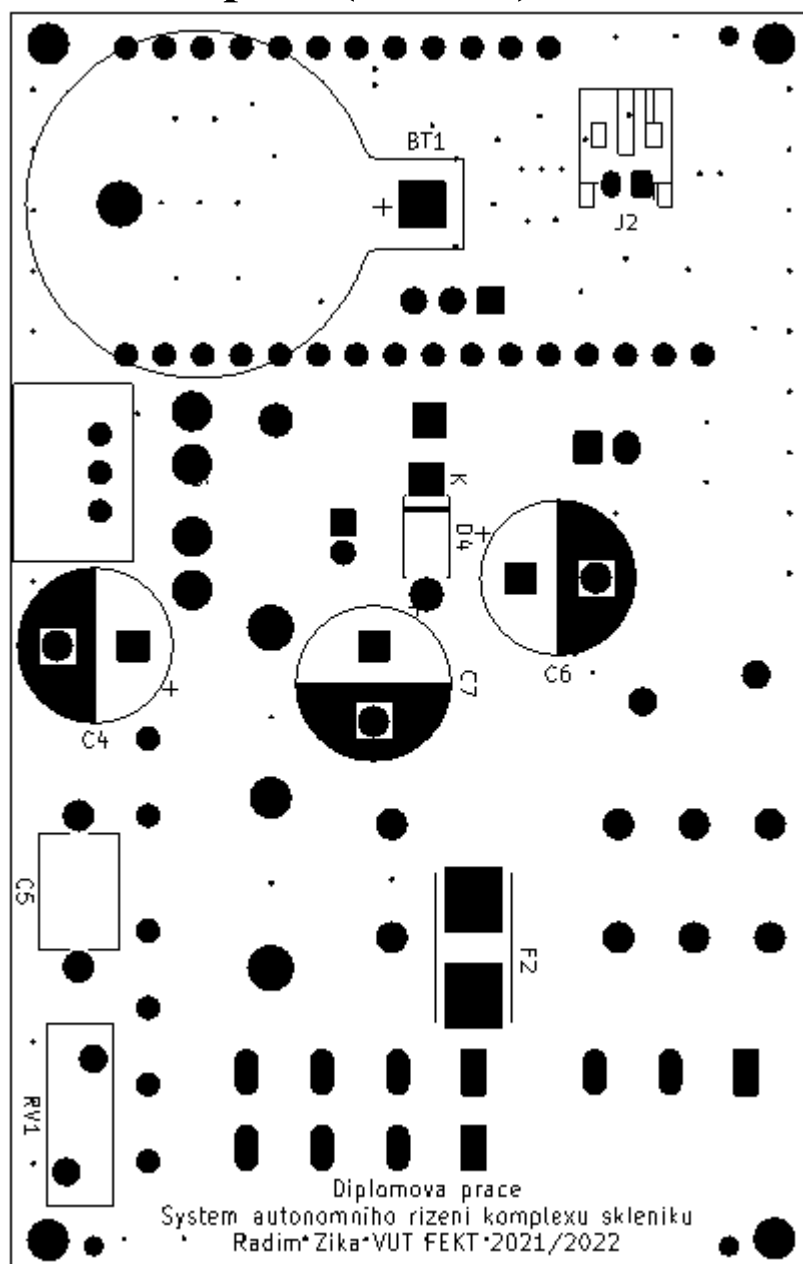
## C.2 Maska mědi (bottom)



