



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

KONCENTRÁTOR PRO DÁLKOVÝ SBĚR DAT A BEZDRÁTOVÉ MODULY

DATA CONCENTRATOR FOR DATA ACQUISITION AND WIRELESS MODULES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

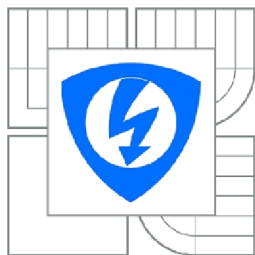
Bc. TOMÁŠ PALACKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR FIEDLER, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Tomáš Palacký

ID: 125578

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Koncentrátor pro dálkový sběr dat a bezdrátové moduly

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s principy a metodami bezdrátové komunikace na frekvenci 868 MHz.
2. Proveďte průzkum trhu v oblasti bezdrátových rádiových vysílačů/přijímačů pracujících na této frekvenci. Vyberte cenově dostupný typ, s nímž budete dále pracovat.
3. Navrhněte a realizujte jednoduché moduly pro měření kvality ovzduší, teploty a dalších parametrů místností. Vybavte tyto moduly rádiovým vysílačem/přijímačem.
4. Navrhněte a do modulů implementujte jednoduchý SW pro obsluhu všech připojených snímačů a odesílání dat rádiovými vysílači.
5. Navrhněte a realizujte připojení bezdrátového vysílače/přijímače k minipočítači Raspberry Pi.
6. Navrhněte a realizujte pro tento minipočítač software pro sběr dat ze sítě bezdrátových modulů.
7. Vyřešte způsob získávání naměřených dat do PC (např. logováním na SD kartu, prostřednictvím připojení Ethernet a služeb jako http či FTP).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Matt Richardson: Getting Started with Raspberry PI

Termín zadání: 9.6.2015

Termín odevzdání: 3.8.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.

Konzultanti semestrální práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem systému pro vzdálené měření kvality vzduchu v budovách. V první části je uveden výběr a rozbor použitých hardwarových a softwarových prostředků: minipočítače Rapsberry Pi, mikrokontroleru STM32F401, modulu pro bezdrátovou komunikaci XBee-Pro, senzoru CO₂ a také využívaných komunikačních rozhraní I²C a USART. Dále je obsahem návrh elektrického zapojení, plošného spoje, konfigurace bezdrátových modulů a programové řešení softwaru mikrokontroleru, koncentrátoru a uživatelské aplikace pro PC.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kvalita vzduchu, bezdrátová komunikace, XBee-Pro, 868 Mhz, I²C, USART, USB, CO₂, teplota, vlhkost, Rapsberry Pi, STM32, C#

ABSTRACT

This master's thesis deals with design and construction of a system for remote measurement of air quality in buildings. The first section provides a selection and analysis of used hardware and software components: minicomputer Raspberry Pi, STM32F401 microcontroller, communication module XBee-Pro, CO₂ sensor and also communication interfaces I²C and USART. The next section includes a design of electrical wiring, circuit board, configuration of the wireless modules and a software implementation for microcontroller, concentrator and a user's application for PC.

KEYWORDS

Air quality, wireless communication , XBee-Pro, 868 Mhz, I²C, USART, USB, CO₂, temperature, humidity, Rapsberry Pi, STM32, C#

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:

PALACKÝ, T. Koncentrátor pro dálkový sběr dat a bezdrátové moduly. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 57 s., 8 s příloh. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Koncentrátor pro dálkový sběr dat a bezdrátové moduly jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Petru Fiedlerovi a konzultantovi Ing. Václavu Kaczmarczykovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Bezdrátové komunikace pro embedded aplikace	2
1.1 Teorie šíření rádiových signálů.....	2
1.2 Legislativa a limity rádiového vysílání v ČR	4
1.3 Výběr rádiového vysílače	5
1.3.1 Průzkum trhu rádiový vysílačů	5
1.3.2 Volba vhodného typu.....	9
2 Měření kvality vzduchu	11
2.1 Měření teploty	11
2.2 Měření vlhkosti	13
2.3 Měření koncentrace znečišťujících plynů	15
3 Výběr komponent systému	16
3.1 Koncentrátor	16
3.1.1 Rapsberry Pi.....	16
3.2 Měřicí moduly.....	17
3.2.1 Snímač CO2 Telaire T 6615	17
3.2.2 Mikrokontrolér	18
3.3 Využívaná komunikační rozhraní	22
3.3.1 Sběrnice I ² C	22
3.3.2 Sériové rozhraní USART	23
4 Návrh a realizace hardwarových komponent systému	25

4.1	Koncentrátor	26
4.2	Měřicí moduly - Elektrické schéma a DPS.....	28
4.2.1	Napájecí část	28
4.2.2	Mikrokontrolér.....	29
4.2.3	Modul xBee a snímače.....	30
4.2.4	Obvod FTDI232.....	33
4.2.5	Konektory	33
5	Softwarové řešení	36
5.1	Nastavení xBee modulů	36
5.2	Komunikační protokol pro RF rozhraní.....	39
5.3	Software měřicích modulů.....	42
5.3.1	Obsluha senzorů.....	42
5.3.2	Dvoubodová kalibrace senzorů.....	45
5.3.3	Algoritmus	46
5.4	Software koncentrátoru.....	47
5.5	Uživatelská aplikace pro PC	50
	Závěr	52
	Literatura	53
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	55
	Seznam příloh	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	RF modul RFM69HCW	6
Obr. 1.2:	RF modul RC1780HP-RC232	6
Obr. 1.3:	RF modul TR-868-21	7
Obr. 1.4:	RF modul XTR-7020.....	8
Obr. 1.5:	RF modul XBee-Pro 868	8
Obr. 3.1:	Raspberry Pi model B.....	16
Obr. 3.2:	Telaire T 6615	18
Obr. 3.3:	Blokový diagram mikrokontroléru STM32F401 (převzato z [11])....	20
Obr. 3.4:	STM32F401 - zapojení vývodů pouzdra LQFP64 (převzato z [11]) .	21
Obr. 3.5:	Příklad připojení několika zařízení na sběrnici I ² C (převzato z [9])..	22
Obr. 3.6:	Časový průběh logických úrovní sběrnice I2C (převzato z [9]).....	23
Obr. 4.1:	Blokové schéma hardwaru.....	25
Obr. 4.2:	Propojení Raspberry Pi a xBee (převzato z [13]).....	27
Obr. 4.3:	HW koncentrátoru	27
Obr. 4.4:	Blokové schéma měřicího modulu	28
Obr. 4.5:	Napájecí část.....	29
Obr. 4.6:	Zapojení mikrokontroleru.....	30
Obr. 4.7:	Zapojení xBee a snámačů.....	31
Obr. 4.8:	Napěťový převod I ² C.....	31
Obr. 4.9:	Napěťový převod I ² C - simulace	31
Obr. 4.10:	Odporový dělič pro AD převod	32
Obr. 4.11:	Zapojení obvodu FTDI232	33
Obr. 4.12:	Zapojení konektorů USB a SWD	34

Obr. 4.13:	Modul pro měření vzduchu.....	35
Obr. 5.1:	Topologie sítě Point to Multipoint	36
Obr. 5.2:	Test přenosu dat 300mW, 3m.....	37
Obr. 5.3:	Test přenosu dat 1mW, 3m.....	38
Obr. 5.4:	Test přenosu dat 100mW, 8m.....	38
Obr. 5.5:	Hlavička RF zprávy	40
Obr. 5.6:	RF zpráva MEASUREMENT REQUEST	41
Obr. 5.7:	Hlavička RF zprávy	41
Obr. 5.8:	Diagram čtení dat ze senzoru vlhkosti (převzato z [13]).....	43
Obr. 5.9:	Kalibrační křivka teploty	45
Obr. 5.10:	Vývojový diagram 1	47
Obr. 5.11:	Graf průběhu teploty a koncentrace CO2	50

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1:	Vybraná volná pásma SKD (převzato z [2])	4
Tab. 1.2:	Srovnání parametrů RF modulů	9
Tab. 5.1:	Přidělená ID RF zařízení	39
Tab. 5.2:	Typy RF zpráv a jejich kódy	40

ÚVOD

S měřením vlastností vzduchu se setkáváme v mnoha odvětvích. Ať už jsou to průmyslové procesy, výrobní haly, stavby, veřejné objekty, nebo domácnosti, kvalita vzduchu je zkoumána velmi často. Již dávno nejsme omezeni a pouhé měření teploty, ale technika dnes poskytuje široké možnosti, jak parametry vzduchu, který nás obklopuje, měřit.

Cílem této práce je navrhnout systém pro měření vlastností vzduchu v budovách a vzdálený sběr těchto dat. Ze zadání vyplývá použití minipočítače Raspberry Pi jako centrálního řídicího zařízení. Samotné měření kvality vzduchu budou zajišťovat měřicí moduly s osazenými senzory příslušných veličin. Vzhledem k možnostem je třeba vybrat vhodné snímače pro monitorování především teploty, vlhkosti, či oxidu uhličitého. Těchto modulů může být za potřeby velký počet, zvláště pak při monitorování kvality vzduchu v rozsáhlých budovách. Z toho vyplývá nutnost použití bezdrátové komunikace pro sběr dat. Je třeba zvolit vhodné řešení bezdrátové komunikace a to jak z hlediska hardwaru (vysílače/přijímače), tak z hlediska softwaru (komunikační protokol). Pro samotné měření prostřednictvím senzorů i pro komunikaci modulů s řídicím počítačem je vhodné použití mikrokontroleru, který bude srdcem každého bezdrátového měřicího modulu.

Měřená data je potřeba dlouhodobě zaznamenávat. Následná analýza dat by měla být pro uživatele takového systému co možná nejsnazší. Je proto nutné zvolit vhodný formát uložených dat a vytvořit nástroj, který by takovou analýzu umožňoval.

1 BEZDRÁTOVÉ KOMUNIKACE PRO EMBEDDED APLIKACE

1.1 Teorie šíření rádiových signálů

V ideálním rádiovém kanálu se šíří signál od vysílací antény k přijímací anténě po jediné přímé dráze na níž dochází pouze k útlumu signálu a k jeho časovému zpoždění. Šíření signálu v reálných podmínkách negativně ovlivňuje řada různých jevů, které mohou způsobit jeho znehodnocení. Jsou to různé typy úniků signálu, způsobené mnohocestným šířením vln i jinými fyzikálními jevy, různá atmosférická a průmyslová rušení, interference dalších elektromagnetických záření.

Pokud jsou vysílač a přijímač vzájemně v pohybu, uplatňuje se Dopplerův jev, kdy při pohybu k sobě je přijímaná frekvence vyšší než frekvence vysílaná. Naopak je tomu při pohybu od sebe. K takovému ovlivnění signálu dochází i v případě pohybu části prostředí, ve kterém se signál šíří.

V reálném prostředí se vysílaný signál odráží od různých překážek a šíří se tak mnoha cestami. V každém bodě daného prostředí dochází k vektorovému sčítání přímého a odražených signálů. V prostředí se tak mohou vytvořit tzv. lokální maxima a lokální minima signálu, jejichž vzdálenost závisí na vlnové délce vysílaného signálu. Jako rádiové vlny se označuje elektromagnetické vlnění s kmitočtem v rozsahu od 10 kHz do 3000 GHz, což odpovídá vlnovým délkám v rozsahu od 30 km do 0,1 mm. Vzájemný vztah mezi kmitočtem f a vlnovou délkou λ je následující:

$$\lambda = \frac{c}{f} [m] \quad (1.1)$$

kde $c [m \cdot s^{-1}]$ rychlost šíření vlnění v prostředí

$f [Hz]$ teplotní součinitel odporu daného materiálu

Výše uvedené spektrum vlnění lze rozdělit do následujících kmitočtových pásem [1]:

Pásmo velmi dlouhých a dlouhých vln (3 kHz až 300 kHz)

I s relativně malým vyzářeným výkonem se vlny šíří na dlouhé vzdálenosti s malým útlumem. Z důvodu značného atmosférického a průmyslového rušení je nutné použití antén s velkými rozměry. V pásmu se celkově nízký počet možných rádiových kanálů.

Pásmo středních vln (300 kHz až 3 MHz)

Signál se šíří dvěma způsoby. Především je to povrchovou vlnou kolem zemského povrchu ve výšce srovnatelnou s vlnovou délkou a do vzdálenosti asi 100 km. V noci se signál odráží od ionosféry a šíří se také prostorovou vlnou. Na přijímači se obě vlny vektorově sčítají, což může mít za následek kolísání přijímaného signálu.

Pásmo krátkých vln (3 MHz až 30 MHz)

Signály krátkých vln se šíří odrazy od ionosféry a zemského povrchu. Velká nevýhoda je závislost na aktuální hustotě ionosféry, kterou ovlivňuje kosmické záření, denní doba, roční období. Pásmo se používá pro spojení na velmi dlouhé vzdálenosti.

Pásmo velmi krátkých vln (30 MHz až 300 MHz)

Velmi krátké rádiové vlny se šíří přímou vlnou na vzdálenost tzv. rádiového horizontu. Je to způsobeno částečným ohybem přímé vlny kolem zemského povrchu. Rádiové vlny jsou ovlivňovány odrazy od vodivých překážek a ohyby na hřebenech hor. Pozemní televizní a rozhlasové vysílání využívají toto pásmo.

Pásmo ultra krátkých vln (300 MHz až 3 GHz)

Podobně jako u velmi krátkých vln i ultra krátké vlny se šíří přímou vlnou. Jsou výrazně ovlivněny četnými odrazy od překážek, jež jsou rozměry srovnatelné s vlnovou délkou. Opět se uplatňuje vektorové sčítání jednotlivých přijímaných vln. Pásmo využívají družicové, letecké systémy a také mobilní operátoři.

Pásmo centimetrových a kratších vln (3 GHz až 3000 GHz)

Šíření vln v těchto pásmech je výrazně ovlivňováno překážkami na přenosové trase. Nepochází k tak častým odrazům, ale signál je překážkou odstíněn podobně jak je tomu u světelného záření. Z toho vyplývá nutnost přímé viditelnosti komunikujících přijímačů. Pásmo využívají především družicové systémy.

1.2 Legislativa a limity rádiového vysílání v ČR

Pro bezdrátové komunikace je používáno mnoho standardů využívajících různá frekvenční pásma. Všechna elektronická zařízení, která vyzařují elektromagnetické vlny musejí splňovat normy dané příslušným orgánem země a pro vysílání v určitých kmitočtových pásmech musejí mít licenci. V České republice zajišťuje přidělování licencí Český telekomunikační úřad (ČTÚ). Kromě licencovaných pásem existují bezlicenční pásma ISM. Pro využití bezlicenčního pásma není třeba žádat ČTÚ o vydání povolení, je ale stále nutné dodržovat stanovené technické parametry vysílání, aby nedocházelo k vzájemnému rušení dalších sítí pracujících na stejné či jiné frekvenci. Zde je uveden výběr ISM pásem pro nespécifikované stanice krátkého dosahu (SKD) a technické parametry stanic podle [2].

Tab. 1.1: Vybraná volná pásma SKD (převzato z [2])

Ozn.	Kmitočtové pásmo	Vyzářený výkon	Kanálová rozteč
f2	433,050 – 434,790 MHz	10 mW e.r.p.	max. 25 kHz
g1	868,000 – 868,600 MHz	25 mW e.r.p.	není stanoveno
g2	868,700 – 869,200 MHz	25 mW e.r.p.	není stanoveno
g3	869,300 – 869,400 MHz	25 mW e.r.p.	max. 25 kHz
g4	869,400 – 869,650 MHz	500 mW e.r.p.	max. 25 kHz
g5	869,700 – 870,000 MHz	5 mW e.r.p.	není stanoveno
h	2400 – 2483,5 MHz	25 mW e.i.r.p.	není stanoveno

Vzhledem k cenám realizace, drahým licencím a vhodnosti pro použití v tomto projektu, připadají v úvahu tři bezlicenční kmitočtová pásma: 433 MHz, 868 Mhz a 2,4 Ghz. Poslední jmenované pásmo využívají komunikační standardy Wi-Fi a Bluetooth. a tato frekvenční oblast je značně zarušena četnými sítěmi Wi-Fi. Dalším standardem je ZigBee, který umožňuje komunikaci na kmitočtech 2,4 GHz, 915 MHz (pro americký kontinent) a 868 Mhz (pouze jeden kanál). Porovnáme-li zbylé možnosti, v pásmu 868 MHz lze při stejné hodnotě vyzářeného výkonu dosáhnout větší vzdálenosti než v pásmu 433 MHz. V průmyslu a v automatizační technice je často využíváno pásmo 868

Mhz. Na této frekvenci běžně komunikují například bezdrátové senzory, dálkové ovládací prvky, ovládání garážových vrat apod. Využití této frekvence v projektu je dáno ze zadání.

Na pásmo **868 Mhz** se vztahují omezení maximálního vyzářeného výkonu 25mW. Ve volném prostranství může být vzdálenost mezi komunikujícími zařízeními sítě cca 2 km i více. V domě projde signál přes cca 6 podlaží. Tyto údaje je třeba chápat pouze orientačně, protože pokles úrovně signálu se vzdáleností od vysílače závisí na materiálech, kterými signál prochází. Umístění jednotlivých členů sítě 868 MHz v daném objektu musí být provedeno tak, aby síla signálů, přicházejících od jednotlivých periferií, byla v místě přijímače vyšší než -100 dB.

1.3 Výběr radiového vysílače

1.3.1 Průzkum trhu radiový vysílačů

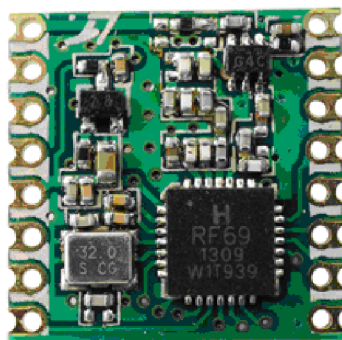
Pro realizaci bezdrátové komunikace na frekvenci 868 MHz v embedded zařízeních se nabízejí dvě základní možnosti přístupu. Buďto je použit specializovaný mikrokontroler s vestavěnou rádiovou (RF) periferií přímo v jednom pouzdře, nebo je rádiový modul samostatný, jako diskrétní součástka či malá DPS, připojený k řídicímu mikrokontroleru přes jedno ze standardních komunikačních rozhraní. Typicky SPI nebo UART. Následující výčet dostupných řešení je zaměřen na druhou možnost – samostatné moduly transceiveru. Tato zařízení usnadňují komunikaci tím, že implementují linkovou vrstvu a zajišťují bezpečnost datového přenosu ve smyslu správnosti doručených dat. Jsou používány ověřovací mechanismy jako posílání potvrzovacích zpráv, kontrolní součty CRC (Cyclic Redundancy Check) apod.

