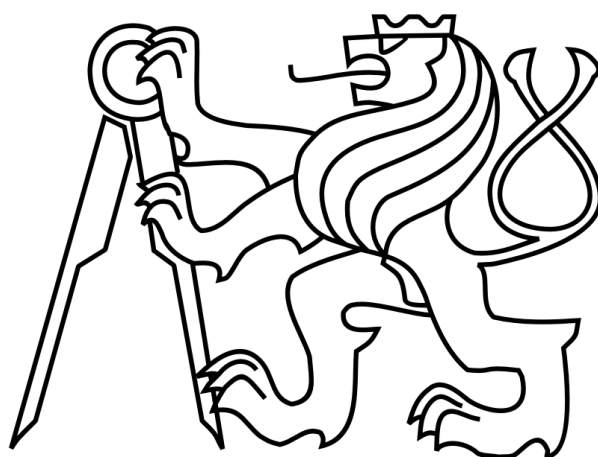


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky



Bakalářská práce

Bezdrátové ZigBee teplotní senzory v centralizované síti

2014

Bakalant:

David Matiašek

Vedoucí práce:

Ing. Vladimír Janíček, Ph.D.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **MATIÁŠEK David**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Aplikovaná elektronika

Název tématu: **Bezdrátové ZigBee teplotní senzory v centralizované síti**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Prostudujte problematiku měřicích jednotek pro měření teploty (případně dalších fyzikálních veličin).
- 2) Navrhněte obvodové zapojení koncové jednotky pro měření teploty (případně jiných veličin) v mobilním provedení s pomocným solárním napájením.
- 3) Optimalizujte pracovní režim s ohledem na mobilní zdroj energie.
- 4) Předpokládejte komunikaci s řídicí jednotkou pomocí ZigBee protokolu.
- 5) Naprogramujte koncovou jednotku.
- 6) Zhotovte prototyp a ověřte funkci.
- 7) Vyhodnoťte dosažené výsledky.
- 8) Vytvořte obslužný manuál.

Seznam odborné literatury:

- 1)Gislason D. - Zigbee wireless networking, ISBN 780750685979
- 2)Farahani S, - ZigBee wireless networks and transceivers, ISBN 9780750683937
- 3)Shashank P. - Energy Harvesting Technologies, ISBN 9780387764634
- 4)Kreidl M. - Měření teploty - senzory a měřicí obvody, ISBN 8073001454
- 5)Elahi A. - ZigBee Wireless Sensor and Control Network, ISBN 9780137134854

Vedoucí: **Ing. Vladimír Janíček, Ph.D.**

Platnost zadání: 31. 8. 2015

L.S.

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 23. 1. 2014

Čestné prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Vladimíru Janíčkovi Ph.D. za pomoc s realizací práce, cenné rady a připomínky. Rád bych poděkoval panu Ing. Karlovi Duškovi Ph.D. za pomoc s pouzdry typu QFN v otázce zapájení. Dále bych ještě rád poděkoval svému kolegovi Tadeášovi Hollerovi za pomocné rady při vývoji.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je prostudovat problematiku měřicích jednotek a to konkrétně jednotek pro měření teploty vzduchu. Jejich reálné použití v praktickém prostředí.

Druhá část práce obsahuje rozbor a návrh zařízení pro měření teploty a její následné odeslání do hlavní sběrné jednotky využívajíc komunikaci ZigBee protokolu. Konstruované zařízení se snaží snížit energetické nároky na provoz využitím možností PIC18F25J11 a hardwarového návrhu.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the examination of the sensor. The thesis is divided into two main parts – theoretical and practical. The theoretical part outlines the basis of temperature sensor. Further chapters of the theoretical part are concerned with realistic using in practice space.

The practical part refers to the use of the above realizing wireless temperature sensor, measuring and communication with main unit using ZigBee protocol. During making the final products, I'm trying to eliminate power demands on energy sources by PIC18F25JJ and by hardware solution.

Seznam použitých zkratk a symbolů

| | |
|--------------|--|
| ACK | Acknowledgement |
| AES | Advanced Encryption Standard |
| ALU..... | Arithmetic Logic Unit |
| APDU | Aplikační Protokol Datových Jednotek |
| APL | Application Layers |
| CCA..... | Clear Channel Assesment |
| CISC | Complex Instruction Set Computer |
| CRC..... | Cyclic Redundancy Check |
| CSMA/CA..... | Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance |
| DPS..... | Deska plošných spojů |
| DSSS | Direct Sequence Spread Spectrum |
| FFD..... | Full Function Device |
| IC..... | Integrovaný obvod |
| IDI | dentification |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| INT | Interrupt |
| LED | Light-Emitting Diode |
| MAC..... | Media Access Control |
| MCU..... | Micro Controler Unit |
| MPPT | Maxim Power Point Tracking |
| NIB | NWK Information Base |
| NLDE | Network Layer Data Entity |
| NLME..... | Network Layer Management Entity |
| NWK | Network layers |
| NWK | Network layers |
| O-QPSK | Offset Quadrature Phase-Shift Keying |
| PAN..... | Personal Area Network |
| PHY..... | Physical Layer |
| RAM..... | Random Access Memory |
| RFD..... | Reduced Function Device |

RFD..... Reduced Function Device
RISC..... Reduced Instruction Set Computing
RISC..... Reduced Instruction Set Computing
ROM..... Read-Only Memory
RTTC..... Real-Time Clock and Calendar
SAP..... Service Access Point
SPI..... Seriól Peripheral Interface - sériová periferní sběrnice
TI..... Texas Instruments
uC..... Mikrokontrolér
USB..... Universal Serial Bus
WIFI..... Wireless Fidelity
ZDO..... ZigBee Device Object

Obsah

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Úvod | 1 |
| 2 | Průzkum trhu v oblasti bezdrátových senzorů | 2 |
| 3 | Struktura zařízení | 4 |
| 3.1 | Blokové schéma zařízení | 4 |
| 3.2 | Funkce jednotlivých bloků | 4 |
| 4 | Teoretický rozbor | 6 |
| 4.1 | Power management..... | 6 |
| 4.1.1 | DC-DC měniče | 7 |
| 4.1.2 | Energy Harvesting..... | 10 |
| 4.2 | Teorie komunikace 1-Wire | 11 |
| 4.2.1 | Základní informace | 11 |
| 4.2.2 | Obecné připojení 1-Wire sběrnice..... | 11 |
| 4.2.3 | Komunikace | 13 |
| 4.2.4 | Algoritmus komunikace na sběrnici 1-Wire pokud řídí μC | 15 |
| 4.3 | Teorie sběrnice SPI..... | 15 |
| 4.3.1 | Vlastnosti SPI sběrnice..... | 16 |
| 4.3.2 | Druhy vodičů sběrnice SPI..... | 16 |
| 4.3.3 | Výhody a nevýhody SPI..... | 17 |
| 4.3.4 | Princip komunikace sběrnice SPI..... | 17 |
| 4.4 | Teorie datového rádiového přenosu | 19 |
| 4.4.1 | Rádiový modul | 19 |
| 4.5 | Teorie ZigBee | 19 |
| 4.5.1 | Vlastnosti ZigBee | 20 |
| 4.5.2 | Struktura komunikačního standardu ZigBee a popis ZigBee..... | 21 |
| 4.5.3 | IEE 802.15.4..... | 22 |
| 4.5.4 | Fyzická vrstva | 23 |
| 4.5.5 | MAC vrstva..... | 23 |
| 4.5.6 | Síťová vrstva NWK..... | 23 |
| 4.5.7 | Aplikační vrstva APL..... | 25 |
| 4.5.8 | Topologie ZigBee sítě | 27 |
| 4.5.9 | Zabezpečení..... | 28 |
| 4.6 | Teorie elektrických teploměrů..... | 28 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.6.1 | Analogové teploměry | 29 |
| 4.6.2 | Digitální teploměry | 29 |
| 4.7 | Základy mikrokontrolérů | 30 |
| 4.7.1 | Výhody mikrokontrolérů | 30 |
| 4.7.2 | Koncepce mikrokontrolérů | 30 |
| 5 | Výběr vhodných součástek | 34 |
| 5.1 | Výběr řídicí jednotky | 34 |
| 5.1.1 | Mikrokontrolér PIC18F25J11 | 35 |
| 5.2 | Výběr teploměru | 36 |
| 5.2.1 | DS18B20 | 36 |
| 5.3 | Výběr správce napájení | 36 |
| 5.3.1 | BQ25570 | 37 |
| 5.3.2 | LTC3330 | 40 |
| 5.4 | Výběr nabíječky akumulátoru | 40 |
| 5.4.1 | LTC4088-2 | 40 |
| 5.5 | Výběr rádiového modulu | 41 |
| 5.5.1 | ZigBee modul MRF24J40MA | 42 |
| 5.6 | Výběr alternativního zdroje energie | 43 |
| 5.6.1 | Fotovoltaické panely | 43 |
| 5.7 | Výběr akumulátoru | 45 |
| 5.8 | Výběr konstrukční krabičky | 45 |
| 6 | Konstrukce zařízení | 47 |
| 6.1 | Rozdělení obvodu bezdrátového teploměru | 47 |
| 6.2 | Obvodové zapojení | 47 |
| 6.2.1 | Kreslení symbolů součástek v programu Eagle 6.5.0. Light | 48 |
| 6.2.2 | Návrh elektrického schématu zařízení | 48 |
| 6.3 | Návrh desky plošných spojů | 52 |
| 6.3.1 | Kreslení pouzder součástek | 52 |
| 6.3.2 | Návrh DPS | 53 |
| 6.3.3 | Výroba desky plošných spojů | 53 |
| 6.3.4 | Osazení desky plošných spojů | 53 |
| 7 | Způsob vzájemné komunikace | 54 |
| 7.1 | Dohoda o komunikaci mezi sběrnou jednotkou a senzory | 54 |