### C.3 Osazovací plán (front)

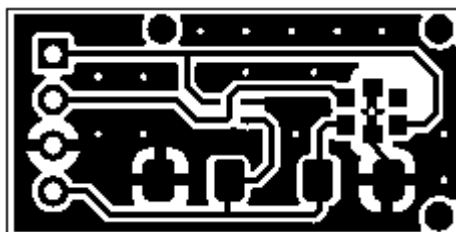


## C.4 Osazovací plán (bottom)

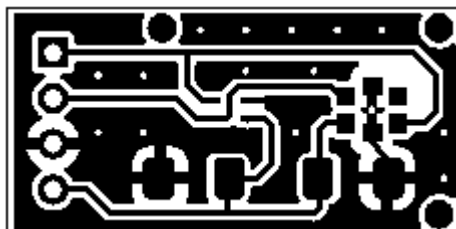


## **Příloha D - Podklady pro výrobu DPS snímačů 3:1**

### **D.1 Maska mědi (front)**



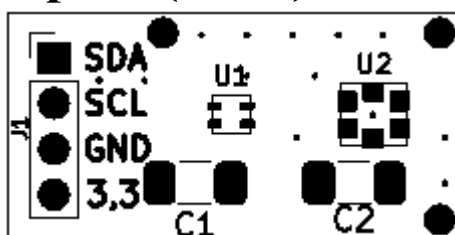
### **D.2 Maska mědi (front)**



### **D.3 Maska mědi (bottom)**

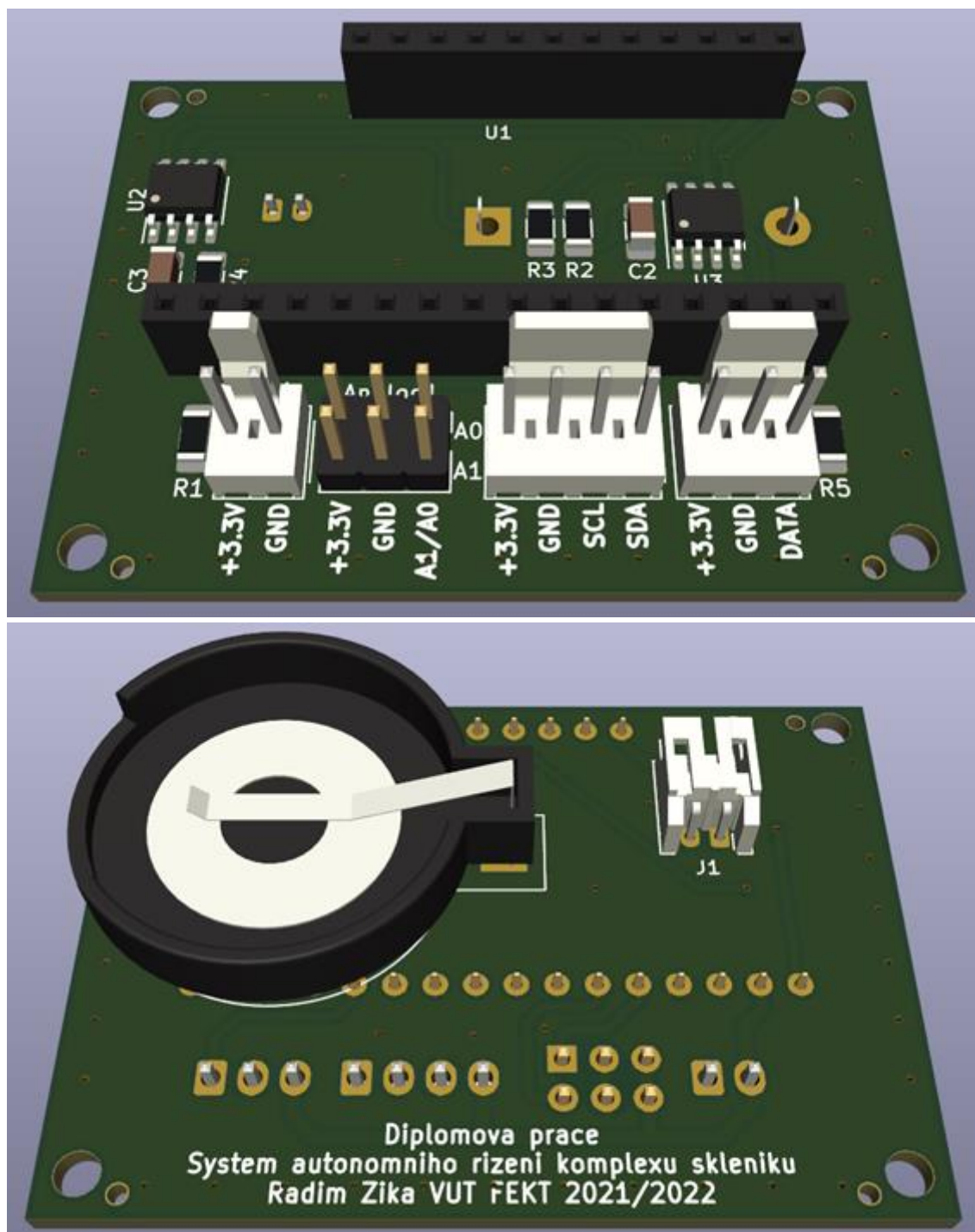


### **D.4 Osazovací plán (front)**



## Příloha E - 3D modely navržených DPS