Texas Instruments CC1020

Rádiový vysílač/ přijímač řady CC1020 of firmy Texas Instruments je úzkopásmový UHF transceiver integrovaný na jednom čipu určený pro aplikace s nízkým napětím a malým proudovým odběrem. Jedná je o jedinou diskrétní součástku SMD s komunikačním rozhraním SPI. Disponuje možností měřit sílu přijímaného signálu RSSI (Received Signal Strength Indicator). Jedná je o velmi levné řešení, ale na druhou stranu je implementace pokročilejších technik organizace sítě složitější.

RFM69HCW

Tento zástupce RF modulů od výrobce **HOPERF** je vysoce integrovaný vf tranciever, určený pro provoz v širokém frekvenčním rozsahu, včetně pásem 433, 868 a 915 MHz. Tento modul je navržen tak, aby minimalizoval potřebu vnějších součástek. Všechny vysokofrekvenční parametry jsou programovatelné. Nabízí možnost nastavitelných režimů širokopásmové i úzkopásmové komunikace. Je sice optimalizován pro nízkou spotřebu energie, ale současně nabízí vysoký výstupní výkon.: 16násobný FIR kanálový filtr umožňuje vysokou selektivitu. Další modul od této firmy **RFM12B-868-S2P** je levnější ekvivalent se slabšími parametry nabídkou funkcí.



Obr. 1.1: RF modul RFM69HCW

RC1780HP-RC232

Bezdrátové komunikační moduly firmy **Radiocrfts** se vyznačují vysokým stupněm integrace prvků, zároveň však vykazují dobré parametry. Modul určený pro pásmo 868 MHz RC1780HP-RC232 je sedmnáctikanálový velice kompaktní tranciever s dosahem až do 20 km. Pro dosažení maximálního vyzářeného výkonu je potřeba připojit na přídatné napájení 5 V.



Obr. 1.2: RF modul RC1780HP-RC232

Si4455

RF modul Si4455 od **Silicon Laboratories** podporuje frekvenční pásma 283 MHz až 350 MHz, 425 MHz až 525 MHz a 850 MHz až 960 MHz. Pokrývá tak všechna hlavní pásma. Jedná se o miniaturní SMD součástku s rozměry 3x3 mm. Ve srovnání s konkurencí je nespornou výhodou nízká cena. Obvod je však nutné doplnit o externí pasivní prvky (kondenzátory, cívky, krystal), čímž se implementace stává náročnější a náchylnější k chybám.

TR-868-21

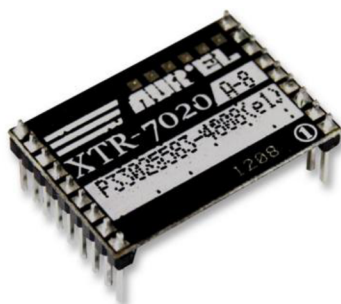
Firma **IQRF** vyrábí miniaturní model TR-868-21 s velmi malou spotřebou, pracující na platformě IQRF. Kromě antény nevyžaduje žádné externí komponenty a je kompatibilní s konektory pro SIM karty. Na desce je integrován teplotní senzor a regulátor napětí s nízkým úbytkem. Umožňuje také sledování napětí baterie. Má zabudovaný operační systém a je nabízena široká podpora vývoje s tímto modulem v podobě vývojových kitů a SW. Výkonovými parametry však poněkud zaostává a je tedy určen především pro komunikaci na krátkou vzdálenost.



Obr. 1.3: RF modul TR-868-21

XTR-7020 A8

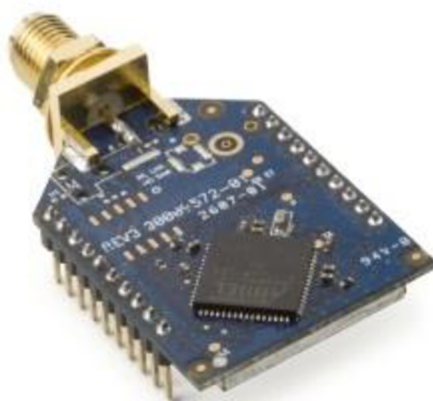
Další z řady RF modulů je XTR-7020 A8 od firmy **Aurel**. Umožňuje nastavit různé komunikační rychlosti a sílu vysílaného signálu, ale dosah tohoto vysílače je poměrně malý, asi 300m.



Obr. 1.4: RF modul XTR-7020

xBee-PRO 868

Komunikační radiomoduly XBee-PRO 868 od společnosti **DIGI International** využívají pásmo 868 MHz (869,525 MHz) a mají nastavitelný výstupní vysílací výkon v rozsahu 1 až 315mW. Tam, kde je to možné, vysoký maximální výkon poskytuje modulu velmi velký dosah. To umožňuje nasadit jej v aplikacích s velkými vzdálenostmi mezi jednotlivými body. Modul XBee-PRO lze připojit k aplikaci přes standardní 3,3 V CMOS UART s přenosovými rychlostmi 1,2 až 230,4 Kbps. Různé moduly XBee od Digi International mají shodné rozložení pinů, proto jsou při stejném designu aplikace zaměnitelné. XBee-PRO 868 používají 128 bitové AES kódování a 64 bitovou adresou. Jsou použitelné pro topologie Point-to-Multipoint/Star nebo i Peer-to-peer. Výhodou je poměrně snadné použití - není nutná další konfigurace. Vyrábí se různé verze podle provedení antény.



Obr. 1.5: RF modul XBee-Pro 868

Tab. 1.2: Srovnání parametrů RF modulů

	TI CC1020	RFM12B-868-S2P	RFM69HCW	RC1780HP-RC232
napájecí napětí	2,3 - 3,6 V	2,2 - 3,8 V	2.4V - 3.6V	2,8 - 3,8 V, 5 V
proudový odběr TX/RX	27,1/19,9mA	?/16 mA	?/16 mA	407/31,7 mA
frekvenční pásma	402-470 MHz, 804-960 MHz	433, 868, 915 MHz	433, 868, 915 MHz.	868 MHz
výstupní výkon	10dBm	5dBm	-18 až 20 dBm	až 27 dBm
citlivost přijímače	-118dBm	-110 dBm	-120 dBm	-118 dBm
komunikační rozhraní	4-Wire, SPI	SPI	SPI	UART
rychlost	153.6 Kb/s	115.2 Kb/s	300 Kb/s	100 Kb/s
provedení	SMD součástka	modul	modul	modul
cena	216 Kč	105 Kč	150 Kč	

	Si4455	TR-868-21A	XTR-7020 A8	xBee-Pro 868
napájecí napětí	1.8 V - 3.6 V	3 - 5,3 V	2,7 - 3,6 V	3 - 3,6 V
proudový odběr TX/RX	18/10 mA	12,49/3,95 mA	31/26 mA	500/65 mA
frekvenční pásma	283 - 960 MHz	868.35 MHz	433, 868 Mhz	868 MHz
výstupní výkon	13 bBm	1.5 dBm	-8 až 10dBm	0 až 25dBm
citlivost přijímače	-116 dBm	-95 dBm	-100dBm	-112 dBm
komunikační rozhraní	SPI	SPI/I2C	UART/TTL RS232	USART
rychlost	500 Kb/s	13 Kb/s	115.2 Kb/s	230.4 Kb/s
provedení	SMD	modul	modul	modul
cena	49 Kč		800 Kč	1 888 Kč

Ceny přepočítány podle kurzu ČNB ke dni ~~1620~~ 7.2.2015: 1€ = 27,1 Kč

1.3.2 Volba vhodného typu

Při výběru řešení bezdrátové komunikace byly kladeny především požadavky na vysílací výkon a s ním spojený dosah vysílače, také citlivost přijímače. Podpora frekvenčních pásem mimo 868 Mhz je nedůležitá, protože se nepředpokládá nutnost

přechodu mezi pásmy. Proudový odběr také pro tento projekt není kritickým parametrem, protože jednotlivé komunikující prvky nebudou napájeny z baterií, ale z adaptérů síťového napětí.

Na druhou stranu důležitá je spolehlivost datového přenosu, náročnost implementace do konkrétní aplikace a v neposlední řadě také dostupnost vývojových nástrojů pro daný typ RF modulu. Z Ústavu automatizace FEKT VUT v Brně byly poskytnuty moduly xBee-PRO 868, které vyhovují výše zmíněným požadavkům. Nesporná výhoda je možnost použití vývojových kitů dodávaných pro vývoj aplikací s těmito moduly umožňující jejich konfiguraci a testování. Firma Digi k těmto výrobkům dodává software XCTU, který je zdarma. V projektu jsou použity typy modulů s osazeným konektorem RPSMA (viz Obr. 1.5) a připojenou dipolovou anténou, která zvyšuje reálný dosah přenosu. Teoretický dosah ve vnitřních prostorách je 550 m

2 MĚŘENÍ KVALITY VZDUCHU

Obecný pojem kvalita vzduchu lze chápat různě. Nejčastěji měřeným parametrem, který lidé subjektivně vnímají je teplota vzduchu. Dále jsou to vlhkost, prašnost, přítomnost plynů způsobujících zápach (oxid uhličitý, různé formy dusíku, sirovodík) či vůni a především koncentrace znečišťujících plynů.

Speciálně v interiérech budov se za účelem regulace klimatizace a další vzduchotechniky v drtivé většině sleduje především teplota a vlhkost. Pro vylepšení se běžně používá měření koncentrace nežádoucích plynů, jejichž zvýšení snižuje obsah kyslíku ve vzduchu. Dají se rozdělit dvou skupin senzorů: čidla oxidu uhličitého a čidla směsných plynů (VOC – volatile organic compounds). Z bezpečnostních důvodů se pak u prostorů s možnou zátěží produkty spalování používají čidla oxidu uhelnatého.

2.1 Měření teploty

Pomineme-li běžné rtuťové a bimetalové teploměry, pro měření jsou využívány následující principy [3][4]:

Kovové odporové snímače

Kovový odporový teploměr je založen na změně elektrického odporu kovů v závislosti na teplotě. Výhodou těchto teploměrů je linearita v širokém rozsahu teplot a jednoduché vyhodnocovací zařízení. Nejčastěji se používá platinový teploměr, který je vhodný pro teplotní rozsah od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+850\text{ }^{\circ}\text{C}$ a měří s velmi vysokou přesností. V užším rozsahu (0 až $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) lze závislost odporu vyjádřit polynomem prvního 1. řádu:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha T) [\Omega] \quad (2.1)$$

kde $R_0 [\Omega]$ odpor senzoru při teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

$\alpha [K^{-1}]$ teplotní součinitel odporu daného materiálu

$T [^{\circ}\text{C}]$ teplota senzoru

Mimo platinu se používají materiály jako nikl, měď, molybden. Pro potlačení

nežádoucí chyby způsobené odporem přípojných vodičů se používá třívodičové nebo čtyřvodičové zapojení.

Polovodičové odporové snímače

Podobně jako kovové teploměry i polovodičové senzory teploty využívají závislost odporu polovodiče na teplotě. Termistory lze rozdělit na dvě skupiny: PTC (s kladným teplotním součinitelem odporu) a NTC (se záporným). Závislost odporu na teplotě u NTC senzoru lze popsat rovnicí:

$$R_t = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} [\Omega] \quad (2.2)$$

kde $R_0 [\Omega]$ odpor termistoru při referenční teplotě

$B [K]$ teplotní konstanta termistoru

$T_0 [^\circ C]$ referenční teplota

Teplotní rozsahy NTC se pohybují od běžných $-50^\circ C$ do $150^\circ C$ až do extrémních teplot od $-278^\circ C$ do $1000^\circ C$. Termistory NTC jsou oproti platinovým sensorům menší, levnější a mají řádově vyšší teplotní součinitel. Na druhou stranu jsou méně stabilní a mají značnou nelinearitu.[5]

Termočlánky

Termoelektrické senzory teploty jsou založeny na Seebeckovu jevu, který umožňuje převod tepelné energie na elektrickou. Termočlánek je spojení dvou různých vodičů s různými Seebeckovými koeficienty. Místo spojení A je na měřené teplotě T_A a odloučené konce spojených kovů jsou drženy na stejné referenční teplotě T_B . Mezi těmito spoji vzniká elektrické napětí dané vztahem:

$$U_{výst} = \alpha_{12} \cdot (T_A - T_B) [V] \quad (2.3)$$

kde $\alpha_{12} [VK^{-1}]$ termoelektrický koeficient

Tento koeficient dosahuje u kovových termočlánků řádově jednotky až desítky mikrovoltů na stupeň.

Bezkontaktní měření teploty

Bezdotykové měření teploty tělesa je založeno na měření elektromagnetického záření mezi tělesem a senzorem s vlnovou délkou od 400 nm do 25 μm , což odpovídá teplotnímu rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $10000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tělesa s různými barvami se liší emisivitou energie a hodnoty emisivity se pro různé vlnové délky mohou lišit. Hodnoty emisivity pro některé materiály jsou tabelovány. Bezkontaktní úhrnné radiační pyrometry pracují na principu měření intenzity tepelného záření v celém spektru vlnových délek. Intenzitu detekují pomocí tepelného IR čidla pracujícího většinou na principu termočláňkové baterie nebo pyroelektrického senzoru. T

2.2 Měření vlhkosti

Dilatační vlhkoměry

Měřicím principem je změna rozměru některých organických látek vlivem vlhkosti. Tyto látky absorbují vodu v závislosti na relativní vlhkosti okolního vzduchu a změnou obsahu vody dilatují. Dilatace se přenáší mechanismem na ukazatel.

Psychrometr

Psychrometr funguje na principu porovnávání teplot vzduchu na tzv. suchém a vlhkém teploměru. Tento psychrometr má tedy 2 teploměry, z nichž jeden měří teplotu vzduchu v okolí. Na druhý teploměr je navlečen vlhčený pásový knot a měří mezní adiabatické ochlazení. Tento teploměr se nazývá vlhký. Rozdíl teplot na suchém a vlhkém teploměru je psychrometrická diference, která je přímo úměrná relativní vlhkosti.

Optická metoda

Tímto přístrojem se zjišťuje tzv. rosný bod. Princip přístroje spočívá v detekování změny intenzity odraženého světla zrcátkem, které je ochlazováno. V momentě, kdy se na něm začne srážet voda ze vzdušné vlhkosti, přístroj toto detekuje a vypočítá se relativní vlhkost.

Kapacitní princip

Kapacitní čidla pracují na principu hygroskopické vlastnosti polymeru, který je ve

funkci elektrolytu mezi kontakty kondenzátoru. Polymer nanesený mezi elektrodami má přístup ke vzduchu, jehož vlhkost měříme, a v závislosti na relativní vlhkosti plynu vodu ze vzduchu absorbuje. Polymer pak z absorpcí vody mění své vlastnosti, čímž se mění i kapacita kondenzátoru. Měřená kapacita je následně přepočítána na odpovídající hodnotu relativní vlhkosti. Tyto senzory se vyrábějí jako malé integrované obvody s unifikovaným nebo digitálním výstupem. Jejich odezva je řádově v desítkách sekund, pracují v přesnosti v jednotkách procent relativní vlhkosti, mají malou závislost výstupního údaje na teplotě a jsou poměrně levné.[6]

Odporový princip

Odporové snímače vlhkosti pracují na principu měření změny impedance. Vodivost mnoha nekovových materiálů závisí na jejich obsahu absorbované vody. Tato závislost je zpravidla exponenciální. Vhodné materiály jsou většinou vodivé polymery a soli. Konstrukce snímače je provedena na křemíkové destičce s dvěma plochými elektrodami ze zlata a hliníku, které jsou ve styku s polymerem. Rozsah impedance se pohybuje mezi 1 k Ω a 1 M Ω .

Elektrolytický princip a další

Elektrolytické vlhkoměry vyhodnocují vzdušnou vlhkost okolního prostředí, která reaguje ve speciálním roztoku s elektrolyticky vylučovanou chemickou látkou. Pokud se vlhkost vzduchu zvýší, elektrolyt začne pohlcovat tuto vlhkost do sebe, a tím se zvětší jeho vodivost. Elektrický náboj prošlý senzorem v tomto uspořádání je úměrný absolutní vlhkosti vzduchu. Jelikož se elektrolyt průchodem proudu zahřívá, dá se vlhkost odvodit z jeho ustálené teploty. Tyto vlhkoměry se vyznačují zejména dlouhodobou stabilitou.

Mezi další principy, jak je možné získat vlhkost patří infračervená metoda, kde se využívá absorpce infračerveného záření v závislosti na obsahu vody v měrné látce (vzduchu), dále rezonanční metoda využívající změnu frekvence upraveného krystalového rezonátoru.

2.3 Měření koncentrace znečišťujících plynů

Čidla směsných plynů

Princip čidla směsných plynů HMOS (heated metal oxide semiconductor) je následující: na rozžhavené mřížce dochází k ionizaci plynů a pracovní oblast čidla mění svůj elektrický odpor. Ten se převádí na výstupní signál.

Senzor reaguje na organické plyny jako čpavek, metan, organická rozpouštědla atd. Pro kalibraci se používají směsi plynů od jednoduchých (např. CO, H₂S a metan, doplněné kyslíkem a dusíkem) po směsi obsahující až 65 složek (Linde Gas SPECTRA VOC). Čidlo není selektivní, měří se celková zátěž místnosti. Konkrétní koncentrace plynů v měřeném prostoru není tudíž známá, obdržíme pouze signál, který odpovídá míře znečištění vzduchu. Čidla VOC neměří koncentraci CO₂.