| | | |
|-------|--|----|
| 7.1.1 | Přidání nového senzoru | 54 |
| 7.1.2 | Standartní komunikace senzoru s hlavní jednotkou | 54 |
| 7.1.3 | Odpojení čidla | 54 |
| 7.2 | Struktura komunikace mezi senzorem a hlavní jednotkou | 54 |
| 8 | Firmware pro senzor..... | 57 |
| 8.1 | Receiver.c | 57 |
| 8.2 | Soubory pro inicializaci ZigBee rádiového modulu..... | 58 |
| 8.2.1 | Přijímání a odesílání paketů | 58 |
| 8.3 | Prikazy.c | 59 |
| 8.4 | DS18B20.c..... | 59 |
| 8.5 | Rtcc_lib.c..... | 59 |
| 8.6 | Složení firmwaru senzoru..... | 60 |
| 9 | Měření zhotoveného zařízení | 61 |
| 9.1 | Měření spotřeby elektrické energie bezdrátového teplotního senzoru | 61 |
| 9.2 | Měření komunikace v reálném prostředí | 62 |
| 9.2.1 | Měření na 8 nadzemním podlaží v budově A | 63 |
| 9.2.2 | Měření skrz nadzemní podlaží v budově A..... | 66 |
| 9.2.3 | Měření komunikace ve volném prostranství | 68 |
| 9.2.4 | Zhodnocení měření komunikace v reálném prostředí | 68 |
| 10 | Ekonomický rozbor senzoru..... | 69 |
| 11 | Závěr..... | 73 |
| 12 | Přílohy | 79 |
| 12.1 | PŘÍLOHA A – SCHÉMA ZAPOJENÍ..... | 79 |
| 12.2 | Příloha B – Motivy desky plošných spojů | 80 |
| 12.3 | Příloha C – Osazovací plán..... | 81 |
| 12.4 | Příloha D – Vyhotovená deska plošných spojů | 82 |
| 12.5 | Příloha E – Seznam použitých součástek..... | 83 |
| 12.6 | Příloha F – Fotodokumentace výrobku..... | 84 |

1 Úvod

V dnešním světě, kdy se pro provoz budovy měří hodně fyzikálních veličin a to např.: teplota, vlhkost, detekce různých plynů, jež mohou ohrožovat či jinak poškozovat lidský organismus nebo přímo ohrožovat provoz budovy, jsem se na základě zkušenosti a potřeb z práce rozhodl zrealizovat teplotní čidlo. Teplotní senzor jsem vybral pouze k měření teploty vzduchu a to z důvodů měření teploty pro následné řízení budovy. V práci standardně narážím na problém, kdy je potřeba umístit teplotní čidlo na místo, kam již není možné přivést potřebnou kabeláž a to ať už důvodů nemožnosti zásahu do zdi či jiné plochy anebo že budoucí senzor se nachází v místech, kde je velmi náročné provést potřebnou kabeláž. Z těchto důvodů jsem usoudil, že je třeba jít bezdrátovou cestou. Ale i rádiová komunikace vyžaduje stále svůj zdroj energie. To je možno řešit drátovým nebo bateriovým napájením. První možnost naráží na stejné problémy jako komunikace a ne vždy by drátové napájení bylo realizovatelné. Tudíž jsem s možnostmi došel k bateriovému napájení. Při tomto druhu napájení je třeba omezit spotřebu energie. Je možné využít hardwarových možností při návrhu obvodu, nebo tento málo energetický požadavek zimplementovat do samotného firmwaru fyzického zařízení. Dnešní sortiment velkých výrobců jako jsou např.: Texas Instruments, Linear Technology a další je obrovský, takže moji poptávku po takovémto řešení by měli být schopni bez problému uspokojit. Veškeré prováděné úkony bezdrátového teplotního čidla je třeba nějakým způsobem řídit. K tomuto účelu jsem sáhnul po mikrokontroléru firmy Microchip s níž jsem měl již zkušenosti z předmětu Mikrokontroléry. Taktéž je nutné dopravit informace o teplotě do cílového zařízení, k tomuto slouží rádiové moduly, které se po spojení s mikrokontrolérem starají o bezdrátovou komunikaci mezi teplotním senzorem a sběrnou jednotkou.

2 Průzkum trhu v oblasti bezdrátových senzorů

ZigBee jako technologie sama o sobě je stále relativní novinkou. Na našem domácím trhu se mi ji podařilo objevit u firmy Legrand. Ta se přímo nezaobírá produkcí senzorů a s tím spjatých věcí, ale cílí na domácí použití při jednoduché rekonstrukci, kdy koncový zákazník nechce zasahovat do stávající instalace a využije například možnosti použití bezdrátového vypínače na osvětlení, ovládání žaluzií, detektory a i domovní alarmy. Cena ovladače pro žaluzie od firmy Legrand se pohybuje okolo 892 Kč. [37] Vesměs u ovládání je na druhé straně aktuátor, který slouží jen jako spínací bezdrátový prvek napájený klasickým napětím 230 V. Pro napájení vysílače ZigBee je využito standartní jednorázové baterie. Po hledání v oblasti měření a regulace jsem našel jiné bezdrátové senzory teploty, které již nevyužívají technologie ZigBee, ale stále se dají pokládat za přímé konkurenty. Jedním z nich je bezdrátový snímač teploty SR04 od firmy Thermokon. [38] Tento výrobek je určen pro měření teploty v místnostech s teplotním rozsahem měřené teploty od 0 °C do +50 °C. Ovšem v tomto případě je senzor napájen po rozvodné kabeláži, jelikož funguje jako sběrná jednotka z okolních senzorů plus měří svoji aktuální teploty okolí. Cena senzoru se ke dni 18.5.2014 byla 3 908 Kč. [38] K této jednotce se dají připojit další bezdrátové senzory. Jako důležitý se pro mě jevil model bezdrátové senzoru SR65 zobrazeného na obrázku 2.1. [39] Cena tohoto čidla byla ke stejnému datu jako u sběrací jednotky 4 489 Kč. Výrobce u něj ve zkráceném popisu výrobku uvádí, že zdrojem napájení je solární články nebo volně volitelná baterie, měřicí teplotní rozsah je od -20 do +60 °C a měření probíhá každých 100 sekund. Další porovnávacím prvkem je jeho komunikační dosah. Ten je v příloženém informačním letáku uveden jako 30 m v budově a na volném prostranství do 300 m. Celý systém pracuje na frekvenci 868,3 MHz. [40]



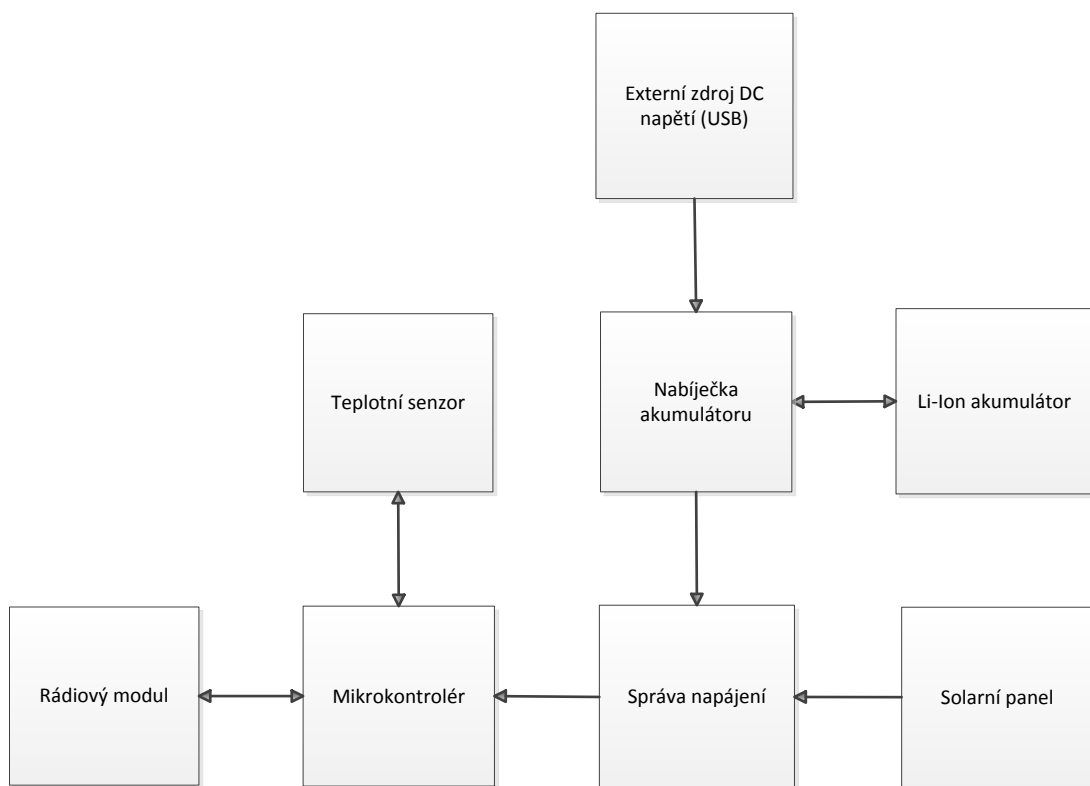
Obrázek 2.1 – Pohled na bezdrátový teploměr SR65 [39]

Firma Delta Controls nabízí také určité produkty využívající ZigBee komunikace. Tato firma nabízí komplexní řešení v oblasti senzorů. Pro podobnost jsem vybral zařízení s pojmenováním WINS-TxxxB. Jedná se o bateriově napájený bezdrátový senzor využívající ZigBee komunikaci. Výrobce zde uvádí výdrž baterií až 5 let. Oproti předchozímu systému tento pracuje na frekvenci 2.4 GHz. Komunikační rozsah je obdobný a to 30 m v uzavřené budově a až 100 m na volném prostranství. Senzor slouží k měření teploty v rozsahu 0 – 70 °C s přesností $\pm 0,2$ °C, což pokládám při použití v budově za uspokojivé. [41] Bohužel u tohoto výrobku se mi nepodařilo dohledat cenu. Je to z důvodu, že značná část firem posílá ceny podle žádosti zákazníku při cenění objednávky a závisí to na odběru a pozici daného zákazníka.

3 Struktura zařízení

Zařízení musí pro svoji funkčnost obsahovat vše potřebné k obsluhování teplotního senzoru a radiového modulu pro komunikaci. Toto by stačilo pro obyčejné teplotní bezdrátové čidlo. Pro lepší využitelnost konstruované zařízení obsahuje akumulátor namísto jednorázové baterie. Integrovaná nabíječka akumulátoru v zařízení je samozřejmostí. Senzor disponuje možností získání energie bez obsluhy. Zjednodušené blokové schéma zařízení je na obrázku 3.1.1.