### E.1 Model DPS řídicího modulu snímačů

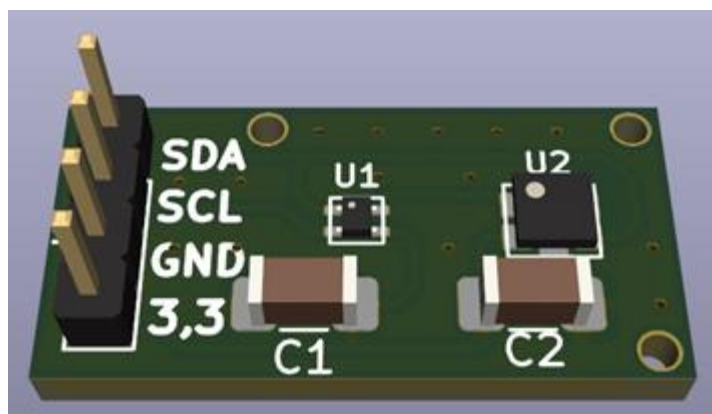


## E.2 Model DPS řídicího modulu aktorů



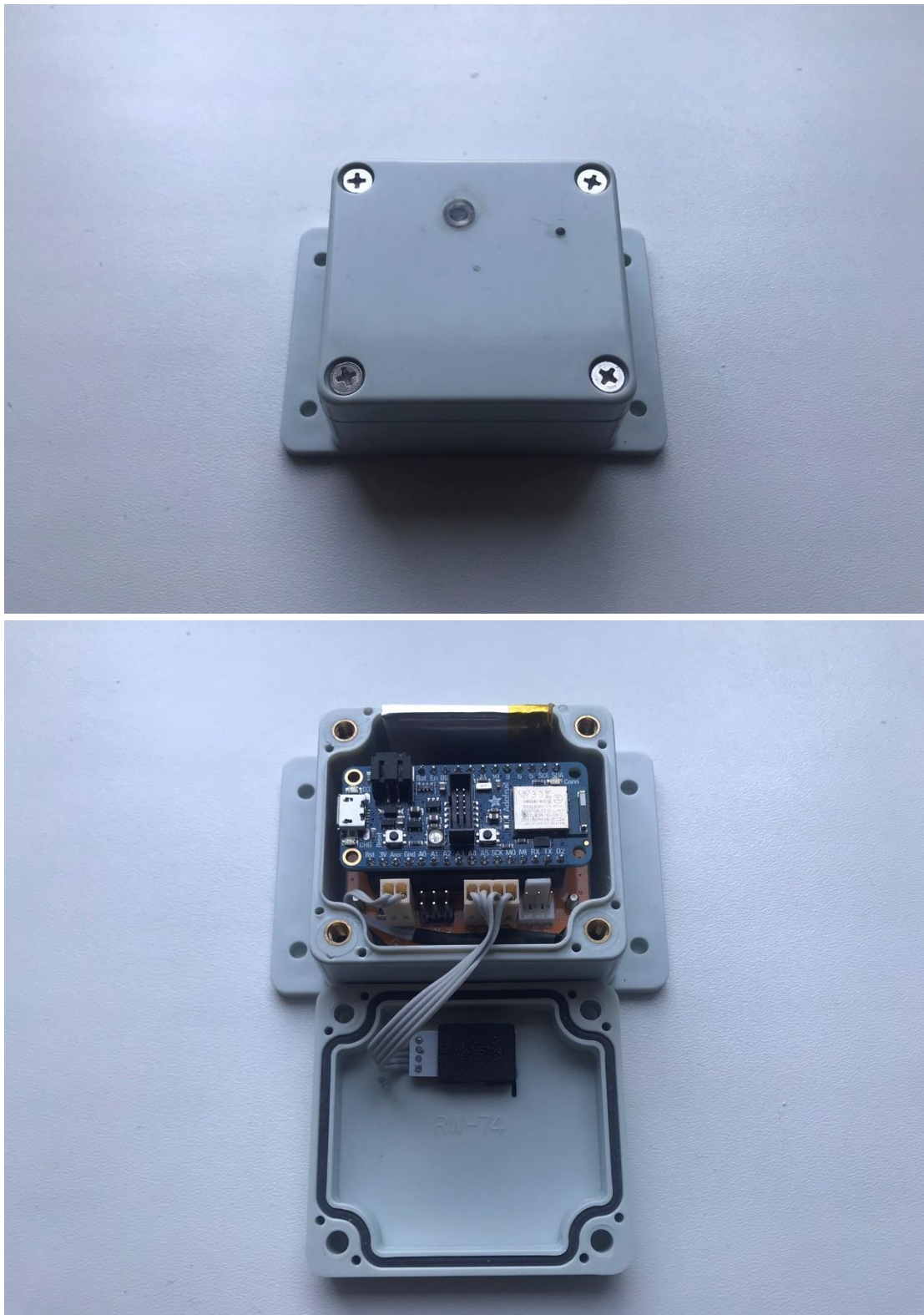


### E.3 Model DPS snímačů

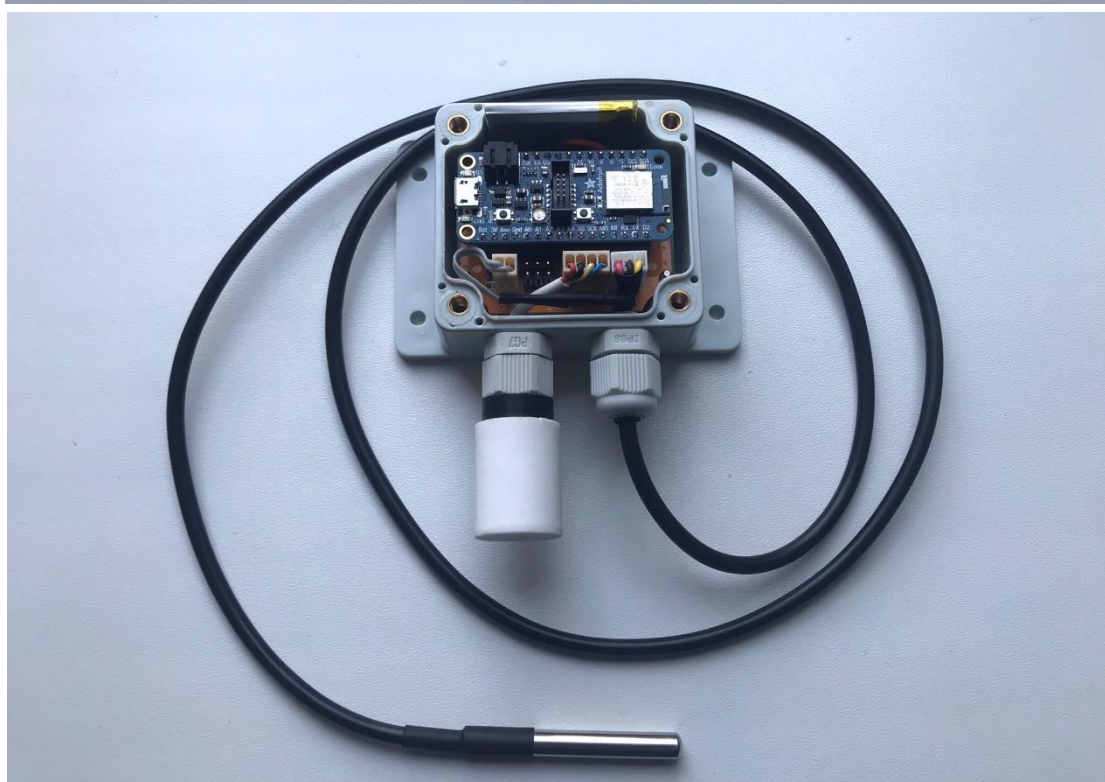


## **Příloha F - Reálné fotografie výsledných zařízení**

### **F.1 Řídicí modul snímačů (snímač osvětlení)**

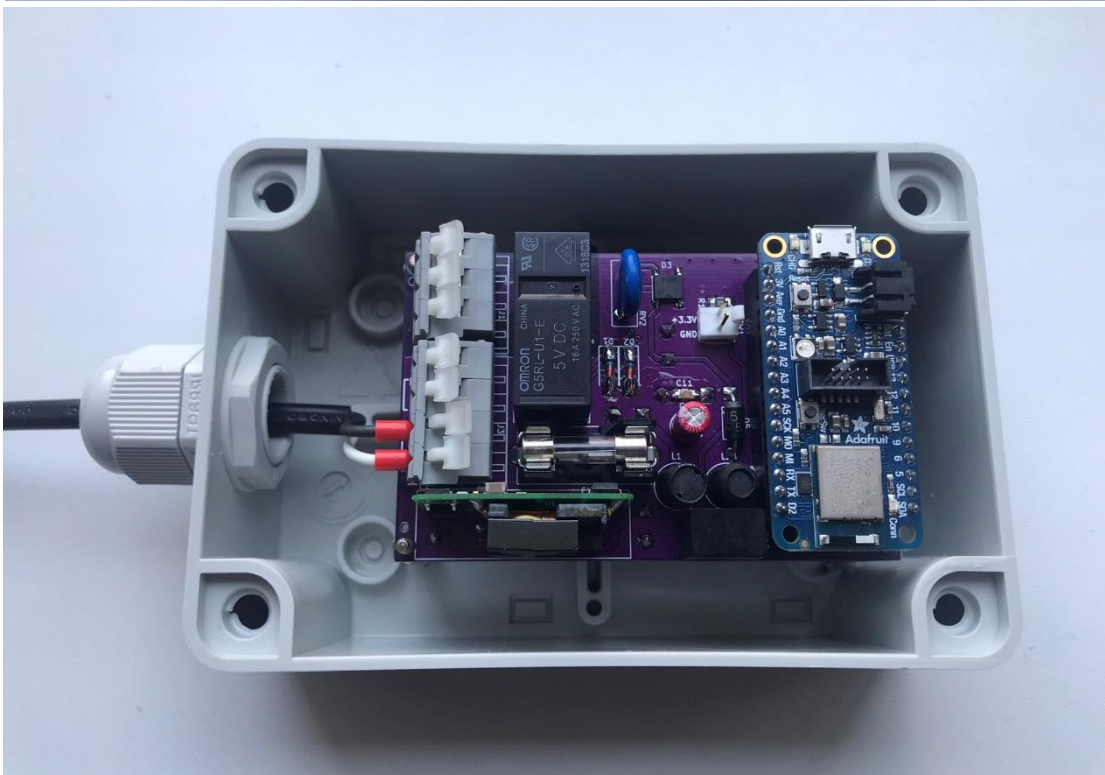