Čidla oxidu uhličitého

Čidla CO₂ pracují na principu NDIR (nondispersive infrared sensor) a dosahují výborné dlouhodobé stability $\pm 1\%$ rozsahu ročně. Používají se v místnostech, kde kromě osob nejsou další významné zdroje znečištění. Monitorování CO₂ má značný potenciál v regulaci vzduchotechniky a vytápění pro úspory energie ve velkých objektech i rodinných domech. Nejčastěji se koncentrace oxidu uhličitého vyjadřují v jednotkách ppm (parts per milion), někdy však také v mg/m³ nebo v procentech. Přepočet těchto jednotek je následující:

$$1000 \text{ ppm} = 1800 \text{ mg} / \text{m}^3 = 0,1\% \quad (2.4)$$

Rozsah měření běžných snímačů bývá 0 až 2 000 nebo 0 až 5 000 ppm CO₂, minimální dosažitelná koncentrace odpovídající čistému venkovnímu vzduchu bez znečištění je asi 300 ppm.

Čidla oxidu uhelnatého

Oxid uhelnatý je jedovatý plyn, který vzniká při nedokonalém spalování. Detektory využívají pro měření koncentrace plynu žhavené polovodičové čidlo, jehož aktivní látka mění svou vodivost při přítomnosti CO. Používají se především jako bezpečnostní požární senzory v domácnostech i ve veřejných prostorách. [7]

3 VÝBĚR KOMPONENT SYSTÉMU

3.1 Koncentrátor

3.1.1 Rapsberry Pi

Raspberry Pi [1] je velice univerzální jednodeskový počítač s deskou velikosti zhruba platební karty. Jeho základem je mikrokontroler BCM2835 firmy Broadcom, který obsahuje centrální procesor ARM1176JZF-S s taktem 700 MHz, grafický procesor VideoCore IV a až 512 MB RWM (RAM). Neobsahuje žádné rozhraní pro pevný disk nebo SSD. Pro zavedení systému a trvalé uchování dat je používána SD karta, pro kterou je na desce slot.



Obr. 3.1: Raspberry Pi model B

Toto kompaktní zařízení poskytuje relativně široké možnosti konektivity. Obsahuje rozhraní a konektory pro připojení video monitoru (HDMI), audio výstup (Jack 3,5), USB, podporu JTAG debugování, dále sběrnice UART, I2C, SPI a také vstupně/výstupní porty pro připojení jakékoli TTL logiky.

Tento minipočítač se vyrábí ve dvou základních verzích A a B, které se liší

především velikostí paměti RWM, počtem portů USB. Verze B má navíc síťový adaptér s konektorem RJ45. Mimo tyto základní verze jsou k dispozici také verze A+ a B+, nabízejí více vstupně/výstupních pinů, USB portů, menší rozměry apod. Od února 2015 je na trhu také druhá generace Raspberry Pi 2 model B, která oproti svému předchůdci nabízí výkonnější čip a 1GB paměti RAM.

Jako operační systémy jsou nabízeny především Raspbian (Debian Linux pro Raspberry), Arch Linux, Razdroid (Android pro Raspberry).

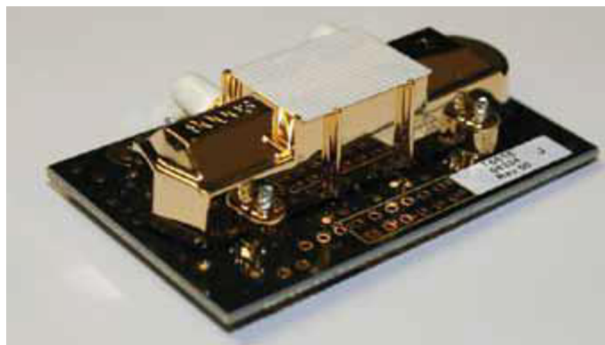
V tomto projektu byla použita verze Raspberry Pi model B.

3.2 Měřicí moduly

3.2.1 Snímač CO₂ Telaire T 6615

Pro měřicí moduly byl vybrán senzor Telaire T 6615 měřící koncentraci CO₂. Tento snímač funguje na principu NDIR, má dva měřicí kanály, přičemž jeden je použit pro vlastní měření koncentrace CO₂ ve vzduchu a druhý je referenční, měřící intenzitu signálu senzoru. Podle provedení má měřicí rozsah od 0 do 2000 ppm, 5000 ppm, 10000 ppm a 50000 ppm. Zde jsou jeho význačné parametry:

- Přesnost měření 75 ppm nebo 10% z údaje
- Rozběhový čas méně než 2 minuty, 10 minut pro nejvyšší přesnost
- Měření každé 4 sekundy
- Analogový výstup 0 až 4 VDC
- Digitální výstup UART, některé typy také I²C
- Napájení 5 VDC



Obr. 3.2: Telaire T 6615

Prakticky totožný typ snímače Telaire T 6613 navíc používá patentovanou ABC logiku pro automatickou kalibraci.

3.2.2 Mikrokontrolér

Mikrokontrolérů pro aplikace, jako je tato existuje na trhu celá řada. Především jsou to 8-bitové mikrokontroléry typu i8081, PIC, AVR, HCS12 a 32-bitové ARM a AVR. Tyto typy využívají odlišné soubory instrukcí. Mikrokontroléry se liší také použitými obvody které jsou obsaženy na čipu mikrokontroleru. Je to například velikost paměti SDRAM, FLASH a EEPROM. Dále počtem čítačů/časovačů a jejich rozlišením, počtem portů. Většinou hardwarově implementují několik komunikačních rozhraní jako USART, I2C, USB apod., dále A/D převodníky, časovače, RTC a spousty dalších podpůrných obvodů.

Při výběru mikrokontroleru pro tento přípravek byly zásadní tyto požadavky:

- Implementace rozhraní I²C (komunikace se senzory)
- Implementace USART (bezdrátová komunikace prostřednictvím xBee Pro)
- Možnost komunikace s PC
- Snadné programování v aplikaci
- Dostatečně velká paměť programu a výpočetní výkon
- Malé rozměry pouzdra

Z mnoha různých používaných typů mikroprocesorů je architektura ARM velice rozšířená a má veliký potenciál. Mikrokontroléry firmy STMicroelectronics založené na jádru ARM představují velice univerzální a cenově dostupnou variantu pro embedded

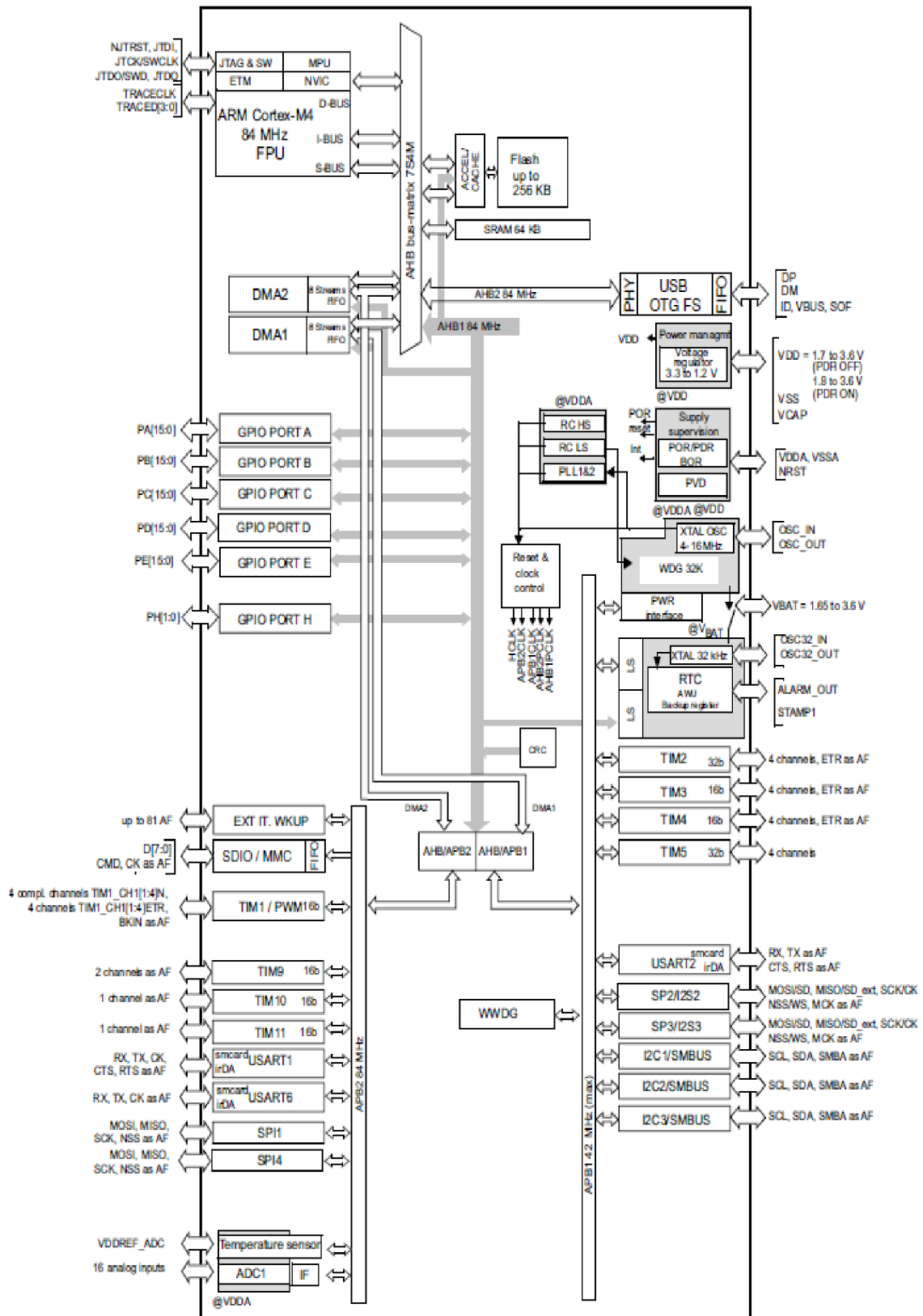
aplikace, jako je právě případ tohoto projektu.

Mikrokontroler STM32F401RC

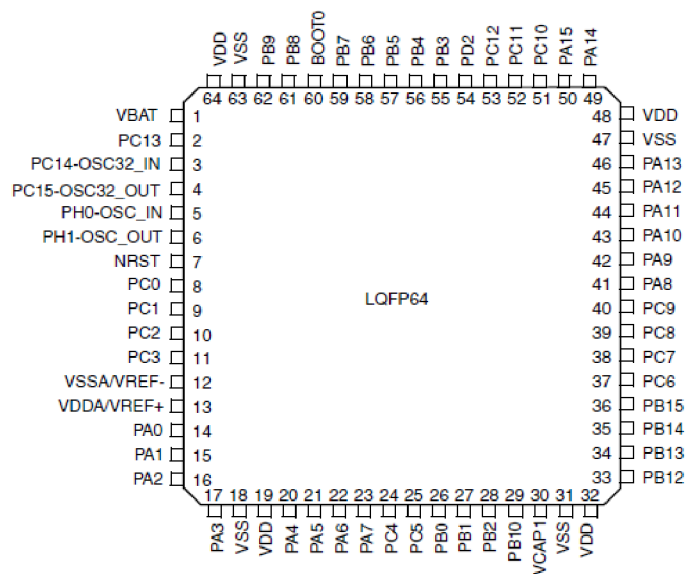
Jedním ze mnoha zástupců architektury ARM je mikrokontroler STM32F401RC [4]. Tento mikroprocesor byl pro realizovaný přípravek zvolen především pro jeho výpočetní výkon, což do budoucna umožní implementovat i velice složité algoritmy, dále pak dostupnost a rozšířenost platformy dané rodiny mikroprocesorů. Vyhovuje také ostatním požadavkům (velikost Flash paměti, hardwarová implementace rozhraní I²C, USART, USB, SWD programování a debugování). Zde je uveden výčet jeho důležitých parametrů:

- 32-bitové jádro ARM Coretex M4
- Napájecí napětí 1,7 až 3,6 V
- Hodinový kmitočet až 84MHz
- Výpočetní výkon až 105 DMIPS
- 256KB Flash paměti programu
- 64KB datové paměti SRAM
- Dva 32-bitové časovače/čítače, další 16-bitové
- 12-bitový A/D převodník, až 16 kanálů
- Jednotky USART, SPI, TWI (I²C), SDIO, USB – device/host/OTG
- SWD a JTAG programování a debugování

Blokové schéma vnitřní struktury tohoto mikrokontroleru je na Obr. 3.3. Jako diskretní součástka se vyrábí v několika provedeních podle typu pouzdra (LQFP64 viz Obr. 3.4).



Obr. 3.3: Blokový diagram mikrokontroléru STM32F401 (převzato z [11])

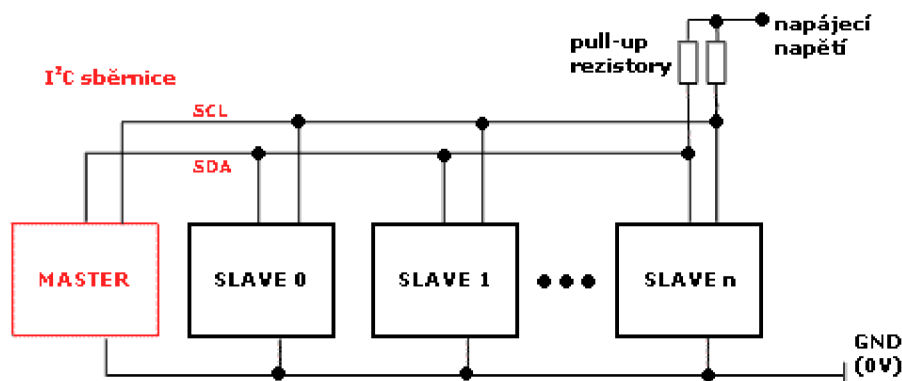


Obr. 3.4: STM32F401 - zapojení vývodů pouzdra LQFP64 (převzato z [11])

3.3 Využívaná komunikační rozhraní

3.3.1 Sběrnice I²C

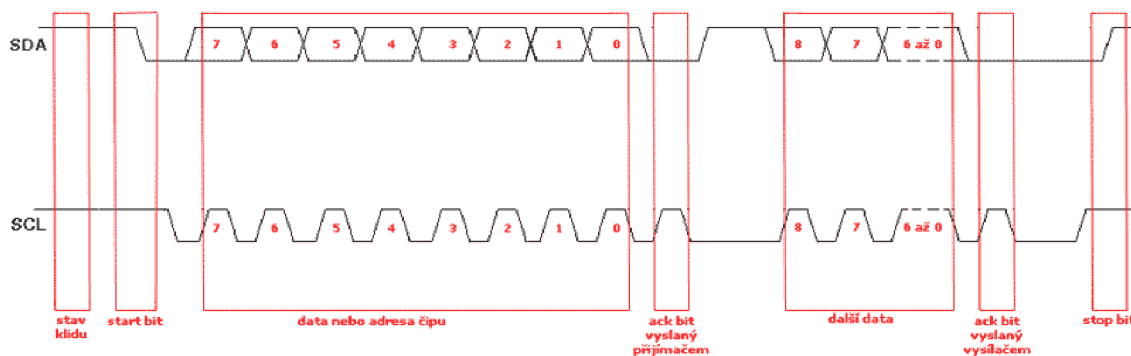
I²C (Inter-Integrated Circuit) [8][9], někdy také označováno TWI (Two Wire Interface), je sériová sběrnice pro komunikaci mezi na ni připojenými zařízeními. Připojení na tuto sběrnici podporuje spousta integrovaných obvodů: RAM a EEPROM paměti, budiče displejů, D/A převodníky a další speciální obvody pro audio a video techniku. Je fyzicky realizovaná dvěma vodiči: datový SDA a hodinový SCL. Na jednu sběrnici je možné připojit až 128, případně 1024 zařízení, podle toho, jestli je použito adres o délce 7 bitů nebo 10 bitů. Každé z připojených zařízení musí mít individuální adresu. Pokud jsou připojovány například dva integrované obvody s od výrobce nastavenou stejnou adresou, je třeba, umožňuje-li to, tuto adresu předem u jednoho z nich změnit. Ukázka zapojení sběrnice je na Obr. 3.5. Připojená zařízení se rozlišují na Master a Slave. Zařízení Master je většinou jen jedno, řídí komunikaci a generuje hodinový signál na SCL.



Obr. 3.5: Příklad připojení několika zařízení na sběrnici I²C (převzato z [9])

V klidovém stavu jsou zajištěny úrovně logické 1 připojenými pull-up rezistory. Každý přenos zahajuje Master vysláním start bitu úrovně 0 na SDA při SCL stále v úrovni 1. Se začátkem hodinových impulzů následuje vysílání sedmi nebo deseti bitů adresy příjemce spolu s R/W bitem, který indikuje požadovanou operaci - čtení/zápis dat. Další bit ACK vysílá přijímací zařízení. Úroveň 0 potvrzuje správný příjem a připravenost vysílat/přijímat data. Dále jsou po bajtech přenášena data ve směru

určeném bitem R/W. Úroveň na SDA se může změnit jen, pokud SCL v úrovni 0. Každý poslaný byte je ze strany přijímače potvrzován bitem ACK. Po ukončení přenosu je vyslán stop bit a oba vodiče uvedeny do klidového stavu. Časový průběh komunikace na sběrnici s adresami o délce 7 bitů ukazuje Obr. 3.6.



Obr. 3.6: Časový průběh logických úrovní sběrnice I2C (převzato z [9])

Frekvence signálu SCL je standardně 100 kHz, pro Fast Mode 400 kHz a High Speed Mode až 3.4MHz. Sběrnice I²C neumožňuje duplexní přenos, v jednom okamžiku vysílá jen jedno zařízení. Každá ze stanic může zahájit vysílání, je-li předtím sběrnice v klidovém stavu. Používá se metoda s detekcí kolize. Vysílač při vysílání kontroluje stav SDA a porovná s odeslanými bity. Je-li zjištěn rozdíl mezi očekávaným a skutečným stavem linky SDA, je indikována kolize.

V navrženém měřicím modulu po sběrnici I²C komunikuje řídicí mikrokontroler se snímači teploty, vlhkosti a CO₂.

3.3.2 Sériové rozhraní USART

USART (Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter) [10] je synchronní / asynchronní sériové rozhraní pro sériovou komunikaci, které lze nastavit buď pro asynchronní režim (SCI - např. pro linky RS232 resp. RS485), anebo pro synchronní režim (běžně označovaný jako SPI). USART vysílá data na pinu označovaném jako TXD (Transit Data), přijímá na pinu RXD (Receive Data). Jako jeden ze sériových I/O modulů je USART implementován ve spoustě mikrokontrolerů a integrovaných obvodů. Je určen ke komunikaci mezi dvěma zařízeními, odpadá tedy problematika adresování. Fyzicky se spojení realizuje propojením TXD pinu prvního

s RXD pinem druhého zařízení. V případě využití obousměrné komunikace je třeba spojit i RXD pin prvního s TXD pinem druhého zařízení.