3.1 Blokové schéma zařízení



Obrázek 3.1.1 – Blokové schéma bezdrátového teploměru

3.2 Funkce jednotlivých bloků

Mikrokontrolér je tzv. srdce veškerých procesů bezdrátového teploměru. Stará se o správný chod okolních periférií, ukládá do paměti aktuálně změřenou teplotu vzduchu, kterou posléze předá do rádiového modulu. Tyto akce provádí v předem nadefinovaných časových okamžicích. Stará se o nastavování bezdrátového teplotního senzoru a jeho řízení vnitřního času. Čas je důležitý pro správné odesílání údajů o změřené teplotě.

Teplotní senzor je součástka, která umožňuje změřit teplotu a převést ji na digitální podobu. Mikrokontrolér následně tuto hodnotu vyčte a uloží do potřebné proměnné.

Rádiový modul představuje komunikační část teplotního bezdrátového senzoru. Je to část zařízení, která umožňuje veškerou komunikaci s hlavní jednotkou a to odesílání informací o změřené teplotě nebo přijímání příkazů a nastavovacích informací od hlavní jednotky.

Správa napájení je blok, jenž se stará o napájecí část periférií. Má na starosti, aby po celou dobu provozu bylo k dispozici nastavené napětí, samozřejmě za předpokladu zdroje energie. Jako hlavní zdroj energie slouží baterie. Její výdrž se snaží prodloužit alternativním získáváním energie.

Solární panel je zdroj energie, který přeměňuje sluneční svit na elektrické napětí.

Nabíječka akumulátoru je část, která se stará o akumulátor. Umožňuje jeho dobíjení z DC zdroje napětí. Jako zdroj se dá použít buď USB port z počítače, nebo klasická nabíječka pro moderní telefony. Obvod disponuje různými možnostmi dodávání energie do zátěže.

Li-Ion akumulátor tvoří primární zdroj energie pro provoz zařízení.

Externí zdroj DC napětí (USB) je další z trojice zdrojů energie, které umožňují běh zařízení.

4 Teoretický rozbor

V této kapitole se budu zabývat teoretickými poznatky, jež se týkají daného úkolu. Rád bych podrobněji probral několik použitých technologií a také upozornil na několik možných problémů, taktéž bych se rád v této části věnoval hardwarové stránce zařízení. Jelikož právě tato část se podílí na spotřebě energie nejvíce.

4.1 Power management

Neboli správa napájení, tato část je pro bezdrátové čidlo velice důležitá. Je nutné vybrat efektivní způsob řízení napájení v celém obvodu. Obrátit se na klasický stabilizátor napětí je silně neefektivní. Standardní stabilizátory řady LM nedisponují funkcí měniče napětí nahoru. Použití této řady stabilizátoru napětí by vedlo k tomu, že hlavní zdroj energie by musel mít napětí vyšší jak provozní a to i o napětí, jež potřebuje pro svůj provoz. Klasický stabilizátor se hodí pro použití, kdy je zdroj energie např.: adaptér, USB port či přímo napájení z rozvodné sítě. Proto bylo třeba svůj výběr orientovat na jiné obvody. Ideální se jeví obvod, jež umožňuje DC-DC změnu, dále disponuje funkcí Energy Harvesting (získávání energie z alternativních zdrojů) a nejlépe ještě správu akumulátoru. Svůj výběr jsem zaměřil na integrované obvody firmy Texas Instruments. TI nabízí integrované obvody (dále IC), jež jsou typu Nano-Power management. Obvody tohoto typu jsou přímo určeny pro bateriově napájené obvody. Zároveň umožňují právě zmiňovanou funkci Energy Harvesting, tzv. získávání energie z „netradičních“ zdrojů, např. solární panely, vibrace, magnetické pole. Dále IC obsahovaly funkce Buck a Boost. Což jsou vlastně velmi efektivní DC-DC měniče, které se snaží přeměnit malou získanou energii např. ze slunce na požadovanou úroveň elektrického napětí.

4.1.1 DC-DC měniče

Toto označení nesou měniče spínaného charakteru. Stavebním kamenem spínaných zdrojů je způsob využívání výkonového regulačního prvku. Tento člen je zatěžován impulsně, tedy je střídavě spínán a rozepínán. Spínací způsob umožňuje, že odebíraný impulsní výkon je podstatně větší než z klasického lineárního stabilizátoru.

Výhody a nevýhody (spínané vs. lineární zdroje)

Klady:

- Vyšší účinnost
- Výhodnější tam, kde je velký rozdíl mezi vstupním a výstupním napětím
- Razantně menší rozměry pouzdra součástky.
- Jsou ekonomicky výhodnější i přes jejich vnitřní obvodovou složitost.

Zápory:

- Mají pomalejší reakci výstupního napětí na rychlé změny zatěžovacího proudu
- Při požadavku malého zvlnění se musí uvažovat vliv impulsního charakteru zdroje
- Generují rušivý signál, díky právě spínaným prvkům [1]

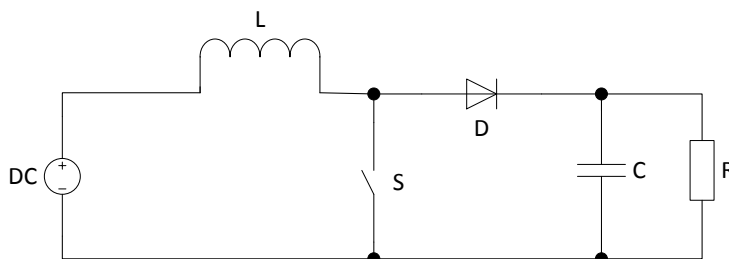
Primárně jsou spínané zdroje určeny pro změnu velikosti stejnosměrného napětí nebo proudu. V domácnosti tyto zdroje můžeme nalézt ve spínaných zdrojích jako jsou nabíječky k mobilním telefonům, přenosným počítačům a jiným většinou mobilních zařízení. Jsou zde použity z důvodů, že je poté nabíjecí adaptér znatelně menší a lehčí, než kdyby se použilo čistě transformátorového měniče a klasického usměrňovače. Jejich další využití je v oblasti získávání energie z netradičních zdrojů. V bakalářské práci je to právě použitý solární panel, kde následně DC-DC měnič provede změnu vstupního napětí ze solárního panelu na nastavenou výstupní hodnotu použitelnou pro zátěž.

Nejčastější typy zapojení DC-DC konvertorů:

1. Zvyšovač napětí (Boost Converter)
2. Snižovač napětí (Buck Converter)
3. Buck-Boost Converter – výstupní napětí obvodu může být vyšší anebo i nižší než jeho vstupní napětí
4. Nábojová pumpa – konstrukce neobsahuje cívky, používá se pouze pro nízké napětí

Zvyšovač napětí (Boost Converter)

Na obrázku 4.1.1.1 je blokové schéma zvyšovače napětí. Obvod předpokládá pro vysvětlení funkce ideální součástky (cívka nemá žádný sériový odpor, dioda nevytváří úbytek napětí). Výstupní napětí na rezistoru R je závislé na době, po kterou je spínač S zavřen, otevřen. DC-DC měnič se tedy může nalézat ve dvou stavech. Za 1. spínač S je sepnutý a proud z DC zdroje teče přes cívku L a tím má levý konec cívky L kladné napětí. Poté se obvod přepne do druhého stavu a spínač S je rozepnutý. V tuto chvíli se polarita cívky L otočí a nyní je kladný pravý konec cívky L. V obvodu vzniknou dva napěťové zdroje v sérii, které se sečtou a přes diodu D začne téct proud, který nabije kondenzátor C na vyšší napětí, než je samotné napětí zdroje DC. Toto napětí se poté objeví i na zátěži R.

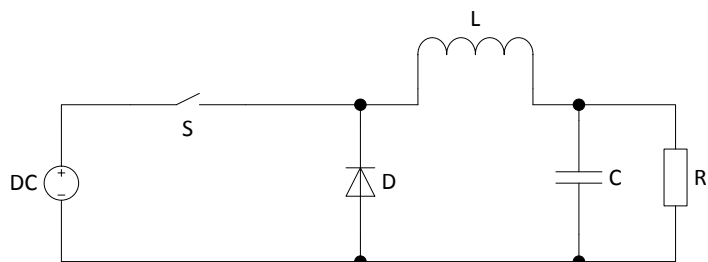


Obrázek 4.1.1.1 – Blokové schéma zvyšovače napětí

Snižovač napětí (Buck Converter)

Na obrázku 4.1.1.2 je zjednodušené blokové schéma snižovače napětí, tzv. Buck konvertor, schéma opět předpokládá ideální součástky jako předešlé schéma na obrázku 4.1.1.1. Předpokládejme stav, kdy je spínač S sepnut a v cívce není uložena žádná energie (cívka je vybitá). Po sepnutí spínače S se proud obvodem začne zvyšovat a cívka začne produkovat na jeho svorkách opačné napětí v reakci na měnící se protékající proud. Tato změna napětí působí proti napětí zdroje DC, a tudíž napětí na zátěži R nedosáhne stejné hodnoty jako napětí zdroje DC. Během této doby cívka

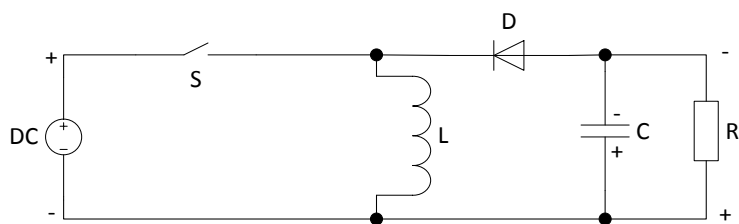
ukládá energii do magnetického pole. Po rozpojení spínače S se z obvodu odpojí zdroj DC a proud protékající zátěží R se bude zmenšovat, dokud neklesne na nulu. Mezi tímto stavem finálního vybití je třeba zase spojit spínač S a dodat do obvodu energii.