## F.2 Řídicí modul snímačů (snímač teploty a vlhkosti)





### F.3 Řídicí modul aktorů



## Příloha G - Obsah přílohy na CD

Název souboru/adresáře		Význam
./kicad/libs/	–	KiCad knihovny vytvořených prvků
./kicad/projects/	–	KiCad projekty (schémata, dps, gerbers)
./kicad/projects/act_mod/	–	KiCad projekt řídicího modulu aktorů
./kicad/projects/sens_mod/	–	KiCad projekt řídicího modulu sensorů
./kicad/projects/sens_pcb/	–	KiCad projekt PCB pro snímače VEML6031 a SHTx4
./programs/	–	PlatformIO projekty
./programs/illu_mod/	–	PlatformIO projekt modulu snímače intenzity osvětlení
./programs/temp_humi_mod/	–	PlatformIO projekt modulu snímače teploty a vlhkosti
./programs/watering_relay_mod/	–	PlatformIO projekt modulu zavlažovacího relé
./programs/heating_relay_mod/	–	PlatformIO projekt modulu relé pro řízení vytápění
./programs/*/include	–	Vlastní knihovny v projektech
./thingsboard/	–	Konfigurační soubory pro ThingsBoard gateway
./xzikar01_diplomova_prace.pdf	–	Vlastní text diplomové práce