Přenos dat probíhá po bajtech. Klidová úroveň signálu je log. 1. Vysílání je zahájeno start bitem - hodnotou signálu log. 0 po dobu jednoho bitu. Následně se posílají datové bity od nejnižšího po nejvyšší. Poté následuje stop bit, který má úroveň log. 1. Po odvysílání stop bitu může začít přenos dalšího bajtu.

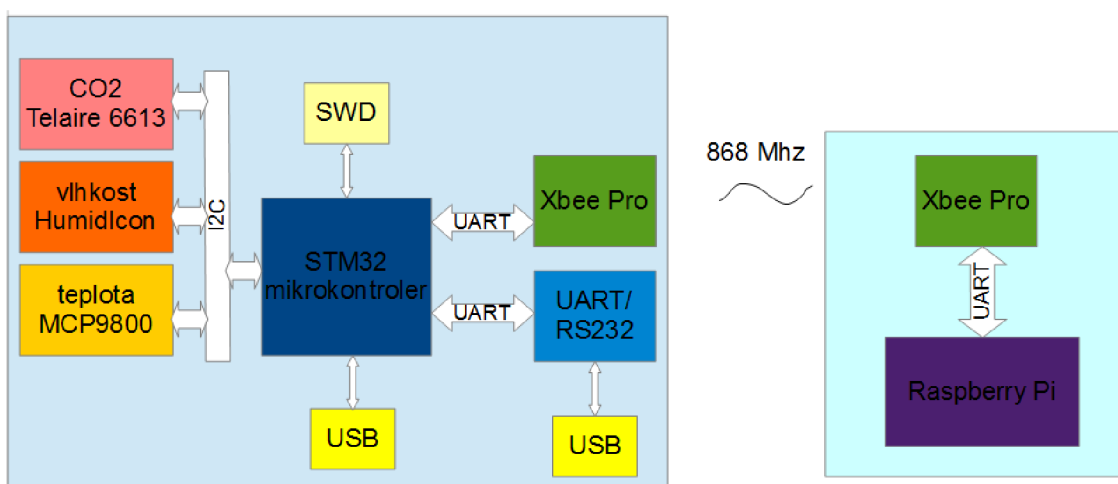
V navrženém měřicím modulu prostřednictvím rozhraní USART komunikuje řídicí mikrokontroler s bezdrátovým modulem xBee Pro a také s převodníkem na USB FT232R.

4 NÁVRH A REALIZACE

HARDWAROVÝCH KOMPONENT

SYSTÉMU

Blokové schéma na Obr. 4.1 zobrazuje koncepci použitého hardwaru a propojení jednotlivých součástí. Samotný koncentrátor je tvořen minipočítačem Raspberry Pi s jedním bezdrátovým komunikačním modulem XBee-Pro připojeným přes rozhraní UART. Tato centrální jednotka shromažďuje data ze sítě měřících modulů komunikujících na frekvenci 868 Mhz v topologii Point-to-Multipoint.



Obr. 4.1: Blokové schéma hardwaru

Samotné měřicí moduly jsou navrženy s ohledem na požadované měřené veličiny a finanční možnosti projektu. Výběr a rozbor snímačů žádaných veličin je v předchozí kapitole.

Jakýmsi srdcem měřících modulů je mikrokontroler STM32F401. Snímače požadovaných veličin jsou připojeny na I2C sběrnici a komunikují po ní s řídicím mikrokontrolerem, jsou nastavovány a odesílají naměřená data. Pro připojení programátoru a debugování aplikace je použito rozhraní SWD. Pro případnou komunikaci s PC či jinými zařízeními připojitelnými přes USB je využito rozhraní USB

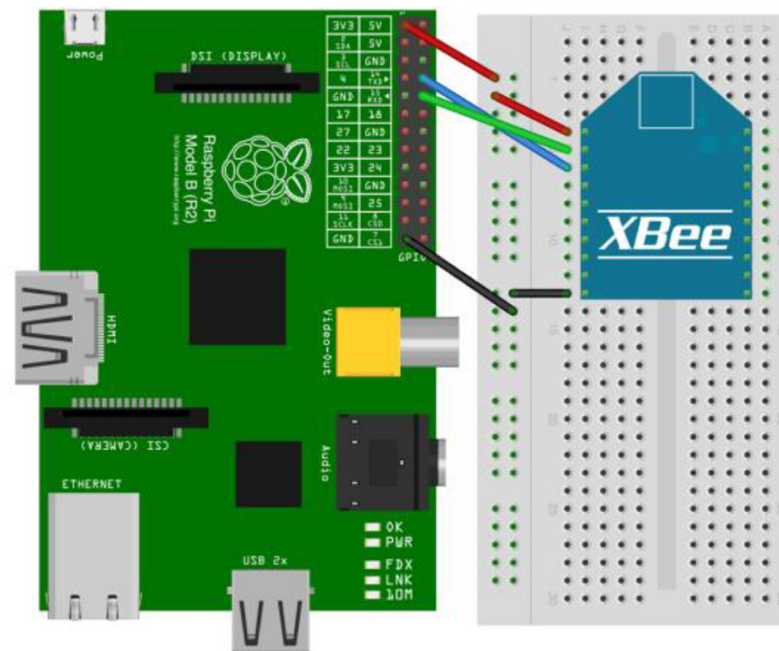
mikroprocesoru vyvedeného na jeden konektor typu mini USB. Jako alternativní možnost sériové komunikace je využito rozhraní USART mikrokontroleru a převodníku na rozhraní USB, připojeného k druhému mini USB konektoru. Toto řešení je jednoduché na implementaci a dostatečně efektivní (rychlost datového přenosu). Funkci kompaktního modulu převodníku obstarává integrovaný obvod FT232RL. Připojuje se přímo k USB portu počítače. S nainstalovanými FTDI ovladači se jeví jako virtuální hardware sériového portu COM.

Programové řízení každého modulu a veškerou komunikaci bude zajišťovat mikrokontroler STM. Napájení je třeba dimenzovat s ohledem na proudovou náročnost použitých komponent.

4.1 Koncentrátor

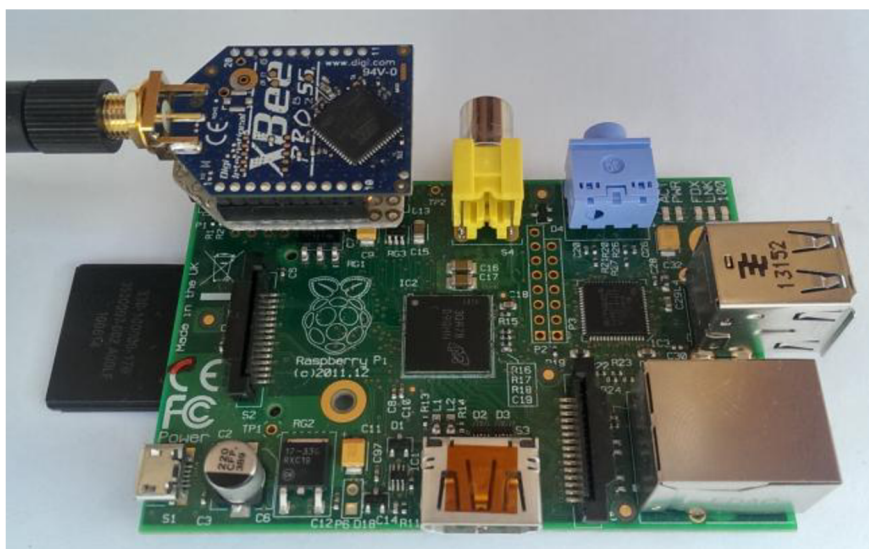
Jak vyplývá ze zadání, jako centrální jednotka systému je požít jednodeskový minipočítač Raspberry Pi, v daném případě model B. Aby byl schopen komunikovat s bezdrátovými moduly, je třeba připojit jej k jednomu z komunikačních modulů xBee Pro.

Toto lze realizovat poměrně jednoduše s využitím řady vstupně výstupních pinů, které Raspberry Pi nabízí. Jsou zde vyvedeny i vodiče GND a napájení 5 V a 3,3 V. Byla k tomu použita univerzální DPS, osazena patičkami pro nasazení na řady pinů. Modul xBee využívá stabilizované napětí z desky Raspberry Pi. Pro pokrytí odběrových špiček při vysílání byly na 3,3 V proti GND připojeny elektrolytický kondenzátor 22uF a blokovací kondenzátor 100nF. Další dva vodiče propojují sériová rozhraní UART obou zařízení. Principiální schéma zapojení je Obr. 4.2.



Obr. 4.2: Propojení Raspberry Pi a xBee (převzato z [14])

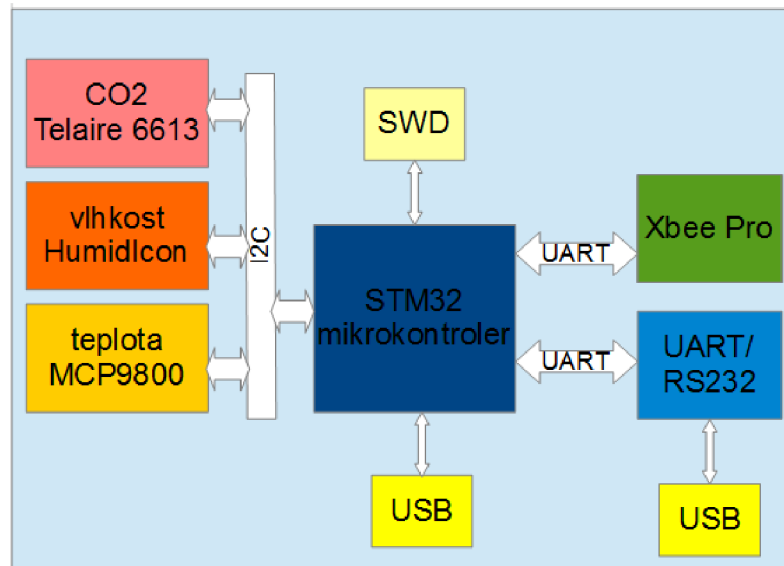
Fotografie výsledné sestavy zařízení je na Obr. 4.3.



Obr. 4.3: HW koncentrátoru

4.2 Měřicí moduly - Elektrické schéma a DPS

Jednotlivé komponenty, které byly vybrány v předchozí kapitole, a jejich vzájemné propojení zobrazuje blokové schéma na Obr. 4.4. Z blokového schématu se vycházelo při tvorbě schématu elektrického zapojení měřicích modulů.



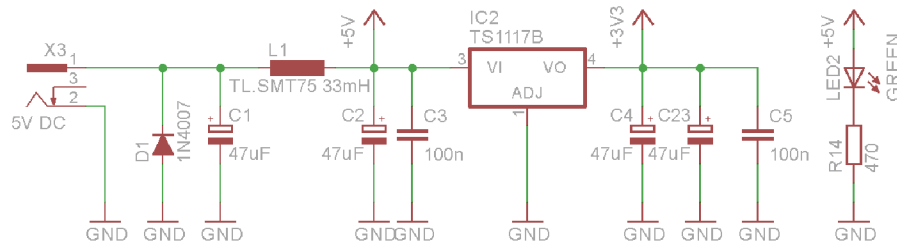
Obr. 4.4: Blokové schéma měřicího modulu

4.2.1 Napájecí část

Všechny části vyžadují napájení stabilizovaným stejnosměrným napětím 5 V nebo 3,3 V. Napájení je řešeno externím síťovým adaptérem s výstupním napětím 5 V, připojitelným buďto souosým konektorem 2,1 mm (konektor X3) nebo konektorem mini-USB (X1, X2). V případě souosého konektoru je napětí 5V vedeno přes tlumivku (L1) pro potlačení případného rušení. Pro ochranu proti přepólování je zapojena dioda (D1) v závěrném směru. Podle souhrnného maximálního odběru všech součástí je vhodný adaptér takový, který je schopný dodávat 1A/5V.

Napětí 3,3 V zajišťuje napěťový stabilizátor (IC2) s nízkým úbytkem napětí. Elektrolytické kondenzátory (C1, C2, C4) napomáhají stabilizovat napětí a vyrovnávat odběrové špičky. Podle datasheetu napěťového stabilizátoru je minimální doporučená hodnota 10 μF . Zvoleny byly 47 μF . Na vstup i výstup jsou přidány ještě blokovací keramické kondenzátory (C3, C5). Kondenzátor C23 je možné osadit v případě

nutnosti. Zelená LED dioda signalizuje přítomnost napájecího napětí 5V.



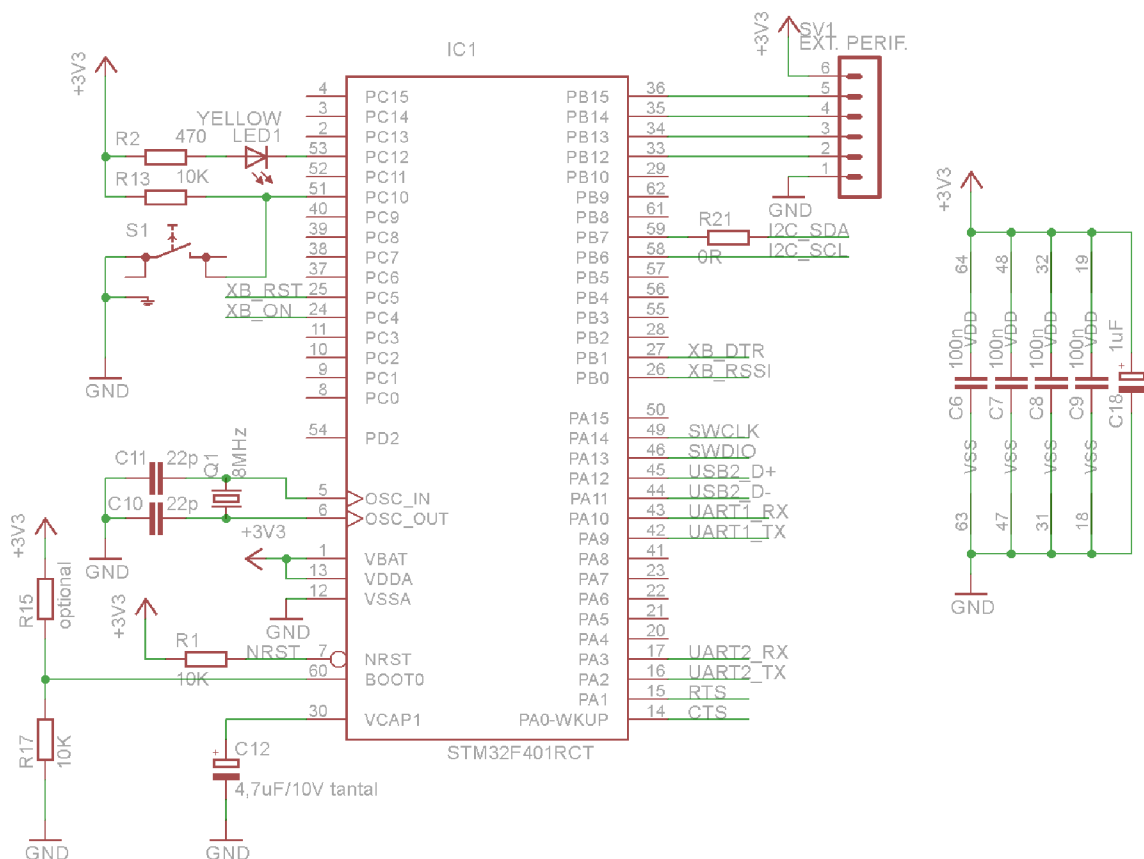
Obr. 4.5: Napájecí část

4.2.2 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér STM32F401RCT je napájen z 3,3 V, zapojení napájení, oscilátoru s krystalem referenčních napětí je provedeno podle doporučení v datasheetu [53]. Pro indikaci různých stavů programu je zapojena žlutá LED dioda. Pro uživatelskou interakci slouží tlačítko jehož stisknutím/uvolněním se na vstupu PC10 generuje hladina 0/3,3 V. Vodiče SWCLK, SWDIO, NRST jsou vyvedeny na konektor SWD pro připojení programátoru. Vstup NRST je připojen přes pull-up rezistor na 3,3 V pro zajištění normálního chodu. Volbou rezistorů R15, R17 lze volit napěťovou úroveň na vstupu BOOT a tím zvolit paměť ze které se po resetu začne vykonávat program. Typicky je to hlavní paměť Flash (BOOT=0). Osadí se tedy jen R17.

Dále jsou vyvedeny vodiče pro sběrnice I²C (komunikace se snímači), UART1 (sériová komunikace s PC skrze obvod FTDI232), UART2 (sériová komunikace skrze rádiový modul xBee). Další vodiče s prefixem XB_ jsou přivedeny na příslušné piny radiomodulu xBee a mohou být využity k jeho nastavení a kontrole.