Obrázek 4.1.1.2 – Blokové schéma snižovače napětí

Buck-Boost Converter

K realizování Buck-Boost konvertoru je více možností. Jednou z nich je použít Invertující měnič, viz obrázek 4.1.1.3 anebo použít oba dva předchozí obvody v sérii. Uvažujme prvotní stav obdobně jako u snižovače napětí. Cívka je tedy v prvotní části řešení funkce obvodu vybitá. Po sepnutí spínače S dojde pouze k průchodu proudem cívkou L. Na cívce se vytvoří stejné napětí jako na zdroji DC. Toto napětí způsobí nárůst proudu cívkou L. Po rozpojení spínače S proud cívkou L pokračuje dále z důvodu akumulované energie na cívce, kde proud následně nabije kondenzátor C a pokračuje do zátěže R. Po určité době je opět nutné připojit zdroj DC a dobít energii cívce L.



Obrázek 4.1.1.3 – Blokové schéma Buck-Boost konvertoru

4.1.2 Energy Harvesting

Do češtiny bychom toto slovní spojení mohli přeložit jako sklizení energie z okolního prostředí. Můžeme s klidem říct, že svět okolo nás nabízí obrovské množství energií. Jde jen o to ji správně převést na energii, kterou můžeme dobře zpracovávat. Obvody s funkcí Energy Harvesting se nestarají o převod energie, ale dokáží i z maličkého množství energie vytěžit téměř maximum získatelné energie, někdy se toto v energy harvesting obvodech označuje pojmem MPPT. Na převod z klasických alternativních zdrojů energií můžeme použít solární panel nebo můžeme využít vibrací nějakého zařízení. Další možností je termální energie a jako poslední příklad bych uvedl magnetické pole.

Tabulka 4.1.2.1 – Přehled alternativních zdrojů energie [2]

| Zdroj energie | Typická elektrická impedance | Typické výstupní napětí | Typický výstupní výkon |
|------------------------|---|--|--|
| Světlo | Záleží na osvětlení od $k\Omega$ do desítek $k\Omega$ | DC: 0,5 V až 5 V, záleží na počtu článku v poli solárního panelu | $10\mu W - 1 W$ Záleží na typu panelu a ploše |
| Vibrace | Konstantní impedance $10 k\Omega - 100 k\Omega$ | AC: $x10 V$ | $1 \mu W - 20 mW$ |
| Termální energie | Konstantní impedance $10 \Omega - 100\Omega$ | DC: 10tky mV až 10 V | $0,5 mW - 10 mW$ při $20^\circ C$ |
| Rádiové vlny a indukce | Konstantní impedance, méně než $1 k\Omega$ | AC: 0,5 V až 5 V | Široký rozsah |

Samotná dostupnost alternativního zdroje energie ještě neřeší omezenou nabídku energie. Z toho plyne, že je neustále třeba se snažit zařízení optimalizovat pro provoz s co nejmenším odběrem elektrické energie. Samotné integrované obvody různých výrobců již umí vypínat části čipu tak, aby omezili výkonové ztráty.

4.2 Teorie komunikace 1-Wire

Sběrnice 1-Wire je navržena v 90. letech firmou Dallas Semiconductor, která byla později v roce 2001 koupena firmou Maxim Integrated Products. Byla vyvinuta tak, aby umožňovala připojení několika zařízení a to pomocí jednoho datového vodiče především do mikrokontrolérů. Sběrnice se z rychlého pohledu návrháře jeví jako velmi šikovným řešením otázky pro připojení zařízení a to ať už teploměru či jiného typu senzoru. Firma Maxim IP disponuje velikou škálou SLAVE zařízení. Taktéž sběrnice typu 1-Wire je velmi dobře použitelná v oblasti programování mikrokontrolérů, což ji přidává na její atraktivitě.

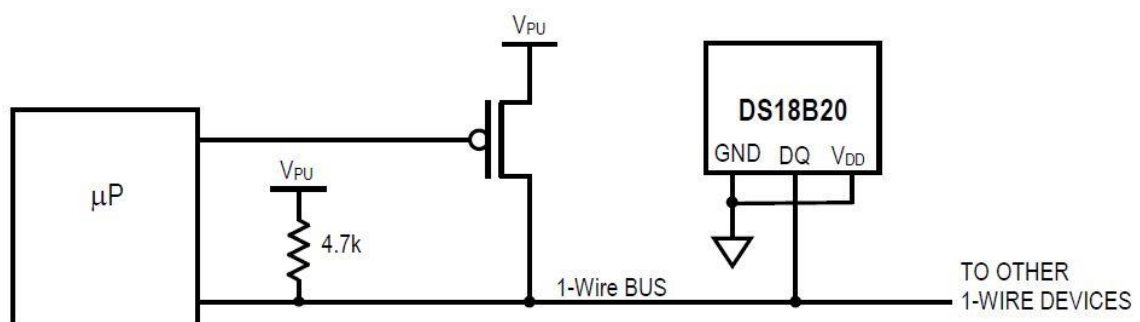
4.2.1 Základní informace

Sběrnice má jeden řídicí obvod pojmenovaný MASTER a jeden či více ovládaných zařízení typu SLAVE. Pro sběrnici je důležité, aby všechny její jednotky byly připojeny na společnou zem GND. Sběrnice používá jeden společný paralelně připojený datový vodič DQ a samozřejmě napájecí vodič, v našem případě značený většinou V_{DD} . Aby se mohly vytvořit logické úrovně 0 a 1, je třeba datový vodič DQ připojit přes odpor 4,7 k Ω na napájecí vodič V_{DD} .

4.2.2 Obecné připojení 1-Wire sběrnice

Parazitní připojení SLAVE zařízení

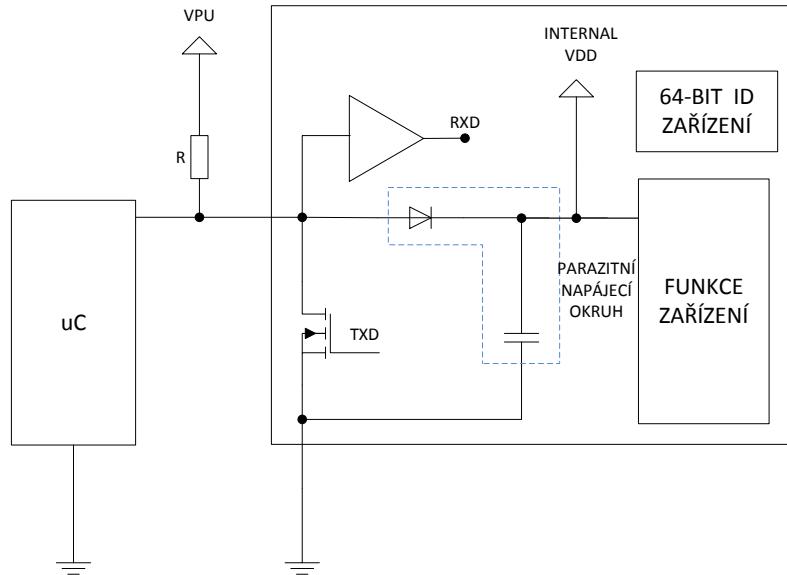
Obrázek 4.2.2.1 ukazuje připojení 1-Wire zařízení k mikrokontroléru způsobem parazitního napájení, kdy V_{DD} a GND vodiče jsou spojeny. [3]



Obrázek 4.2.2.1 – Blokové schéma připojení 1-Wire zařízení k uC v parazitním módu [3]

Při použití této varianty je možné použít tranzistor, který přivádí pomocný proud, pokud by uC nebyl schopen dodat potřebnou energii pro změření dané veličiny. Vnitřní blokové uspořádání je na následujícím obrázku Obrázek 4.2.2.2. Vnitřní kondenzátor se

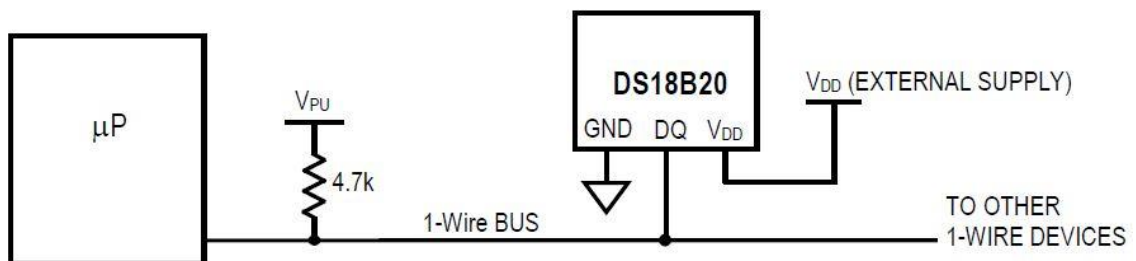
nabije přes diodu a zůstává nabitý. Ve chvíli kdy uC stáhne sběrnici k nule. Se SLAVE zařízení napájí právě z předtím nabitého vnitřního kondenzátoru. Zapojením se dá ušetřit jeden vodič na sběrnici, ale v případě řešení bezdrátového teploměru, kdy se nachází teploměr na desce plošných spojů, toto není nutné a využijí tedy následujícího způsobu připojení SLAVE zařízení k mikrokontroléru.



Obrázek 4.2.2.2 – Vnitřní blokové schéma připojení 1-Wire zařízení k uC v parazitním módu [3]

Připojení SLAVE zařízení v režimu externího napájení

Zařízení na sběrnici 1-Wire viz obrázek 4.2.2.3 je v tomto módu napájeno z externího zdroje. Je praktické použít stejný úroveň napětí jako je pro uC. V našem případě zařízení SLACE potřebuje pro svůj provoz tři vodičové připojení, ale na DPS je toto téměř zanedbatelný problém.