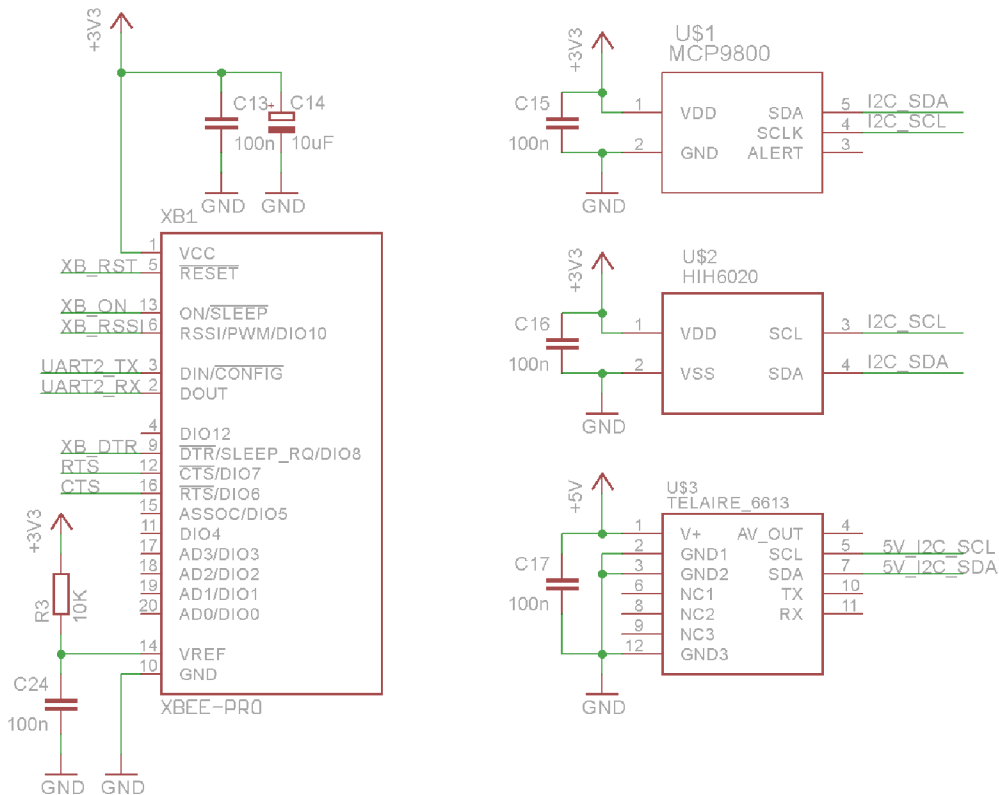
Konektor SV1 je pro případ nutnosti rozšíření obvodu, přidání snímačů apod.



Obr. 4.6: Zapojení mikrokontroleru

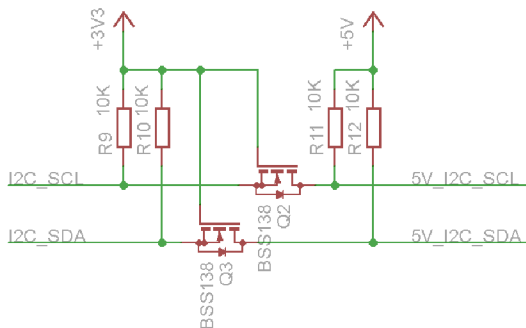
4.2.3 Modul xBee a snímače

Jak již bylo uvedeno, modul xBee je připojen k mikrokontroléru přes sériové rozhraní UART (vodiče Rx, Tx, CTS, RTS) a také další vodiče pro nastavení či detekci stavu *sleep* apod. Kvůli zvýšenému proudovému odběru tohoto modulu v momentě vysílání (při vysílacím výkonu 300mW až 800mA) je přidán kondenzátor C14. Referenční vstup A/D převodníku V_{ref} je připojen na 3,3 V přes pull-up rezistor R3.

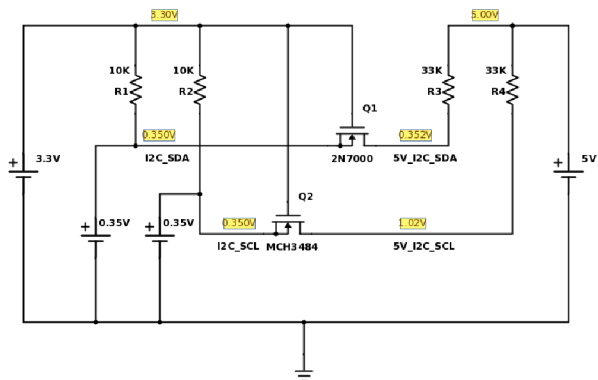


Obr. 4.7: Zapojení xBee a snímačů

Všechny snímače jsou připojeny na příslušné napájecí napětí, s blokovacími keramickými kondenzátory, a na sběrnici I²C. Ta je fyzicky realizována vodiči SDA a SCL. Snímač CO₂ je však napájen z 5 V, na rozdíl od ostatních obvodů pracujících s úrovní 3,3 V. Bylo tedy třeba rozdělit sběrnici I²C na 5 V část a 3,3 V část. toto je zajištěno zapojením MOSFET tranzistorů a příslušných pull-up rezistorů.



Obr. 4.8: Napěťový převod I²C

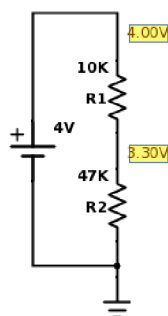


Obr. 4.9: Napěťový převod I²C - simulace

Hradla tranzistorů se stanou aktivní jestliže je kterákoliv strana signálových vodičů přitažena k zemi. Pokud se tak nestane, pull-up rezistory udržují na vodičích sběrnice úroveň log. 1 (3,3 V a 5V). Jak ukazuje Obr. 4.9, ne každý MOSFET tranzistor je pro toto použití vhodný. Důležitým parametrem je nízké U_{ds} . Zvoleny byly tranzistory BSS138. Rezistory s jmenovitou hodnotou odporu 10 K Ω byly zvoleny na základě simulace. Jelikož zařízení připojená na sběrnici mají vysokou vstupní impedanci, proud nepřekročí jednotky miliampér.

Poznámka o snímači Telaire T6615

Zde je nutné uvést drobné změny v zapojení, které bylo třeba podstoupit. Většina internetových zdrojů včetně obchodu, ze kterého byl snímač CO₂ Telaire T6615 zakoupen, uvádí ve specifikaci snímače podporu komunikace skrze sběrnici I²C. Avšak podle nové specifikace výrobce tato funkčnost není podporována. Muselo proto být přistoupeno k náhradnímu řešení, a to připojení analogového výstupu snímače na vstup jednoho z kanálů AD převodníku mikrokontroleru. Protože analogový výstup snímače dává napětí v rozsahu 0 až 4 V, je potřeba toto napětí snížit na napětí bezpečné pro mikrokontrolér, tedy maximálně 3,3 V. Toho je dosaženo jednoduchým odporovým děličem, jak ukazuje Obr. 4.10



Obr. 4.10: Odporový dělič pro AD převod

Výstup děliče pro AD převodník mikrokontroléru je při maximálním výstupu snímače 4 V dán vstahem:

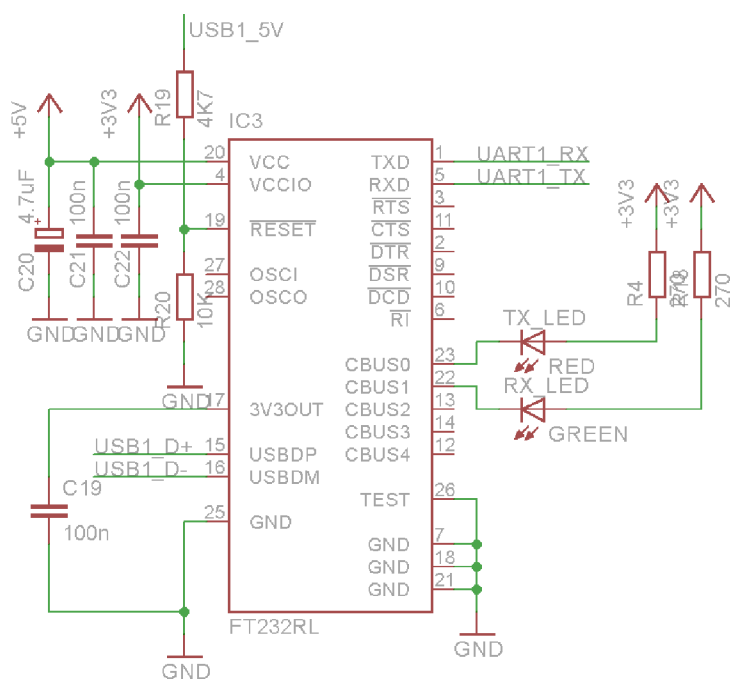
$$U_{výst} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \cdot U_{vst} = \frac{47 \cdot 10^3}{47 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3} \cdot 4 = 3,3[V] \quad (4.1)$$

Tato úprava není zanesena v elektrickém schématu ani na předlohách desky

plošných spojů. Ty jsou navrženy pro původní typ snímače se sběrnicí I²C. Jak je uvedeno níže v kapitole 3.1, softwarové funkce jsou připraveny pro použití obou typů.

4.2.4 Obvod FTDI232

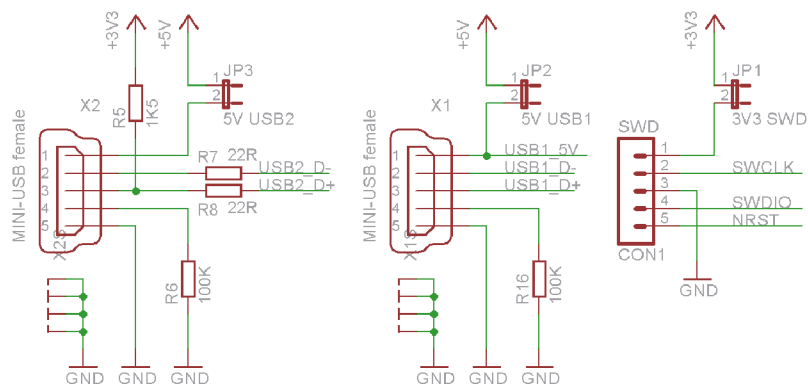
Integrovaný obvod FTDI232RL je připojen k mikrokontroleru přes sériové rozhraní UART a na druhou stranu ke konektoru mini USB (X1). Po připojení k PC s nainstalovanými FTDI ovladači se jeví jako virtuální hardware sériového portu COM. Z hlediska software na PC se tedy ke komunikaci skrze tento převodník přistupuje jako při běžné komunikaci po sériovém portu. Napájení a kondenzátory jsou zapojeny dle doporučení v datasheetu součástky.



Obr. 4.11: Zapojení obvodu FTDI232

4.2.5 Konektory

Jak už bylo zmíněno výše, přímo k datovým vodičům USB_data+ a USB_data- konektoru X2 je připojen mikrokontrolér pro možnost funkce v režimu USB-OTG. Toto je druhá varianta k připojení prostřednictvím obvodu FTDI232. Ten je připojen na konektor X1.



Obr. 4.12: Zapojení konektorů USB a SWD

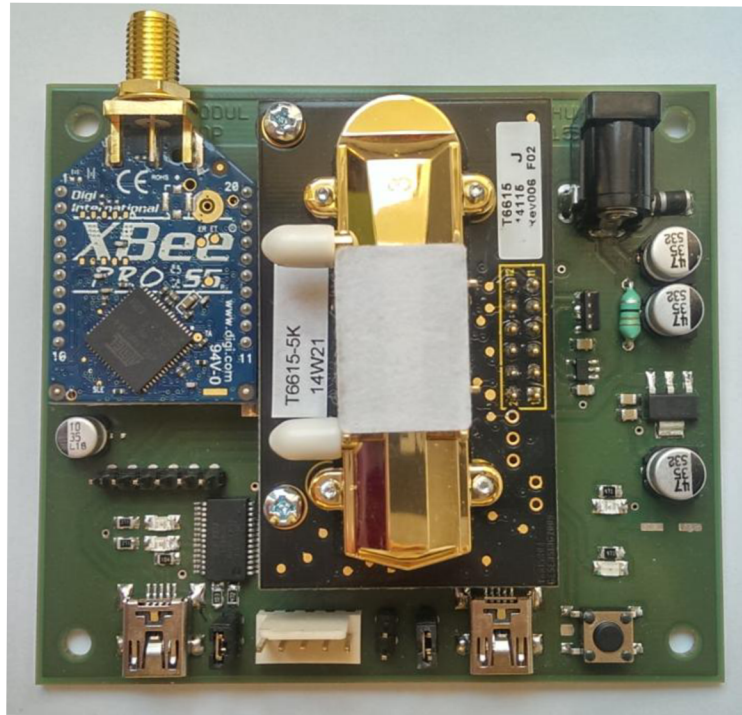
Piny konektoru SWD (CON1) pro připojení programátoru jsou zapojeny ve stejném pořadí, jako je běžné u STM32 Discovery kitů a programátorů ST-Link v2. U konektorů USB a konektoru programátoru SWD je možno propojením jumperů zvolit společné napájení. Toto musí být prováděno opatrně tak, aby nebyl poškozen např. USB port připojeného počítače.

Pro návrh DPS byl použit software Eage 7.1.0. Pro všechny tři použité snímače bylo nutné vytvořit knihovny součástek. Vycházelo se při tom z příslušných dokumentací. Soubory knihoven jsou součástí elektronické přílohy tohoto dokumentu. Kompletní schéma zapojení je obsahem přílohy A.1.

Při návrhu desky plošných spojů byl kladen důraz na vhodné rozmístění komponent z hlediska proudění vzduchu a možného rušení. Dále také na dostatečnou šířku napájecích cest především pro modul XBee-Pro, který má maximální definovaný odběr při vysílání až 800 mA.

Předlohy desky plošných spojů a osazovací výkresy jsou obsahem příloh A.2, A.3, A.4, A.5.

Kompletní sestava modulu pro měření kvality vzduchu je na Obr. 4.13. Celkem byly vyrobeny tři kusy.

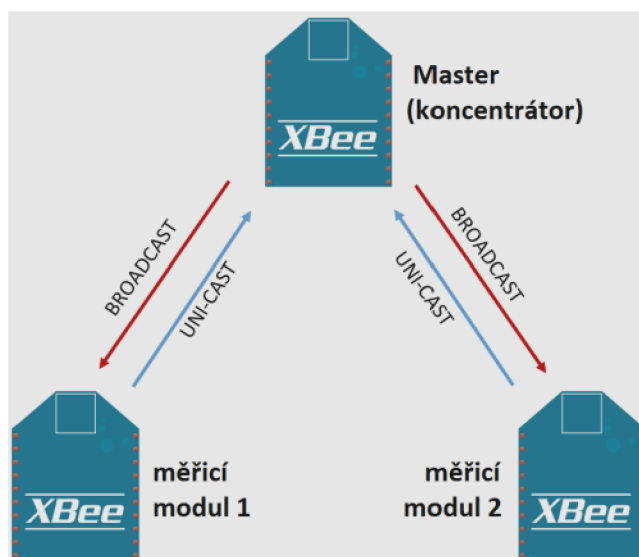


Obr. 4.13: Modul pro měření vzduchu

5 SOFTWAREVOVÉ ŘEŠENÍ

5.1 Nastavení xBee modulů

Bezdrátové moduly xBee Pro 868 použité v tomto projektu umožňují samostatně obsluhovat analogové snímače a data z nich rozesílat do vzdálených zařízení bez nutnosti řídit chod například mikrokontrolérem. V tomto projektu tato funkčnost není využita, moduly slouží jako náhrada propojení komponent fyzicky mezi sebou. Moduly mezi sebou mohou komunikovat v topologii sítě Peer-to-Peer nebo Point-to Multipoint (Obr. 5.1). Měřicí moduly mezi sebou nekomunikují, vyměňují si ale data s řídicími prvky – Raspberry Pi a případně s aplikací na PC.



Obr. 5.1: Topologie sítě Point to Multipoint

K nastavení funkcionality slouží software pro PC s názvem XCTU od výrobce Digi. Modul se připojí k PC prostřednictvím USB Development kitu. Každý modul má pevně danou 64-bitovou adresu, může být nastaven pro komunikaci s jediným zařízením volbou *Destination address*. Druhá volba je nastavení pro *Broadcast*, tedy vysílání do všech dostupných modulů v síti. Všechny moduly musejí mít nastaveno stejné *Modem VID*, což je identifikátor sítě. Moduly s jiným *VID* do komunikace nijak

nezasahují, třebaže užívají stejné přenosové frekvence a modulace.

Aby mohl měřicí moduly odpovídat na zprávy více než jednomu Master modulu, jsou nastaveny na vysílání v režimu broadcast. Veškerá komunikace je tedy posílána všem RF modulům, samotné adresování je řešeno na straně software mikrokontroleru a koncentrátoru.

Důležitým nastavitelným parametrem je výstupní vysílací výkon. Lze jej volit v hodnotách 1mW, 25mW, 100mW, 200mW, 300mW. Samozřejmě s vyšším výkonem roste proudový odběr ze zdroje napájení, ale lze dosáhnou veliké rozlehlosti bezdrátové sítě. U sítí malých rozměrů je však zvyšování výkonu kontraproduktivní. Pokud jsou moduly blízko sebe, odrazy el.mag. vln ruší přenos dat a ten je pak chybový. Za účelem optimální nastavení byly provedeny testy přenosu dat mezi dvěma snímači při různých výstupních výkonech. Sledován byl i vliv připojené či odpojené dipolové antény. První třetina časových průběhů je pro připojené antény, další třetina pro anténu připojenou k jednomu modulu a poslední pro moduly bez antén.

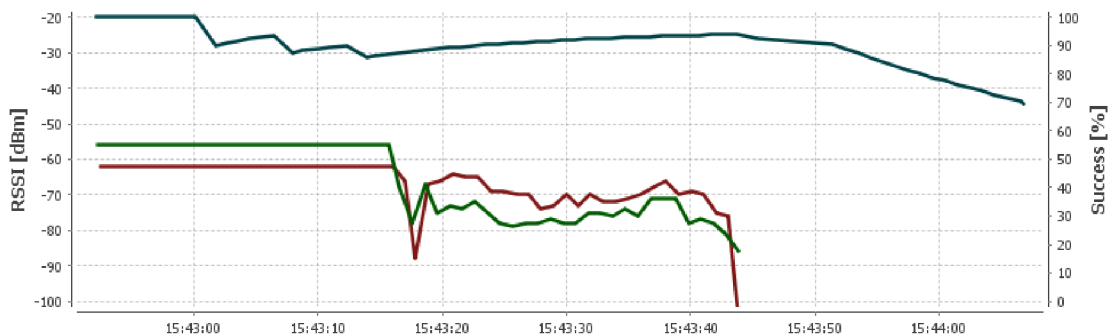
Modrá čára zobrazuje úspěšnost přenosu dat z jednoho modulu do druhého a zpět v procentech [%]

Zelená a fialová čára odpovídají hodnotám RSSI (Received Signal Strength Indication), což je indikátor síly přijatého signálu v jednotkách dBm, dáno vstahem:

$$RSSI = RSCP - \frac{E_c}{I_o} [dBm] \quad (5.1),$$

kde RSCP je výkon užitečného přijatého signálu,

E_c/I_o je poměr přijaté energie a energie přijatého šumu.



Obr. 5.2: Test přenosu dat 300mW, 3m

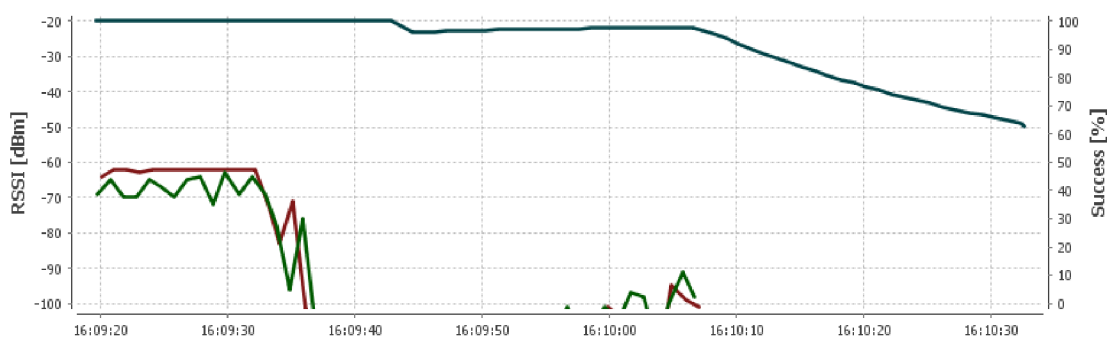
Graf na Obr. 5.2 zobrazuje test pro vysílací výkon 300mW, vzdálenost 3 m v místnosti cihlového domu. V prvním časovém úseku je vidět vliv odrazu vln a narušení přenosu, což se částečně zlepší při odpojení jedné antény (druhý úsek), bez druhé antény úspěšnost přenosu opět klesá.

V takových podmínkách vhodné zvolit nízký vysílací výkon a dosáhneme mnohem větší úspěšnosti přenosu, viz. Obr. 5.3.



Obr. 5.3: Test přenosu dat 1mW, 3m

Jako rozumný kompromis pro rozmístění modulů v cihlovém bytě se jeví hodnota vysílacího výkonu 100mW, viz. Obr. 5.4 – mezi moduly vzdálenost 8m a dvě cihlové zdi. Avšak vzhledem k regulaci hladiny vysílaného signálu podle Tab. 1.1 je nutné se spokojit s nastavením vysílacího výkonu na 25 mW.



Obr. 5.4: Test přenosu dat 100mW, 8m

Posledními parametry xBee modulů, které je třeba správně nastavit, se týkají nastavení sériové komunikace. Bylo použito toto nastavení:

- Baud Rate 9600
- parita žádná
- stop bity žádné
- hardwarová kontrola toku CTS ne
- hardwarová kontrola toku RTS ne

5.2 Komunikační protokol pro RF rozhraní

System se skládá z koncentrátoru, neurčeného počtu měřicích modulů a PC uživatelské stanice. Každé z těchto zařízení má dedikovaný RF modul. Všechny tyto moduly v rámci jedné VID sítě mohou mezi sebou navzájem komunikovat. Je třeba vyřešit adresování a vhodný formát vysílaných dat. Aby byla zajištěna bezkolizní a bezztrátová komunikace mezi, byl pro tuto aplikaci navržen specifický protokol. Každé zařízení má přidělen unikátní identifikátor ID, jímž se zařízení adresují. ID může nabývat hodnot od 0x00 do 0xFF. Přidělení ID zařízením ukazuje Tab. 5.1. V dané konfiguraci je možné využití maximálně 253 měřicích modulů pro jeden koncentrátor.

Tab. 5.1: Přidělená ID RF zařízení

ID	zařízení
0x00	<vyhrazeno>
0x01	Modul 1
...	...
0xFD	Modul 253
0xFE	PC aplikace
0xFF	Koncentrátor

Veškerá komunikace rozdělena do paketů, které mají pevně stanovenou délku, podle jeho typu. Každý paket obsahuje minimálně hlavičku o délce 4 B (viz Obr. 5.5) a jeden stop byte. Stop byte má konstantní hodnotu 0x00.

1B	1B	1B	1B
Délka paketu	ID destinace	ID zdroje	Typ zprávy

Obr. 5.5: Hlavička RF zprávy

Délka paketu určuje počet bytů posílaných v daném paketu. Pokud je posílána jen hlavička zprávy a stop byte, je délka paketu 5 B. Maximální délka paketu je 23 B. Tento údaj slouží k ověření, zda byl přijat celý paket, nebo nastala chyba příjmu.

ID destinace určuje zařízení, kterému je vysílaný paket určen.

ID zdroje určuje zařízení, které paket vysílá.

Typ zprávy určuje jakou informaci paket přenáší. Typy zpráv a jejich kódové hodnoty jsou shrnuty v Tab. 5.2 V závislosti na typu zprávy může po hlavičce paketu následovat ještě datová část.

Tab. 5.2: Typy RF zpráv a jejich kódy

Kód	Typ zprávy
0x80	MEASUREMENT REQUEST
0x81	MEASUREMENT RESPONSE
0x82	CALIBRATION REQUEST
0x83	CALIBRATION RESPONSE
0x84	NAME SET REQUEST
0x85	NAME SET RESPONSE
0x86	NAME READ REQUEST
0x87	NAME READ RESPONSE
...	<nevyužito>
0x90	GENERAL ERROR
0x91	MESSAGE ERROR

MEASUREMENT REQUEST

Tuto zprávu posílá koncentrátor měřicímu modulu. Je to požadavek o zaslání posledních měřených dat.

MEASUREMENT RESPONSE

Touto zprávou odpovídá měřicí modul na zprávu MEASUREMENT REQUEST. Po hlavičce paketu následuje datová část od délce 6 B. Obsahuje hodnoty měřených veličin teplota, vlhkost, CO₂ v následujícím formátu:

1B	1B	1B	1B	2B	
Teplota jednotky	Teplota setiny	Vlhkost jednotky	Vlhkost setiny	CO ₂ MSB	CO ₂ LSB

Obr. 5.6: RF zpráva MEASUREMENT REQUEST

CALIBRATION REQUEST

Tuto zprávu vysílá uživatelská aplikace na PC do měřicího modulu. Následuje datová část paketu s následujícím formátem:

1B	1B	2B
Veličina	Low/High	Hodnota

Obr. 5.7: Hlavička RF zprávy

Touto zprávou se nastavuje kalibrační bod modulu. Určená veličina je buďto teplota (0x01), vlhkost (0x02) nebo CO₂(0x03). Nízký / vysoký kalibrační bod je určen hodnotou Low / High (0x00 / 0x01). Referenční hodnota veličiny pro kalibraci je poslána dvěma byty ve stejném formátu jako je tomu u zprávy MEASUREMENT RESPONSE.

CALIBRATION RESPONSE

Toto je potvrzovací zpráva od měřicího modulu. Znamená, že kalibrace byla přijata.

5.3 Software měřicích modulů

Srdcem každého měřicího modulu je mikrokontrolér STM32F401RC. Jako vývojové prostředí bylo použito CoCoX CoIDE, které je bezplatné a nemá ani omezení na velikost kódu. Jako programátor byl používán ST-Link V2 integrovaný na STM32Discovery kitu, připojitelný s aplikací prostřednictvím SWD rozhraní, které umožňuje i debugování. Byly využity standardní knihovny vydané firmou STM. Toto velice ulehčuje proces vývoje aplikace, protože všechny adresy periférií, příslušných registrů jsou v daných hlavičkových souborech uvedeny, stejně tak přístupová makra a low-level funkce. Toto slouží jako stavební kameny při tvorbě funkčního programu. Byly napsány komunikační funkce pro UART a I²C sběrnice, obsluhu AD převodníku apod. Pro práci se senzory byly napsány dedikované funkce řešící konfiguraci, výčet dat, kalibraci. Většinou bylo vycházeno z dokumentace dané součástky či obecné specifikace rozhraní. Zde je uveden výčet těchto funkcí, které se volají v různých částech algoritmu.

```
void I2C_start(I2C_TypeDef* I2Cx, uint8_t address, uint8_t
direction);
void I2C_stop(I2C_TypeDef* I2Cx);
void I2C_write(I2C_TypeDef* I2Cx, uint8_t data);
uint8_t I2C_read_ack(I2C_TypeDef* I2Cx);
uint8_t I2C_read_nack(I2C_TypeDef* I2Cx);
void USART_message(USART_TypeDef* USARTx, uint8_t *values);
void USART_puts(USART_TypeDef* USARTx, volatile char *s);
void USART1_IRQHandler(void);
void USART2_IRQHandler(void);
void InitTempSens(uint8_t resolution);
float GetTemp(void);
float GetHum(void);
float GetTempH(void);
uint16_t GetCO2(void);
uint16_t GetCO2ADC(void);
float Temp1(void);
float Temp2(void);
uint16_t CO2Val(void);
void CalibTemp(uint8_t LoHi, float x);
void CalibHum(uint8_t LoHi, float x);
void CalibCO2(uint8_t LoHi, uint16_t x);
```

5.3.1 Obsluha senzorů

Snímač teploty

Mikrokontroler obsluhuje tento snímač po sběrnici I²C. Aby bylo možné během chodu

programu vyčítat měřená data z teplotního snímače, je třeba jej inicializovat funkcí `InitTempSens` s parametrem `resolution`, což je rozlišení, s jakým senzor bude zaznamenávat měřené výsledky. Nejvyšší možné rozlišení 12 bitů odpovídá přesnosti A/D převodu s přesností 0,0625°C. Vyšší rozlišení na druhou stranu znamená delší dobu převodu. Konkrétně pro 12 bitů je to 240 ms. Funkce `GetTemp` vyčte ze senzoru 16-bit registr na adrese 0x00 a podle rovnice z něj získá naměřenou hodnotu teploty.

$$Teplota = hodnota_registru \cdot 2^{-4} [^{\circ}C] \quad (5.2)$$

Funkce `Temp1` přepočítá teplotu podle kalibrační křivky. Kalibrační mechanismus bude vysvětlen níže.

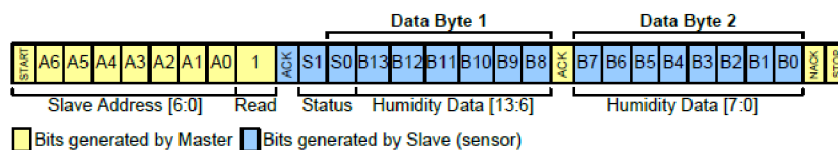
Snímač vlhkosti

Funkce `GetHum` adresováním snímače na sběrnici žádá o nové měření, následně vyčte 2 byty ze senzoru vlhkosti a po odmaskování statusu, který je obsahem dvou nejvyšších bitů rozhodne, zda vyčtená data jsou aktuální. Výsledná hodnota vlhkosti je vypočítána podle následující rovnice:

$$Vlhkost = \frac{hodnota_registru}{2^{14} - 2} \cdot 100 [\%] \quad (5.3)$$

Funkce `GetTempH` funguje obdobně, s tím rozdílem, že čte 4 byty a zjišťuje ze senzoru teplotu. Ta je vypočítána podle rovnice:

$$Teplota = \frac{hodnota_registru}{2^{14} - 2} \cdot 165 - 10 [^{\circ}C] \quad (5.4)$$



Obr. 5.8: Diagram čtení dat ze senzoru vlhkosti (převzato z [13])

Na Obr. 5.8 Diagram čtení dat ze senzoru vlhkosti je vidět posloupnost, jak probíhá komunikace na sběrnici I²C v průběhu výše popsané funkce `GetHum`. Žlutě jsou označeny zásahy master zařízení, tedy mikrokontroleru a modře zařízení slave. Zápis této funkce vypadá následovně:

```

float GetHum(void) {
    I2C_start(I2C1, I2C_HUM_ADDR<<1,
    I2C_Direction_Transmitter); // measurement request
    I2C_stop(I2C1);
    uint16_t data;
    do {
        I2C_start(I2C1, I2C_TEMP_ADDR<<1,
        I2C_Direction_Receiver); // start a transmission in
        Master receiver mode
        data = I2C_read_ack(I2C1) << 8; // read upper half
        byte and request another byte
        data |= (I2C_read_nack(I2C1)); // read lower half
        byte and don't request another byte, stop
        transmission
    } while((data & HUM_STATUS_MASK) != 0x0000); // check
    if fresh data was read
    float hum = (float)data *100 / 16382 ; // count the
    humidity value
    return hum;
}

```

Snímač CO2

Jak již bylo uvedeno v rozboru vlastností snímače, původně se počítalo s jeho komunikací na I²C, ale zakoupený typ toto nepodporoval. Nicméně funkce `GetCO2` na jeho obsluhu byla implementována. Funkce `GetCO2ADC` řeší čtení analogového výstupu CO2 senzoru:

```

uint16_t GetCO2ADC(void) {
    uint16_t ADCResult;
    ADC_SoftwareStartConv(ADC1);
    while(ADC_GetFlagStatus(ADC1, ADC_FLAG_EOC) == RESET);
    ADCResult= (float)ADC_GetConversionValue(ADC1) *
    CO2_RANGE/4095;
    // 12bit ADC max value 0xFFF = 4095d
    return ADCResult;
}

```

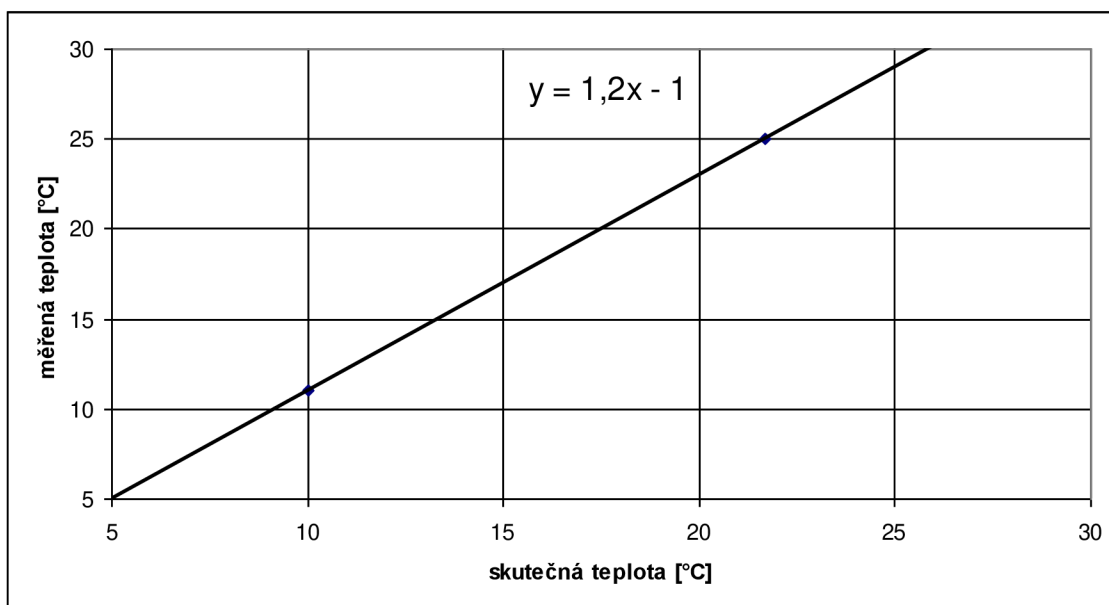
Analogový výstup snímače po snížení odporovým děličem dává napětí 0 až 3,3 V. pro rozsahu 0 až 5000 ppm. Výpočet hodnoty jednotek ppm vychází ze vztahu:

$$CO2 = \frac{\text{hodnota_registru} \cdot \text{rozsah}}{2^{12}} [ppm] \quad (5.5)$$

Bohužel pouze připojení na analogový výstup neumožňuje využívat pokročilejší funkce snímače a především manuální kalibraci, která je možná za použití referenčních plynů.

5.3.2 Dvoubodová kalibrace senzorů

Pro všechny tři parametry kvality vzduchu byl implementován mechanismus dvoubodové kalibrace. Spočívá v přepočtu hodnoty, která je čtena ze senzoru, na pozměněnou hodnotu podle kalibrační křivky. V tomto případě je křivka pouhá přímka. Low a High body se nastavují kalibračními zprávami poslanými do modulu. Na Obr. 5.9 je příklad pro kalibraci teploty.



Obr. 5.9: Kalibrační křivka teploty

Kalibrační křivka má tvar

$$y = k \cdot x + q \quad (5.6)$$

a její konstanty se vypočítají podle

$$k = \frac{Thigh(měř) - Tlow(měř)}{Thigh(real) - Tlow(real)} \quad (5.7)$$

$$q = Tlow(měř) - k \cdot Tlow(real) \quad (5.8)$$

Uvedený přepočet konstant je předmětem funkcí `CalibTemp`, `CalibHum` a `calibCO2`. Jak bude vysvětleno níže, pokud je kalibrace provedena správně, dosahuje se obecně přesnějších výsledků.

5.3.3 Algoritmus

Algoritmus byl psán s ohledem na vlastnosti připojených senzorů a na robustnost a stabilitu běhu. Na začátku běhu hlavního programu se provede prvotní inicializace všech používaných periférií (vstupně výstupní porty, komunikační periférie I²C a USART, A/D převodníku). Inicializuje se také teplotní snímač a nastaví se kalibrace na výchozí hodnoty, které vycházejí z kontrolních měření.