Obrázek 4.2.2.3 – Blokové schéma připojení 1-Wire zařízení k uC s externím napájením [3]

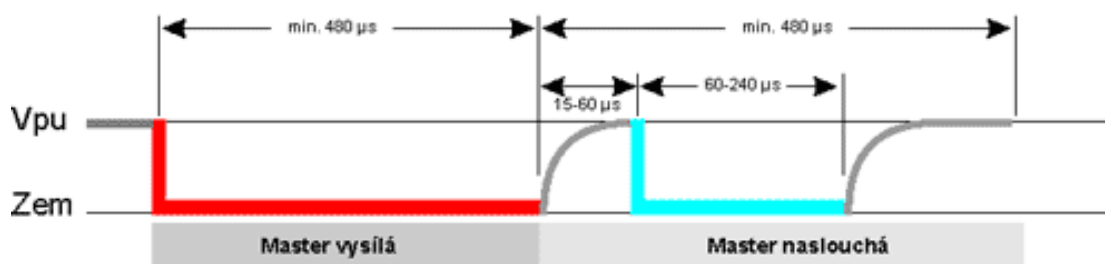
4.2.3 Komunikace

Komunikaci mezi mikrokontrolérem a teploměrem vždy zahajuje strana MASTER (uC) tím, že udělá RESET PULS. Tento příkaz stáhne datový vodič DQ do log 0 a podrží ho v této logické úrovni po dobu minimálně 480 μ s. Pak sběrnici uvolní a naslouchá. Mezitím se přes odpor 4,7 k Ω sběrnice vrátí do log 1 a pokud je právě na sběrnici připojeno nějaké 1-Wire zařízení v našem případě digitální teploměr DS18B20, tak tento puls detekuje a po prodlevě 15-60 μ s stáhne sběrnici na log 0, takto ji podrží po dobu 60-240 μ s. [2] [3]

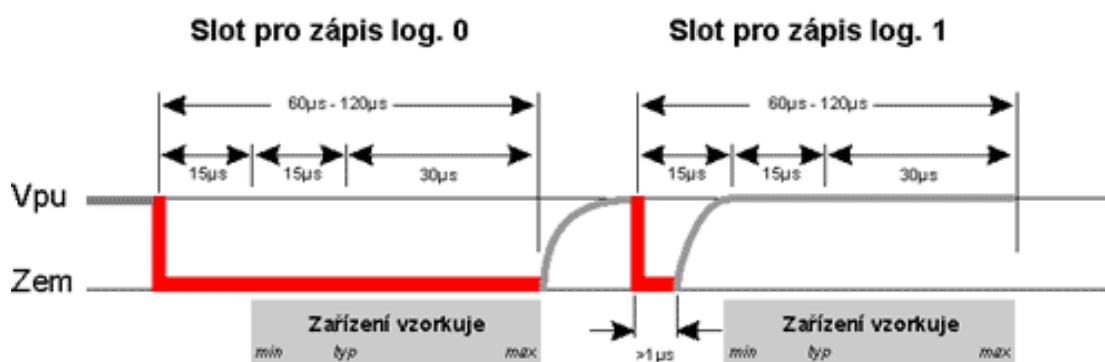
Pokud se zařízení správně ohlásí, MASTER strana začne vysílat a přijímat. Přenášená data jsou vysílána v time slotech tzv. v časových úsecích. Jeden takový slot je dlouhý 60 – 120 μ s a během toho slotu je vyslán anebo přijat jeden bit informace. Povinná časová mezera mezi sloty je 1 μ s a sběrnice je po tuto dobu ponechána v klidu.

Jsou 4 druhy slotů: Zápis 1, Zápis 0, Čtení 1, Čtení 0. Zápisové sloty slouží k tomu, aby MASTER strana vyslala data do zařízení. Zápis 1 probíhá tak, že MASTER stáhne sběrnici k nule, tzv. na log 0 a to po dobu min. 1 μ s a nejpozději do 15 μ s od začátku ji zase uvolní a ponechá uvolněnou. Zdvihací odpor sběrnici vytáhne zpět na log 1. Zápis 0 je o něco jednodušší a to proto, že MASTER uvede sběrnici do log 0 a takto ji ponechá po celý slot, tedy po celých 60 μ s. Zařízení SLAVE vzorkuje stav na datovém vodiči DQ zhruba po 30 μ s po začátku timeslotu. Čtecí sloty opět MASTER inicializuje tím, že stáhne sběrnici na log 0 po dobu 1 μ s a opět ji uvolní. Po tomto zahájení může SLAVE zařízení vyslat 1bit a to buď tím, že ponechá sběrnici v klidu log 1 anebo, že ji stáhne a tj. log 0. Viz následující obrázek 4.2.2.1. [2] [3]

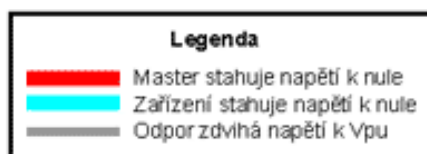
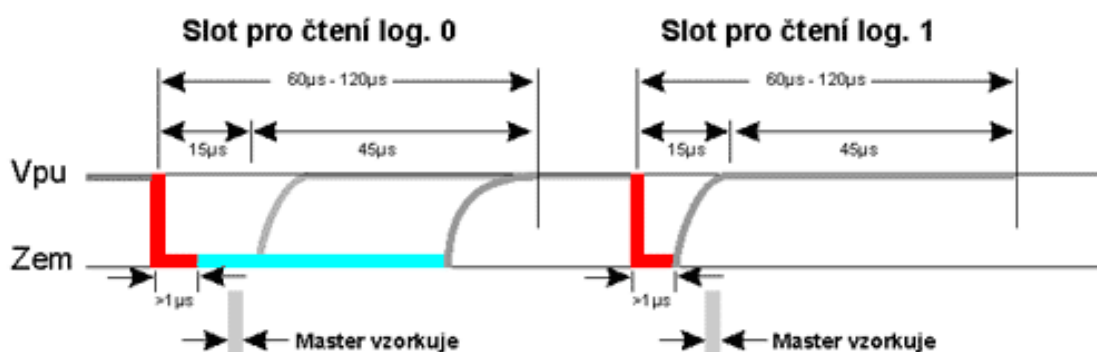
1-Wire™ Reset



1-Wire™ Vysílání dat



1-Wire™ Příjem dat



Obrázek 4.2.3.1: Průběhy na sběrnici 1-Wire [2]

4.2.4 Algoritmus komunikace na sběrnici 1-Wire pokud řídí μC

- **Reset**

Stáhnout sběrnici na 0, počkat 480 μs

Uvolnit sběrnici, počkat 70 μs

Přečíst sběrnici. je-li ve stavu log. 0, je na ní připojeno nějaké zařízení. Pokud je v log 1, žádné zařízení připojeno není.

Počkat 410 μs

- **Zápis log. 1**

Stáhnout sběrnici na 0, počkat 6 μs

Uvolnit sběrnici, počkat 64 μs

- **Zápis log. 0**

Stáhnout sběrnici na 0, počkat 60 μs

Uvolnit sběrnici, počkat 10 μs

- **Čtení**

Stáhnout sběrnici na 0, počkat 6 μs

Uvolnit sběrnici, počkat 9 μs

Přečíst sběrnici. Její stav udává přečtený bit.

Počkat 55 μs

4.3 Teorie sběrnice SPI

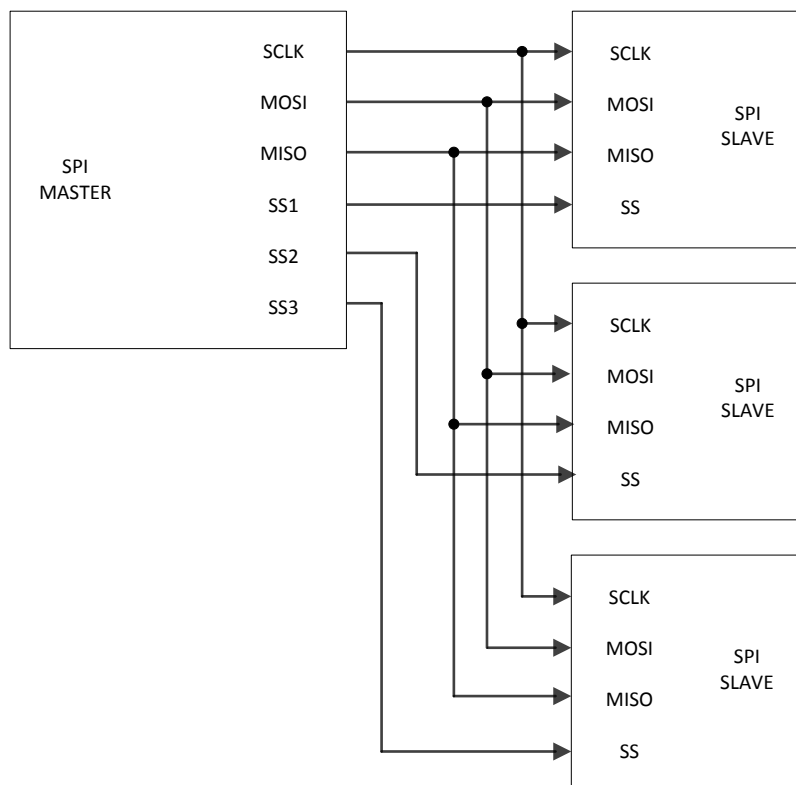
Tato sběrnice externího a sériového charakteru označovaná zkratkou SPI – Seriól Peripheral Interface představuje nedílnou součást širokého spektra digitálních zařízení a to i počítačů. Velká efektivita této sběrnice spočívá v její snadné zakomponovatelnosti. To platí pro hardwarovou tak i po softwarovou stránku věci. V nejjednodušší variantě může přijímací stranu sběrnice SPI představovat běžný posuvný registr, tento registr je dostupný už ve spoustě digitálních obvodů. Sběrnice obdobně jako 1-Wire umožňuje komunikaci mezi dvěma a větším počtem připojených zařízení, tzv. uzlů. SPI sběrnice je na rozdíl od 1-Wire vybavena vodičem, který rozvádí hodinový signál z MASTER do ostatních uzlů. Pracovní frekvence sběrnice může dosahovat až 70MHz, pokud je dobře nastavená, ale standardně se používá 10MHz.

4.3.1 Vlastnosti SPI sběrnice

Sběrnice SPI – Serial Peripheral Interface slouží tedy pro komunikaci 2 či více zařízení, kde je nutné, aby jedna strana byla MASTER a ostatní zařízení na sběrnici typu SLAVE. Uzel v roli MASTER generuje a vysílá do všech ostatních hodinový signál SCK, tímto je umožněn zcela synchronní a navíc obousměrný přenos dat, což sběrnice 1-Wire neumožňuje. Systém SPI sběrnice využívá 4 vodičů.

4.3.2 Druhy vodičů sběrnice SPI

- SCK – vodič rozvádějící hodinový signál z MASTER strany do SLAVE zařízení.
- MISO – Master In, Slave Out – vodič pomocí něj se rozvádějí data ze SLAVE zařízení do MASTER.
- MOSI – Master Out, Slave In - vodič pomocí něj se rozvádějí data z MASTER strany do SLAVE zařízení. MOSI a MISO umožňují obousměrnou komunikaci tzv. full duplex.
- SSEL – SLAVE SELECT – tento poslední vodič slouží k vybrání zařízení na sběrnici, se kterým se bude komunikovat.