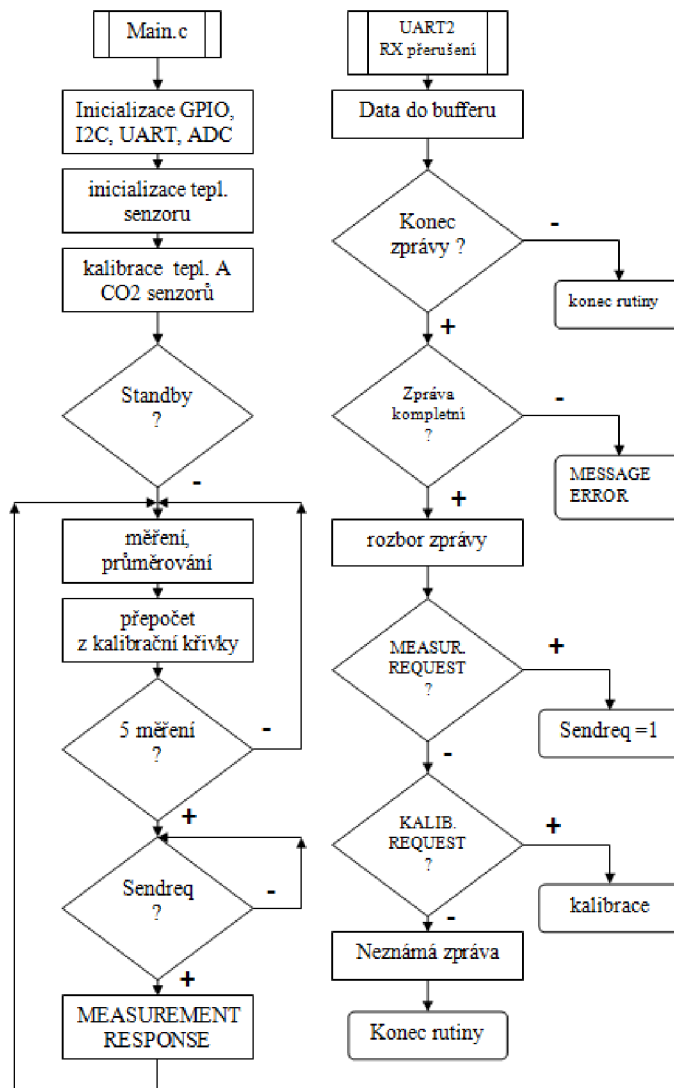
Program přejde do režimu *standby*, který je signalizován rychlým blikáním LED diody. Pokud po připojení napájení s modulem nekomunikuje žádné zařízení, setrvává v tomto stavu. Stiskem tlačítka nebo příkazem od koncentrátoru začne v pěti cyklech měřit hodnoty veličin. Každý cyklus trvá 9 sekund. Hodnoty jsou průměrovány a výsledek uchován. Tato část trvá 45 sekund. Následně se čeká na příjem paketu MEASUREMENT REQUEST od koncentrátoru. Toto se děje každou minutu a po odeslání MEASUREMENT RESPONSE se cyklus opakuje.

V rutině přerušení od periférie UART se ukládají přijatá data do bufferu a po každém přijatém bytu se vyhodnocuje, zda byl přijat celý paket. Pokud ano, paket se kontroluje proti možným chybám přenosu dat. V závislosti na typu přijaté zprávy se následně vykoná příslušná funkce a rutina se ukončí. Pokud byla přijata zpráva MEASUREMENT REQUEST, nastaví se flag `sendreq` na 1, což uvolní smyčku hlavního programu a odešle se MEASUREMENT RESPONSE.

Mimo zprávy podle specifikace v kapitole 5.2 je také možné posílat naměřená data jako formátovaný textový výpis délce o délce 23 ASCII znaků, přičemž číselné hodnoty jsou zarovnané na pevnou šířku a poslední je znak nového řádku `"\r"`. Zde je uveden příklad výpisu takové zprávy:

```
1 23.87 43.56 00891
```

První číslo je ID modulu, který zprávu odeslal, následuje hodnota teploty v [°C], dále vlhkost [%] a nakonec koncentrace CO₂ [ppm].



Obr. 5.10: Vývojový diagram 1

5.4 Software koncentrátoru

Koncentrátor představuje minipočítač Raspberry Pi typ B. Z paměťové karty flash je zaváděn operační systém založeném na jádře Linux. Nejběžnější je OS Raspbian, který byl v tomto případě taktéž použit. K Raspberry Pi je možné se připojit vzdáleným přístupem přes lokální síť. Stačí jej zapojit do routeru síťovým kabelem. Na přidělenou adresu je možné se připojit s tzv. SSH protokolem například s aplikací PuTTY.

Pro přístup k rozhraní UART – sériovému portu, je potřeba zakázat Linuxovou tty seriovou konzoli. Je třeba zeditovat dva soubory s systému, a to následovně:

1. vymazat

```
"console=ttyAMA0,115200 kgdboc=ttyAMA0,115200"
```

ze souboru `/boot/cmdline.txt`

2. připsat "#" před

```
"T0:23:respawn:/sbin/getty -L ttyAMA0 115200 vt100"
```

v souboru `/etc/inittab`

3. nakonec restartovat Raspberry PI

Algoritmus byl napsán jako skript v jazyce Python. Obsluhuje komunikaci po sériovém portu (UART - xBee), a logování zpráv do souborů zvlášť pro každý modul. Ke každé přijaté zprávě je přidáno datum a čas ze systémových hodin pro pohodlnou analýzu případných výpadků a podobně.

```
timenow = time.strftime("%Y-%m-%d %H:%M ") # naformatovani data
                                                a casu
mID = 1      # nejnizsi ID modulu
mIDmax = 3   # nejvyssi ID modulu
while (mID < (mIDmax+1)):
    if mID == 1:    # pro kazdy modul se otevře jiny soubor
        outf = open(file1, fmode)
    if mID == 2:
        outf = open(file2, fmode)
    if mID == 3:
        outf = open(file3, fmode)
    message=bytearray([5, mID, 0xff, 0x80, 0x00])
    port.write(message) # poslani zadosti o report
    x = spb.readline() # precteni radku ze sériového
                        # portu
    #spb.writelines(x) # pro testovani. vrati data
                       # na port
    if(x):            # pokud prisla zprava před
                       # timeoutem
        outf.write(timenow + x) # zapis zpravy do souboru
        outf.flush()
    mID=mID+1        # nasleduje dalsi modul
    outf.close()    # zavreni souboru
```

Časování zajišťuje systémový nástroj Crontab. Uvedením vybraného příkazu do tabulky lze nastavit jeho automatické periodické vykonávání. Tím je zajištěna nepřetržitá funkčnost vždy již od připojení napájení a bez nutnosti se přihlašovat jako některý z uživatelů. Zápis v Crontab vypadá následovně:

```
**** sudo python /usr/bin/koncentrator/koncentrator.py
```

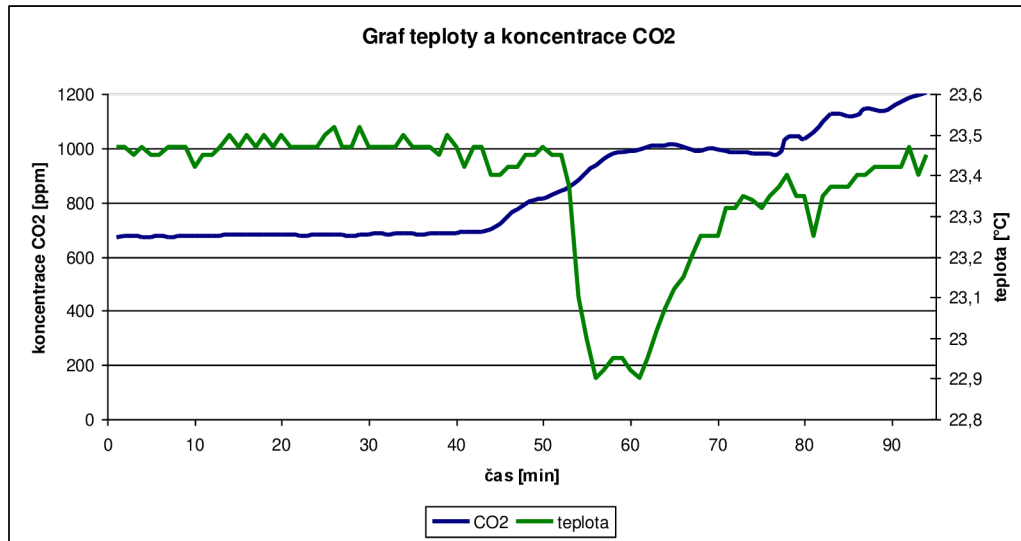
Hvězdičky znamenají, že se daný příkaz má vykonat každou minutu každé hodiny každého dne každého týdne.

Soubor logu zpráv jednoho měřicího modulu vypadá následovně:

```
01
Laborator SE2.101
  DATUM      CAS   ID  TEPLO  VLHKO  CO2
RRRR-MM-DD HH:MM X  [ °C]  [ % ]  [PPM]
-----
2015-05-17 10:16  1  28.00  43.75  00938
2015-05-17 10:17  1  28.07  43.87  01052
2015-05-17 10:18  1  28.10  43.91  00957
```

Soubor logu má velikost 45 kB při plném záznamu za jeden den. To znamená, že při plném obsazení systému 253 měřicími moduly soubory logů za jeden rok dosáhnou velikosti 4,1 GB. S tímto je třeba počítat při výběru SD karty pro koncentrátor.

Z těchto záznamových souborů uložených na SD kartě Raspberry PI lze analyzovat potřebná data, získat časové průběhy veličin a podobně. Vhodné je použití např. softwaru Matlab nebo MS Excel. Pro názornost je zde uveden graf koncentrace CO₂ a teploty v místnosti během devadesáti minut. Je nutné uvést, že měřicí modul byl v blízkosti osoby a tedy průběhy naměřených hodnot jsou touto skutečností ovlivněny.



Obr. 5.11: Graf průběhu teploty a koncentrace CO2

5.5 Uživatelská aplikace pro PC

Z důvodu poměrně nepraktické manipulace s daty v podobě textových souborů, byl vytvořen uživatelský nástroj v podobě aplikace pro PC s operačním systémem Windows. Program byl vytvořen v prostředí MS Visual Studio v jazyce C#. Jeho funkce se dají rozdělit do dvou druhů: práce se soubory logů (především vykreslování grafů) a interakce se systémem měřicích modulů a koncentrátoru.

Pro první část není třeba počítač vybavovat žádným přídavným hardwarem. Pracuje se s textovými soubory obsahujícími logy koncentrátoru uloženými v počítači. Z Raspberry Pi lze soubory vyčíst prostřednictvím síťového připojení a protokolu FTP. Další možností je soubory přímo zkopírovat z SD karty, na kterou jsou ukládány. Po stisku tlačítka OTEVŘÍT LOG je možné v dialogovém okně vybrat soubory k načtení. Načtené logy se zobrazují v seznamu na levé straně okna a lze jich najednou vybrat k zobrazení až tři. Průběhy zaznamenaných hodnot jsou automaticky vykreslovány ve společném grafu. Lze volit veličiny k zobrazení a vyfiltrovat tak například pouze průběhy teploty. Pro výběr požadovaného časového úseku slouží ovládací prvky na spodní straně okna.

Druhou funkcí je vzdálené kalibrování měřicích modulů. K tomuto je třeba mít k počítači připojen modul xBee-PRO 868. Lze to jednoduše provést připojením

vývojového kitu nebo příslušného adaptéru do USB portu počítače. S nainstalovanými ovladači se k RF modulu přistupuje jako k virtuálnímu sériovému portu. Po stisku tlačítka KALIBRACE je otevřeno nové dedikované okno. Je potřeba vybrat příslušných COM port pro přístup ke komunikaci. Další ovládací prvky se týkají samotné kalibrace. Měřicí modul se vybere ze seznamu podle ID, zvolí se typ kalibračního bodu Low/High a hodnota dané veličiny. Tlačítkem Kalibruj se odešle kalibrační zpráva podle specifikace v kapitole 5.2.

Zobrazení oken uživatelské aplikace je předmětem přílohy C.

ZÁVĚR

V první kapitole byl proveden průzkum principů a možností bezdrátové komunikace v bezlicenčních pásmech. Byl proveden průzkum dostupných modulů pro přenos dat s využitím frekvenčního pásma 868 Mhz a vybrán vhodný typ xBee-PRO 868.

Byla rozebrána teorie kontroly kvality vzduchu, zejména z hlediska měření teploty, vlhkosti a množství znečišťujících. Tyto senzory umožní monitorovat hladinu CO₂ ve vzduchu v rozsahu do 5000 ppm, jeho vlhkost od 0 do 100 % a teplotu od 0 do 100°C.

Měřicí moduly jsou řízeny mikrokontrolery STM32F401, které poskytují rezervu v možnostech rozšíření funkcionality. Měřicí moduly jsou k tomu uzpůsobeny i po hardwarové stránce.

Specificky pro tuto aplikaci byl vytvořen protokol ošetřující bezdrátovou komunikaci mezi zařízeními z hlediska adresování a funkcionality. Měřicí moduly jsou plně funkční a byly dlouhodobě otestovány. Byl implementován algoritmus schopný analyzovat přijaté pakety a odesílat měřená data. Jako rozšíření funkcí byl přidán mechanismus dvoubodové kalibrace snímačů.

Byl navržen, realizován, a otestován koncept zařízení pro centralizovaný sběr dat o kvalitě vzduchu na různých místech budov. Samotný koncentrátor realizovaný minipočítačem Raspberry Pi, periodicky vyčítá data ze sítě měřičů, tyto data jsou ukládána do přehledných souborů pro dlouhodobý sběr dat. Použití systému je pro uživatele velice jednoduché, stačí jen zapojit napájení.

Pro snadnou kontrolu nad systémem, kalibraci a analýzu výsledků byla vytvořena aplikace pro osobní počítač. Díky ní je práce s nashromážděnými daty pro uživatele jednoduchá. Jako případné rozšíření funkcí by bylo vhodné Raspberry Pi připojit na webový server pro vzdálený přístup k datům.

Celkově pro mě byla tato práce přínosem především proto, že většina softwarových nástrojů způsobů programování pro mne byla nová.

LITERATURA

- [1] HANUS, Stanislav. *Bezdrátové a mobilní komunikace*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, 2003, 134 s. ISBN 80-214-1833-8.
- [2] Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/03.2007-4 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu. [online]. 2007 [cit. 2015-07-15]. Dostupné z: http://www.ctu.cz/1/download/OOP/Rok_2007/VO_R_10_03_2007_4.pdf
- [3] RIPKA, Pavel. *Senzory a převodníky*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 136 s. ISBN 80-010-3123-3. Skripta. ČVUT.
- [4] ČEJKA, M. *Elektronická měřicí technika*. Brno, 2006. Skriptum. VUT- FEKT.
- [5] Měření teploty v budovách. Měření teploty v budovách [online]. 2010 [cit. 2015-06-20]. Dostupné z: <http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A5M38SZS/Senzory%20teploty.pdf>
- [6] ČERMÁK, Jan a . *Snímač vlhkosti vzduchu*. Brno, 2008. Bakalářská práce. FEKT VUT v Brně.
- [7] Měření kvality vzduchu a CO2 v interiérech. ABS portal [online]. 2013 [cit. 2015-12-11]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/vetrani-a-klimatizace/mereni-kvality-vzduchu-a-co2-v-interierech>
- [8] I²C. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 16.6.2007, last modified on 23.1.2011 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/I²C](http://cs.wikipedia.org/wiki/I%C2)>.
- [9] Hw.cz : Teorie a praxe [online]. 19.5.2000 [cit. 2014-12-13]. Stručný popis sběrnice I²C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877. Dostupné z WWW: <http://www.hw.cz/design/i2c_pic/index.html>.
- [10] USART. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 1.4.2008, 20.11.2011 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/USART>>.
- [11] RICHARDSON, Matt a Shawn P WALLACE. Getting started with Raspberry Pi [online]. 1st ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2012, xiii, 161 p. [cit. 2015-01-06]. Make: projects. ISBN 14-493-4421-6.

- [12] Datasheet STM32F401xB STM32F401xC. In: [online]. 2014 [cit. 2015-01-9]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00086815.pdf>
- [13] I2C Communication with the Honeywell HumidIcon™ Digital Humidity/Temperature Sensors. In: *Technical Note* [online]. 2012 [cit. 2015-06-28]. Dostupné z: <http://sensing.honeywell.com/i2c-comms-humidicon-tn-009061-2-en-final-07jun12.pdf>
- [14] Building a wireless temperature sensor with a Raspberry Pi and Xbee Wireless modules. Brett Danger Field [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: http://www.brettdangerfield.com/post/raspberrypi_temperature_monitor_project/

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ISM	Industrial Scientific and Medical radio band
e.r.p.	Effective Radiated Power
e.i.r.p.	Equivalent Isotropically Radiated Power
CRC	Cyclic Redundancy Check
RWM	Read-Write Memmory
RAM	Random Access Memmory
VOC	Volatile Organic Compounds
HMOS	Heated Metal Oxide Semiconductor
NDIR	Nondispersive Infrared Sensor
ppm	Parts per million
ABC	Automatic Baseline Calibration
RTC	Real Time Clock
DMIPS	Dhrystone Million Instructions Per Second
SRAM	Static Random Access Memory
USART	Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter
PC	Personal Computer
I ² C	Inter-Integrated Circuit
TWI	Two Wire Interface
SDA	Synchronous Data
SCL	Synchronous Clock
SPI	Serial Peripheral Interface
SDIO	Secure Digital Input Output
USB	Universal Serial Bus

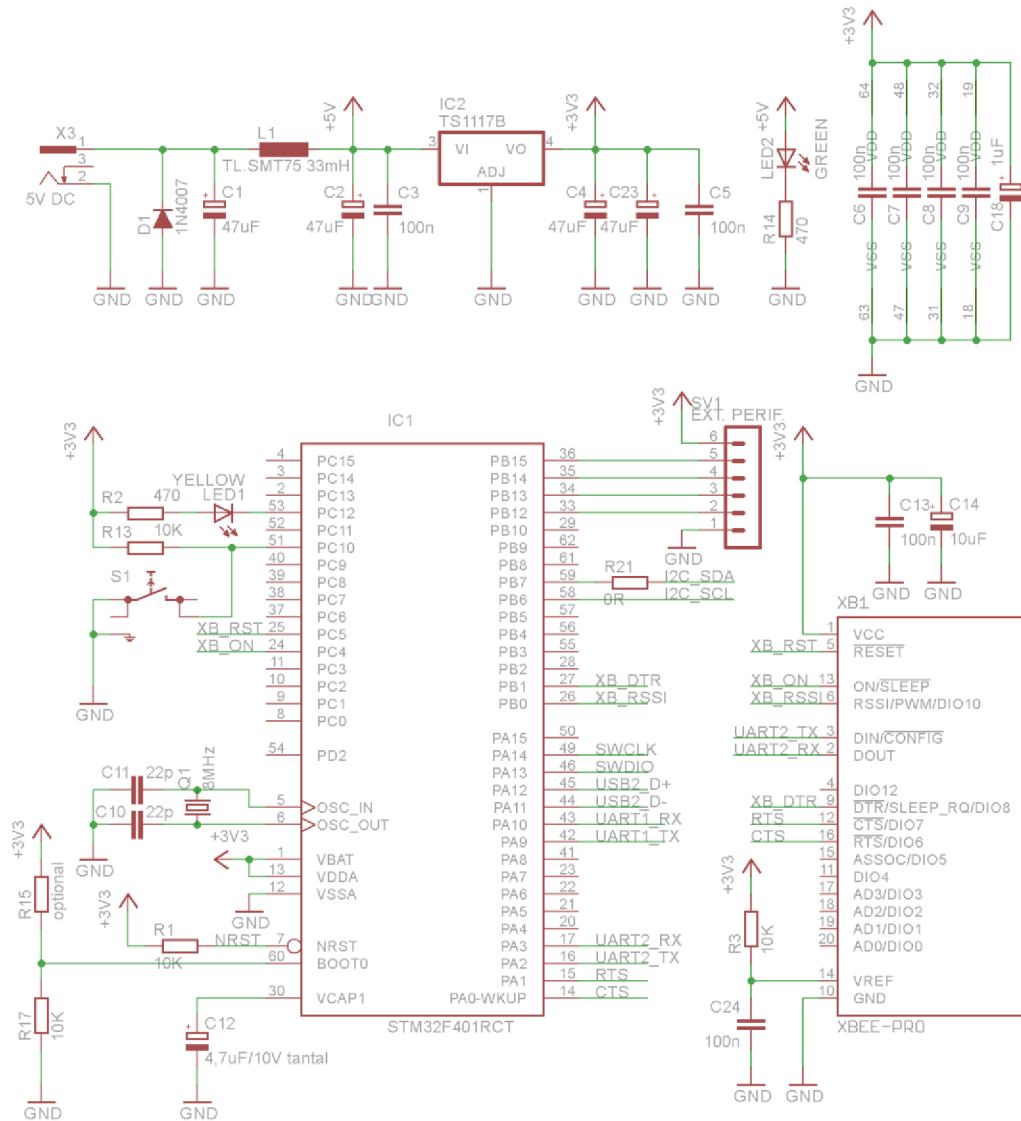
SWD Serial Wire Debug
JTAG Joint Test Action Group
RSSI Received Signal Strength Indication