Obrázek 4.3.2.1: Zapojení sběrnice [4]

4.3.3 Výhody a nevýhody SPI

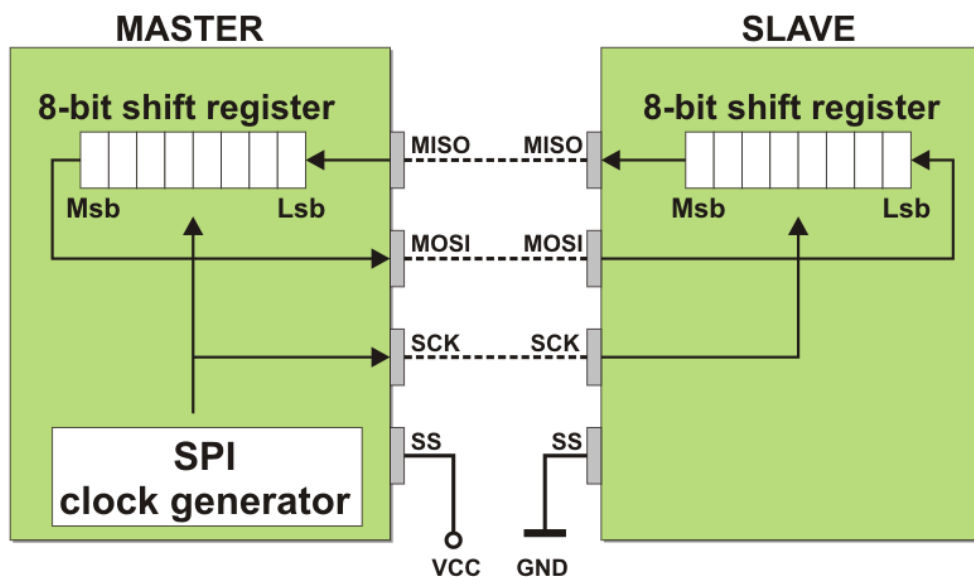
Velkou předností sběrnice SPI je její jednoduchost a díky tomu její lehká implementace do požadovaných obvodů. Jednosměrné piny jsou kompatibilní s technologií TTL, čemuž dnes v číslicové technice odpovídají obvody CMOS. Taktéž přenosový protokol je značen jednoduchý a to proto, že SPI je vlastně několik externě propojených registrů, přičemž právě posun je řízen jednotným hodinovým signálem z SCK vodiče. Dále odpadá nutnost přepínání vodičů z OUT funkce do IN a to z důvodu, že pro obsahuje sběrnice pro komunikaci 2 vodiče.

Mezi záporné vlastnosti sběrnice SPI patří nemožnost mít na sběrnici více než jedno zařízení typu MASTER. Je sice možnost, jak provozovat dvě zařízení jako MASTER, ale vytratí se tím prvky jednoduchosti. Tento systém je pak označován jako multiple master, Dále sběrnice SPI umožňuje přenos pouze na krátké vzdálenosti, toto omezení plyne z nutnosti synchronizace hodinového signálu s přenášenými daty, tzv. shodné zpoždění. Nevýhodou je taktéž to, že pro synchronizaci lze užít z hodinového signálu jak sestupnou hranu, tak vzestupnou hranu. To je důvod proč mnoho mikrořadičů obsahuje konfigurační registry, pomocí nichž je možné zvolit jakým způsobem se má hodinový signál generovat (MASTER strana) anebo interpretovat – SLAVE strana.

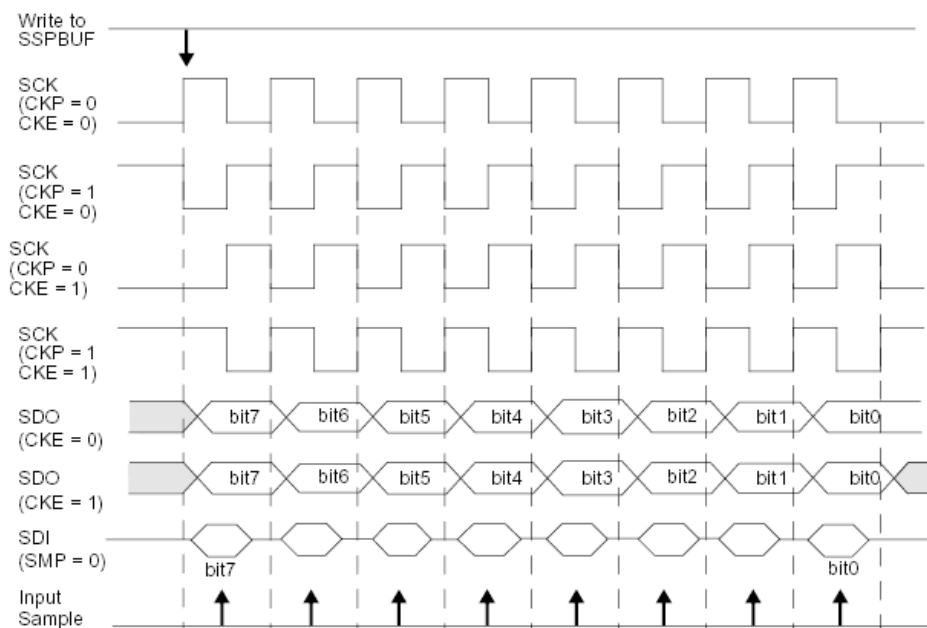
4.3.4 Princip komunikace sběrnice SPI

Dva uzly jsou propojeny pomocí sběrnice SPI. Oba uzly obsahují v tom nejjednodušším případě dva registry a to záchytný registr Seriál Input Buffer SSPBUF a posuvný registr Seriál Shift Register SSPSR. Do registru SSPSR je zapsán přijatý celý bajt (všech 8 bitů). Tento přijatý byte byl korektně přijat, ale ne ještě zpracován uzlem. Z toho plyne, že tento registr slouží jako jednoprvková fronta zabezpečující, že při korektní obsluze nedojde ke ztrátě dat. Posuvný registr SSPSR souží současně k vysílání a přijímání jednoho bitu z celé osmice přenášených bitů – každý posun obsahu tohoto registru doprava znamená, že se vysunutý bit pošle na pin SDO (v případě uzlu typu master se jedná o vodič MOSI) a naopak logická hodnota přečtená na pinu SDI (MISO) je zapsána do nejnižšího bitu posuvného registru. Jeden z uzlů pracuje v režimu MASTER, druhý v režimu SLAVE. Vysílání i přijímání jednoho bitu je nedělitelná operace probíhající vždy ve stejný okamžik. Uzel pracuje v režimu MASTER a tedy generuje hodinové impulzy rozesílané následovně po vodiči SCK. Pomocí hodinových pulzů je prováděna synchronizace vysílání a přijímání, tzv. časy kdy se mění posuvné registry

SSPSR. V obrázku č. 10 jsou zobrazeny 4 možné varianty hodinového signálu. Konfiguračním bitem je CKP, jímž je určena polarita hodinového pulzu, tedy jeho klidová úroveň – iddle, která představuje stav, kdy se neprovádí vysílání dat. CKE určuje, zda se platná data, v době ve které dochází k posunu v posuvném registru, oznamují vzestupnou či sestupnou hranou, tedy 2 možnosti synchronizace. Pro CKP=1 je signál invertován a tím dochází i k otočení smyslu hrany. Z časového diagramu je vidět, že k vysílání i příjmu dat dochází vždy až po ustálení obou datových vodičů (MISO i MOSI), tj. uprostřed bitového intervalu. [4] [5]



Obrázek 4.3.4.1: Princip propojení dvou zařízení pomocí sběrnice SPI [5]



Obrázek 4.3.4.2: Časový diagram průběhů komunikace na sběrnici SPI [4]

4.4 Teorie datového rádiového přenosu

Rádiový komunikační modul představuje elektronický obvod, který pomocí antény vyzařuje elektromagnetický signál. Ten je následně přijímán a zpracován druhou stranou. Rádiové moduly jsou od výrobců navrženy tak, aby byly dobře kompatibilní s úrovněmi logických obvodů. Nejčastěji se jedná o úrovně TTL nebo 3,3V. Tyto rádiové moduly jsou vyráběny univerzálním způsobem, to znamená, že celistvý obvod může fungovat jak přijímací stran, tak i jako vysílací. Nejvíce se dodává na trh zařízení, jež umožňují poloduplexní provoz. Stav kdy jedna strana vysílá a druhá naslouchá, poté se situace otočí, ale není to podmínkou. Dnes lze zakoupit i taková řešení, jež umožňují fullduplexní provoz, tedy kdy mohou komunikovat obě strany naráz. Požadovanou vlastnost pak už vybírá návrhář.

4.4.1 Rádiový modul

Je zařízení, jež neobsahuje digitální (procesorovou) část. Nestará se o úpravu přenášených dat mezi zúčastněnými stranami. O tuto část se stará v celkovém obvodu mikrokontrolér.[7] Tento způsob řešení má svoje velké výhody v univerzálnosti. Návrhář obvodu má možnost si přizpůsobit komunikaci obrazu svému, jelikož není omezen předem určeným a daným formátem dat, způsobem řešení zabezpečení, jeho časováním nebo použitým kódováním a formátem adresace.

4.5 Teorie ZigBee

ZigBee je jednoduchý komunikační standart umožňující komunikaci na stovkách metrů a to i s nízkou spotřebou energie. To umožňuje široké uplatnění v oblasti řízení budov, průmyslových objektů a domácnostech. Jako zdroj energie je možno využít bateriové napájení, které za určitých podmínek je schopno vydržet od 100-1000 dní, v některých případech se lze dostat i na větší hodnoty. To je obrovská výhoda pro bezdrátové senzory. ZigBee technologie je poměrně mladá. Vznikla roku 2004 a snaží se vyplnit mezeru mezi technologiemi Bluetooth a WIFI, ne všude se totiž, tyto již dlouhodobě používané technologie dají efektivně využívat. Dost často právě limituje spotřeba energie anebo až zbytečně velká přenosová rychlost. ZigBee se dá označit jako jakýsi „hybrid“ těchto dvou technologií. Využívá stejně jako Bluetooth a WIFI volných frekvencí, u ZigBee to je frekvenční pásmo 2,4GHz pro celosvětové používání.

4.5.1 Vlastnosti ZigBee

Hlavní vlastností ZigBee je minimální odběr energie jak u přijímače, tak i u vysílače. Využívá se možnosti usnutí koncové stanice. Proto je jeho obrovské využití pro bateriově napájené aplikace a i přes malý odběr dosahuje účinná komunikace velké vzdálenosti. Možnou nevýhodou je malá přenosová rychlost, ale ta je pro drtivou většinu aplikací dostatečná, např. přenos teploty ze snímače, logické úrovně pro spínače apod. ZigBee se snaží nahradit již dávno zaběhlou RS-232, se kterou má sice podobnou přenosovou rychlost, ale odpadá potřeba kabeláže. Další výbornou vlastností je téměř neomezený počet stanic v síti ZigBee, ten se teoretický dá navýšit až na 2^{64} uzlů v síti.

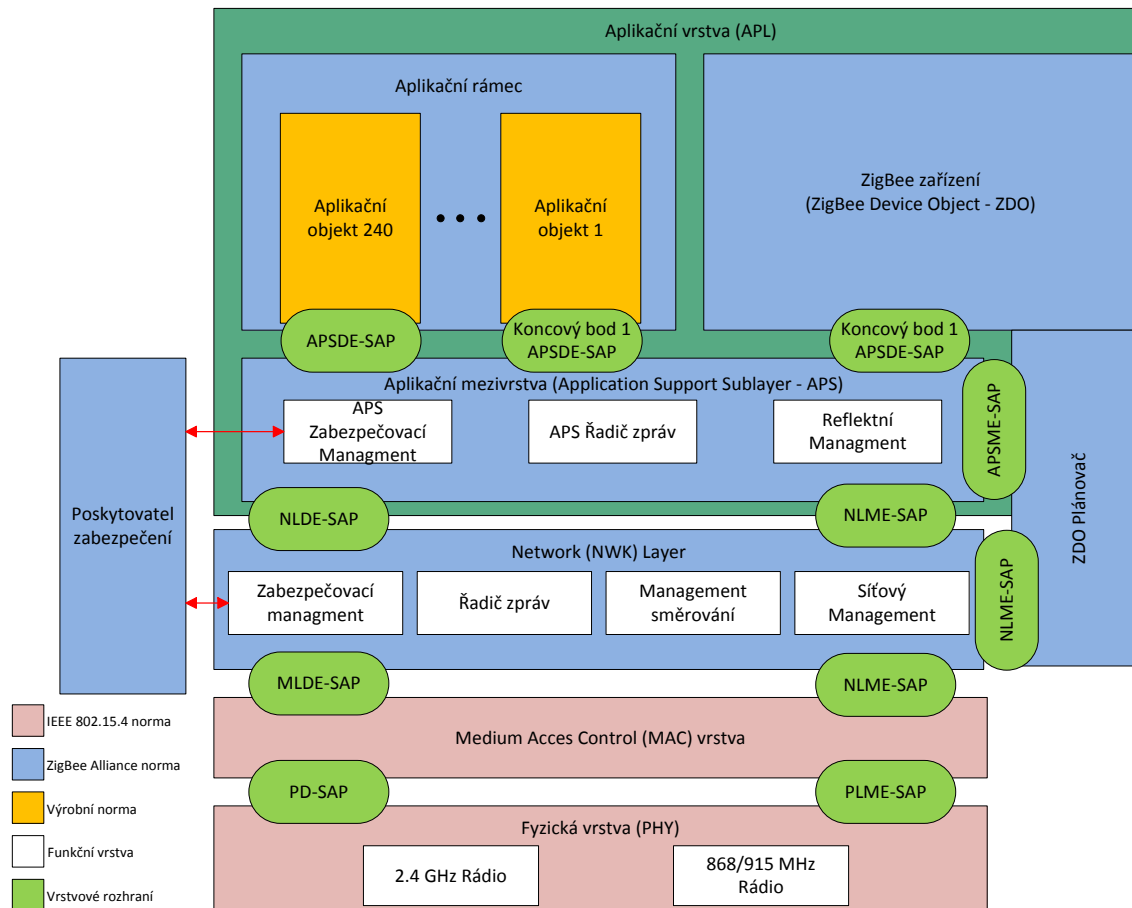
Srovnání s ostatními bezdrátovými technologiemi

Tabulka 4.5.1.1: Tabulka porovnání oproti ostatním bezdrátovým komunikačním technologiím [6]

| Obchodní jméno | GPRS/GSM | Wi-Fi | Bluetooth | ZigBee |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------------|
| Standart | 1xRTT/CDMA | 802.1b | 802.15.1 | 802.15.4 |
| Aplikační zaměření | Široké oblasti, hlas, data | Web, email, video | Náhrada za kabel | Monitorování a řízení |
| Systémové zdroje (paměť) | 16 MB a více | 1 MB a více | 250 kB a více | 4 – 32 kB |
| Životnost baterií (dny) | 1-7 | 0,5 – 5 | 1 – 7 | 100 – 1000 i více |
| Max počet uzlů v síti | 1 | 32 | 7 | 65 536 |
| Přenosová rychlost (kB/s) | 65 – 128 | 11 000 | 720 | 20 – 250 |
| Komunikační dosah (m) | 1000 i více | 1 – 100 | 1 – 10 | 1 – 100 |
| Výhody | Dosažitelnost, kvalita | Rychlost, flexibilita | Cena, jednoduchost | Spolehlivost, výkon/cena |

4.5.2 Struktura komunikačního standardu ZigBee a popis ZigBee

Komunikační protokol se skládá ze tří základních vrstev, vrstvy standardu IEEE 802.15.4, síťové (NWK) a aplikační (APL).



Obrázek 4.5.2.1: Model komunikačního protokolu ZigBee [12]

Začneme vrstvou N, ta poskytuje služby vrstvě N+1 a zároveň sama využívá služeb jí poskytovaných vrstvou N-1. Aby byla možná výměna dat při vertikální komunikaci, tak je nutno definovat rozhraní mezi jednotlivými vrstvami. Toto rozhraní mezi jednotlivými vrstvami se nazývá SAP (Service Access Point), tzv. přístupový bod ke službě. Každý SAP musí disponovat důležitou vlastností, zde je to schopnost poskytovat služby většímu počtu vrstev stejné úrovně, to znamená paralelně a nezávisle více instancím vrstvy (N+1).[6]

4.5.3 IEE 802.15.4

Úplně nejnižší vrstvou je IEEE 802.15.4-2003, standart ZigBee definuje dvě spodní vrstvy:

- Fyzická vrstvu (PHY)
- MAC vrstva

Fyzická vrstva

Tato vrstva umožňuje pracovat na dvou frekvencích: 868/915 MHz a 2,4GHz. První frekvence je určena pro evropský trh a druhá 915MHz je určena USA spolu s Austrálií. Společnou frekvencí pro svět je 2,4GHz. To umožňuje určitou kompatibilitu zařízení. Komunikace ZigBee využívá O-QPSK a BPSK, fázové modulace.

O-QPSK – Offsetové kvadrurní klíčování fázovým posuvem, je to varianta klíčování fázovým posuvem.

BPSK – Binární klíčování fázovým posuvem, signál je otáčen o 180° k reprezentování binární 1, pokud signál není otočen, představuje binární 0.

Signál je přenášen prostřednictvím DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), obdobně jako u klasické domácí sítě WIFI.

4.5.4 Fyzická vrstva

Přidělené rádiová pásma

Tabulka 4.5.4.1: Tabulka definovaných rádiových pásem, modulací a čísel kanálů [6]

| Frekvenční pásmo (MHz) | Datová rychlost (Kbps) | Symbolová rychlost (symb/s) | Modulace (-) | Číslo kanálu (-) |
|------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------|------------------|
| 868 | 20 | 20 | BPSK | 0 |
| 915 | 40 | 40 | BPSK | 1 – 10 |
| 2400 | 250 | 62,5 | O-QPSK | 11 – 26 |
| 868 | 250 | 12.5 | ASK | 1 |
| 915 | 250 | 50 | ASK | 1 – 10 |
| 868 | 100 | 25 | O-QPSK | 0 |
| 915 | 250 | 62.5 | O-QPSK | 1 - 10 |

4.5.5 MAC vrstva

Tato vrstva řídí přístup k vysílacímu kanálu, kde se využívá metody CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance and optional time slotting). Dále MAC vrstva vymezuje pravidla komunikace mezi jednotlivými zařízeními prostřednictvím rámců. Jsou to tyto čtyři:

- Data Frame – rámeček používaný pro přenos dat
- Beacon Frame – rámeček generovaný koordinátorem k synchronizaci zařízení
- MAC Command Frame – rámeček k centralizovanému konfigurování, nastavení a řízení klientských zařízení
- Acknowledgement Frame – rámeček sloužící jako potvrzovací informace

4.5.6 Síťová vrstva NWK

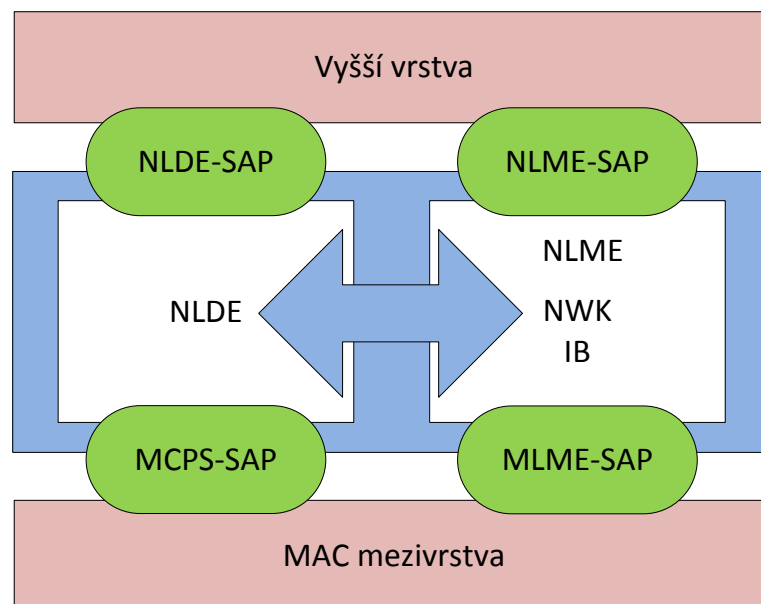
Síťová vrstva se vyskytuje mezi MAC a aplikační vrstvou APS. Poskytuje směrování a stanovuje topologii sítě, viz níže. Startuje síť, přiřazuje uzlové adresy, nastavuje nové zařízení. Tato vrstva obsahuje informace nutné pro správu sítě a se skládá ze dvou služeb: NLDE (Network Layer Data Entity) a NLME (Network Layer Management Entity). Dále obsahuje NIB (NWK Information Base), která obsahuje síťové atributy.