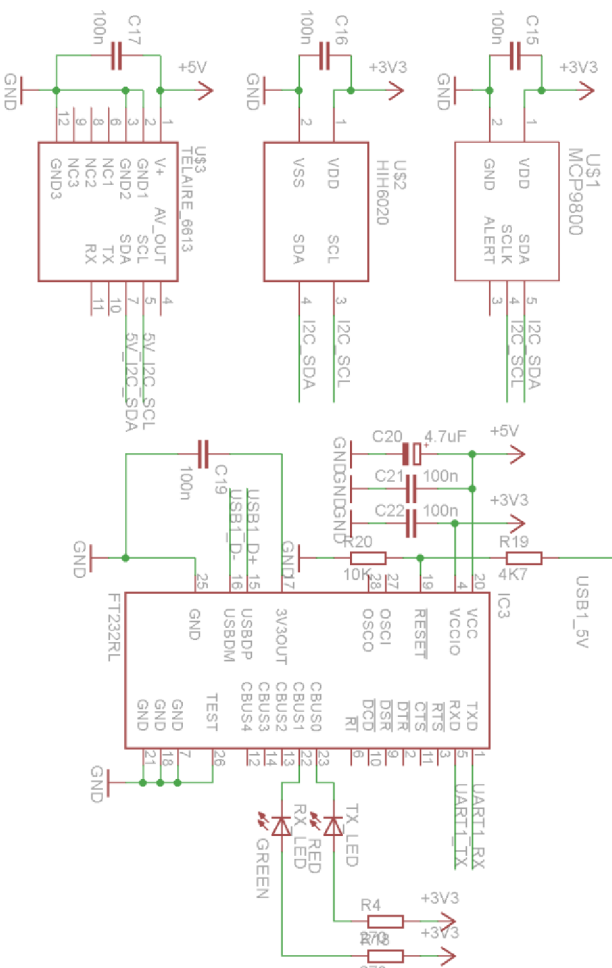
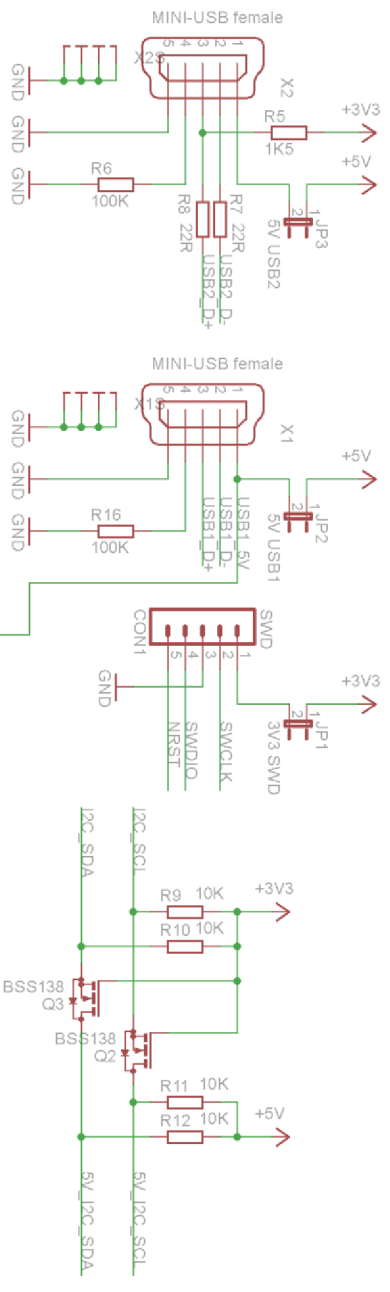
SEZNAM PŘÍLOH

A	Návrh DPS měřících modulů	58
A.1	Elektrické schéma zapojení	58
A.2	Deska plošného spoje – top	60
A.3	Deska plošného spoje – bottom	60
A.4	Osazovací výkres DPS – top.....	61
A.5	Osazovací výkres DPS – bottom	61
B	Seznam součástek	62
C	Obrazovka uživatelské aplikace	64

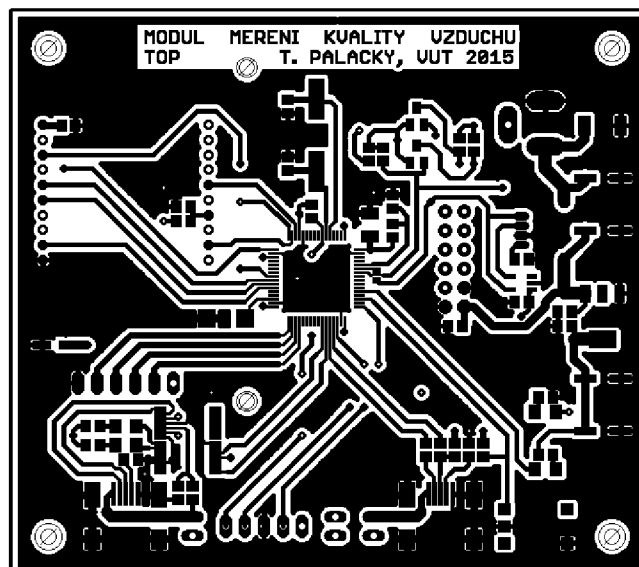
A NÁVRH DPS MĚŘÍCÍCH MODULŮ

A.1 Elektrické schéma zapojení





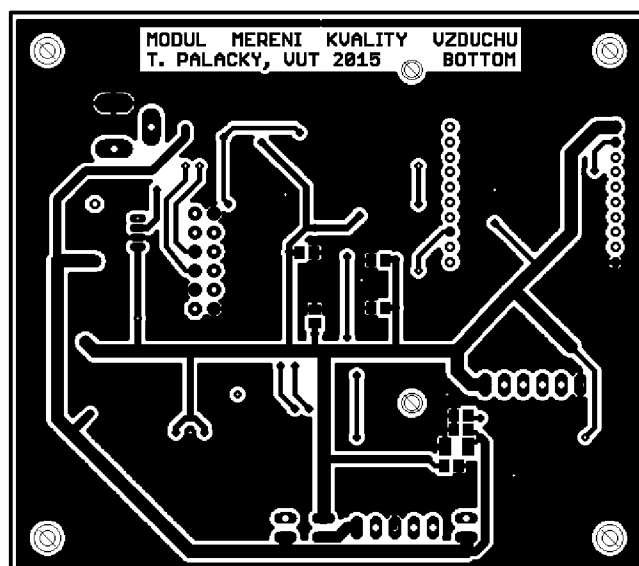
A.2 Deska plošného spoje – top



Rozměr desky 85 x 75 mm, měřítko 1:1

rozeč montážních otvorů 75 x 65 mm, průměr 3,5 mm

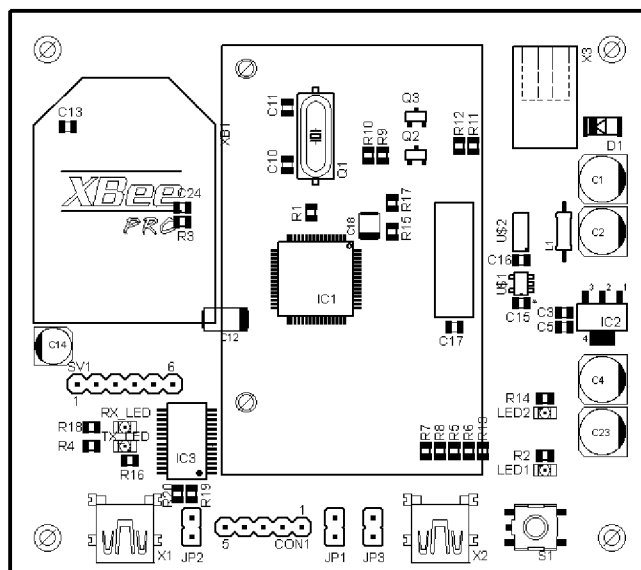
A.3 Deska plošného spoje – bottom



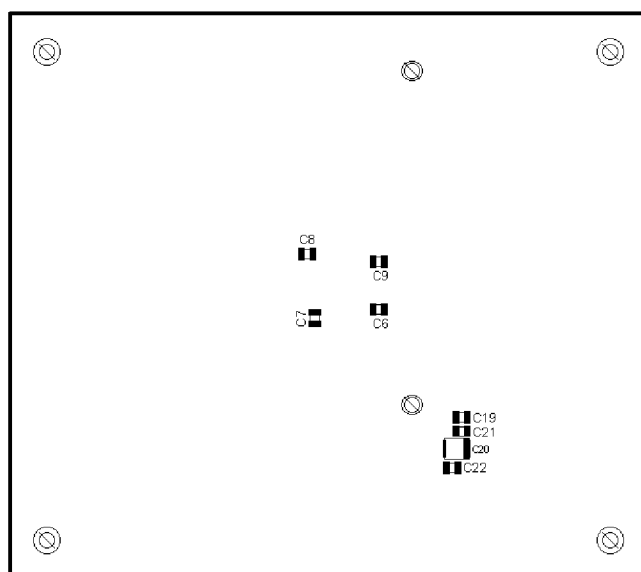
Rozměr desky 85 x 75 mm, měřítko 1:1

rozeč montážních otvorů 75 x 65 mm, průměr 3,5 mm

A.4 Osazovací výkres DPS – top



A.5 Osazovací výkres DPS – bottom

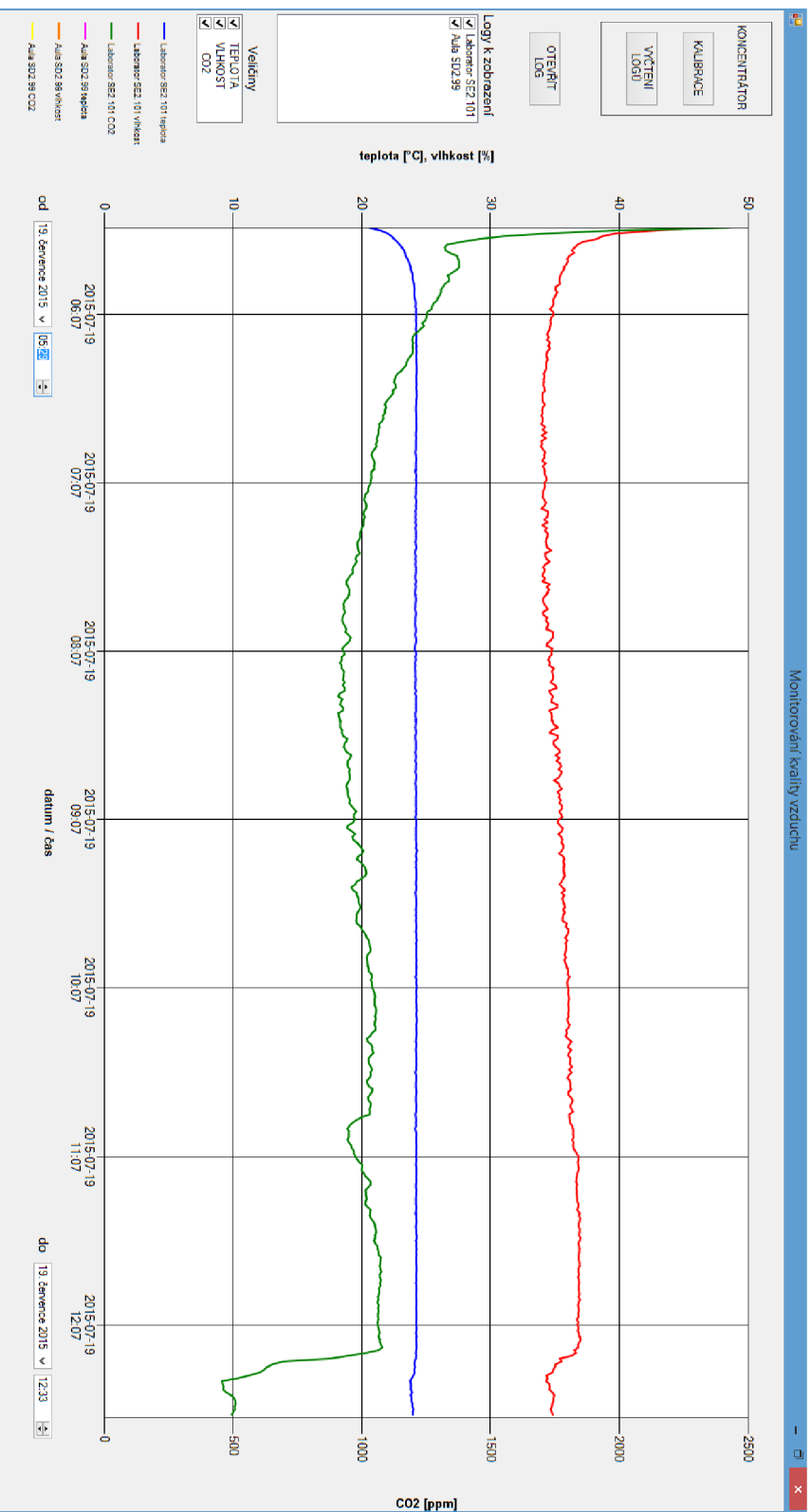


B SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	47uF/25V	UD-6,3X7,7	kondenzátor elektrolytický
C2	47uF/25V	UD-6,3X7,7	kondenzátor elektrolytický
C3	100n	C0805	kondenzátor keramický
C4	47uF/25V	UD-6,3X7,7	kondenzátor elektrolytický
C5	100n	C0805	kondenzátor keramický
C6	100n	C0805	kondenzátor keramický
C7	100n	C0805	kondenzátor keramický
C8	100n	C0805	kondenzátor keramický
C9	100n	C0805	kondenzátor keramický
C10	22p	C0805	kondenzátor keramický
C11	22p	C0805	kondenzátor keramický
C12	4,7uF/10V	CPOL-EUSMCC	kondenzátor tantalový
C13	100n	C0805	kondenzátor keramický
C14	4,7uF	UD-6,3X7,7	kondenzátor elektrolytický
C15	100n	C0805	kondenzátor keramický
C16	100n	C0805	kondenzátor keramický
C17	100n	C0805	kondenzátor keramický
C18	1uF	SMC_B	kondenzátor tantalový
C19	100n	C0805	kondenzátor keramický
C20	4.7uF	SMC_B	kondenzátor tantalový
C21	100n	C0805	kondenzátor keramický
C22	100n	C0805	kondenzátor keramický
CON1	SWD	MA05-1	řada pinů (programátor)
D1	1N4007	MELF-MLL41	dioda univerzální
IC1	STM32F401RCT	LQFP64	mikrokontroler
IC2	317EMP	SOT223	stabilizátor napětí
IC3	FT232RL	SSOP28	USB/USART převodník
JP1	JP1E	jumper	napájení - programátor
JP2	JP1E	jumper	napájení - USB1
JP3	JP1E	jumper	napájení - USB2
L1	TL.SMT75	L-EU0204/7	tlumivka odrušovací
LED1	YELLOW	1206	LED signalizační
LED2	GREEN	1206	LED napájení
Q1	8MHz	HC49UP	krystal
Q2	BSS123	SOT23	
Q3	BSS123	SOT23	
R1	10K	R0805	rezistor
R2	470R	R0805	rezistor

R5	1K5	R0805	rezistor
R6	100K	R0805	rezistor
R7	22R	R0805	rezistor
R8	22R	R0805	rezistor
R9	10K	R0805	rezistor
R10	10K	R0805	rezistor
R11	10K	R0805	rezistor
R12	10K	R0805	rezistor
R13	10K	R0805	rezistor
R14	470R	R0805	rezistor
R15	0R	R0805	rezistor (neosaz.)
R16	100K	R0805	rezistor
R17	0R	R0805	rezistor (neosaz.)
S1	SKHMPSE010	SKHMPXE010	tlačítko spínací
SV1	MA06-1		řada pinů (rozšíření)
U\$1	MCP9800	SOT-23-5_MC	senzor teploty
U\$2	HIH6020	SIP-4	senzor vlhkosti
U\$3	TELAIRE_6615		senzor CO2
X1	MINI-USB_SHIELD5P4	32005-400	konektor mini USB
X2	MINI-USB_SHIELD5P4	32005-400	konektor mini USB
X3	733980-62	con-conrad	konektor napájení
XB1	XBEE-PRO		bezdrátový modul

C OBRAZOVKA UŽIVATELSKÉ APLIKACE



Kalibrace měřicích modulů

Volba portu: COM8

Kalibrace

ID modulu

Kalibrační bod

Low

High

Teplota 22.00 Kalibruj

Vlhkost 40.00 Kalibruj

CO2 1000 Kalibruj