NLDE

Služba poskytuje datový servis aplikační vrstvě APS a to pro přenos dat mezi dvěma a více zařízeními, jež se nachází v jedné síti. Vytváří takzvaný APDU (aplikační protokol datových jednotek), což znamená zajistit správnou cestou dat k cílovému zařízení. To se může provést přímo, anebo pokud síť obsahuje směrovače, tak s jejich pomocí.

NLME

Tato služba je zodpovědná za nastavení nových zařízení v síti, spouštění sítě, routing, záznam cesty přenosu pro pozdější zefektivnění přenosu, adresování zařízení v síti, připojení a odpojení sítě.



Obrázek 4.5.6.1: Model vnitřní komunikace v ZigBee [8]

Síťová vrstva dále rozlišuje 3 druhy uzlů:

- Síťový koordinátor, který je typu FFD (Full Function Device)
- Síťový směrovač, také typu FFD
- Koncové zařízení, obvykle typu RFD (Reduced Function Device). Tento uzel disponuje omezeným provozem a proto je energeticky méně náročný, ale není to pravidlem

4.5.7 Aplikační vrstva APL

Aplikační vrstva obsahuje čtyři následující části:

- Uživatelského programu
- Aplikační pomocné podvrstvy
- ZDO (ZigBee Device Object)
- Uživatelských aplikačních objektů

Aplikační podvrstva APS

Tato podvrstva obsahuje záznam o propojení s dalšími prvky sensorové sítě, přímo o propojení dvou zařízení. Toto je uloženo v párovacích tabulkách - Binding a závislosti na jejich parametrech a podporovaných službách přeposílá zprávy dalším zařízením. Díky tomuto způsobu ZigBee umožňuje multiskokovou komunikaci, tedy že není třeba posílat data přímo z koncového stupně do jednoho sběrného bodu, ale lze data poslat skrz více uzlů a tím snížit jak energetickou náročnost koncového uzlu, tak zvýšit rozsah pokrytí sensorové sítě.

ZigBee Device Object ZDO

Tato část zajišťuje přesnou roli zařízení v síti. Zařízení může být jedním z následujících 3 typů a to: Koordinátor, Router anebo Koncovým prvkem. Dále vytváří a odpovídá na žádost o spojení mezi zařízeními, zřizuje zabezpečené spojení mezi dvěma prvky sítě, také zajišťuje hledání v síti a spravuje používané zabezpečovací klíče.

C - Koordinátor

- Zajišťuje založení a nastavení sítě
- Vybírá komunikační kanál a PANID sítě
- Přijímá požadavky na připojení a v případě šifrování sdílí zabezpečovací klíče
- V síti může existovat pouze jeden
- Z energetického hlediska vyžaduje neustále napájení

FFD – Full Functional Device – Router

- Zajišťuje rozšíření sítě na vyšší počet prvků
- Síť může obsahovat více zařízení typu Router
- Vyžaduje neustálé napájení
- Může pracovat i jako koncové zařízení
- Není určen pro provoz ve spánku

RFD – Reduced Functional Device

- Koncový prvek sítě
- Koncový člen sítě, který může posílat a přijímat data pouze od svého „rodiče“
- Jediný prvek, jenž může být uspán pro snížení spotřebované energie, tedy může být bateriově napájený

Uživatelské aplikační objekty

Tyto objekty implementují do sítě konkrétní požadavky pro aplikaci. Nazývají se ZigBee Aplikační profily. Tyto profily definují typy použitých zařízení, jejich typy zpráv a formáty. Profil obsahuje 16-ti bitové identifikační číslo, jež přiděluje ZigBee Alliance. Aplikační profil představuje dohodu o formátech zpráv a akcích, to proto, že to umožní zařízení od jiných výrobců komunikovat mezi sebou. Tímto se zajistí kompatibilita. Před uvedením na trh musí zařízení vyhovovat danému profilu, ve kterém bude fungovat. ZigBee Alliance rozděluje tyto profily na dva hlavní: Průmyslový specifický a veřejný. Veřejné profily pokrývají základní využití technologie v různých oborech. Základní specifikace si definuje výrobce sám, ale jeho výsledný profil musí projít schválením. Dále jsou uvedeny současné ZigBee profily:

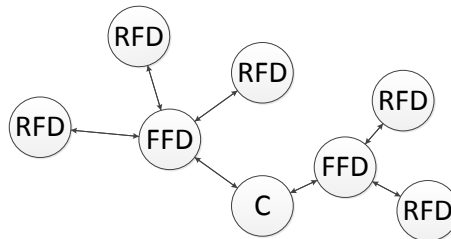
- ZigBee Building Automation (pro komerční použití v ovládání budov)
- ZigBee Remote Control (náhrada za infračervených dálkových ovladačů)
- ZigBee Smart Energy (vysoce úsporné projekty)
- ZigBee Health Care (pro nekritické služby ve zdravotnictví a v oblasti fitness či péči o chronicky nemocné. Profil vyhovuje standardu ISO/IEEE 11073. Typická zařízení jsou měřiče cukru či informativní EKG)
- ZigBee Home Automation (domácí automatizaci dostupné pro inteligentní dům jako je automatické rolování žaluzií, osvětlení, otevírání garážových vrat atd.)
- ZigBee Input Device (využití ZigBee technologie v ovládacích prvcích pro osobní počítače)
- ZigBee Telecom Services (pro služby typu placení či lokalizace pomocí mobilních telefonů v budovách. Předpokládá se, že telefon bude mít speciální ZigBee SIM kartu)
- ZigBee 3D Sync (pro bezdrátové brýle pro sledování 3D videa)
- ZigBee Retail Services (chytré monitorování, kontroly a automatizace objednávk a doručení zboží)

4.5.8 Topologie ZigBee sítě

Jde o síť PAN, jež se dělí na tři různé síťové topologie:

Strom

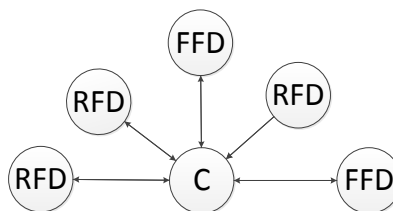
Topologie je určena především k přiřazování adres, jelikož poskytuje výhody k aplikaci metod na vyhledávání spojů mezi vždy jedním níže a jedním výše postaveným prvkem v síti. Viz obrázek 4.5.8.1. [6]



Obrázek 4.5.8.1: Topologie strom v síti ZigBee [6]

Hvězdicová - topologie typu MESH

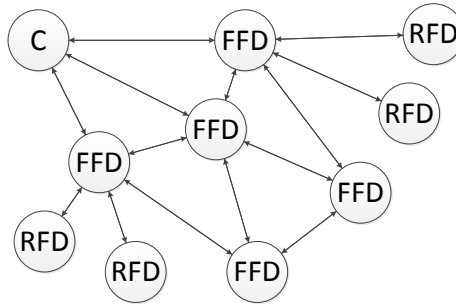
Tato síť využívá většinou krátkých vzdáleností. Je to levnější varianta, ale v prostorech se špatným šířením signálu je nevyhovující. Viz obrázek 4.5.8.2. [6]



Obrázek 4.5.8.2: Topologie strom v síti ZigBee [6]

Libovolně stavěná síť typu MESH

Zde lze využít možnosti topologie MESH a to, že pokud data nemohou být bezpečně doručena jednou cestou, lze je poslat jinou, tedy využít jiných směrovačů. Lze díky tomuto stylu komunikace zvýšit dosah sítě anebo ji využít v prostorech se špatným šířením signálu. Viz obrázek 4.5.8.3. [6]



Obrázek 4.5.8.1: Topologie strom v síti ZigBee [6]

4.5.9 Zabezpečení

Rámce bezpečnostního charakteru v síti nezaručují pouze jen ochranu dat v datových rámcích, ale taktéž i příslušné nástroje, které jsou použity k zajištění MAC řídicích, signálních a potvrzovacích rámců. Jako základ slouží buď 64bitový anebo 128bitový šifrovací algoritmus AES – Advanced Encryption Standard. Řízení tohoto procesu náleží síťové vrstvě NWK, která nastavuje klíče a zabezpečení. MAC vrstva získává poté od NWK klíč a použije jej na rámce. Zda je bezpečnostní mechanismus použit se pozná podle MAC hlavičky. Data jsou zakódována a doplněna podle zvolené úrovně dalšími bezpečnostními nástroji, které generují příslušné doplňkové rámce a data čím se mění rámcová číslovací sekvence. [6]

4.6 Teorie elektrických teploměrů

Teploměr je zařízení, jež převádí teplotní údaj daného předmětu, média apod. na elektricky zpracovatelný signál. Výběr teploměrů na trhu je obrovský.. Je to z důvodu, že se kladou různé požadavky na měření teploty. Může nastat situace, kdy je nutné měřit teplotu bezkontaktně, například při měření povrchu, který dosahuje i teploty několika stovek 100 °C. Jsou i teploměry pro takto teploty vyšší než 1000 °C. Je možné využít termočlánek. Základní rozdělení teploměrů se dá vzít podle fyzikálního principu.

Rozdělení teploměru:

- Odporové – kovové, polovodiče
- Polovodičové s P-N přechodem – dioda (Si, Ge, GaAs, varikap, ZD) tranzistor (bipolární, unipolární)
- Termoelektrické – kovové, polovodičové
- Optické
- Dilatační

Teploměr jako celek může obsahovat vyhodnocovací logiku a poté se jedná o integrovaný obvod s digitálním výstupem nebo se se dá použít klasický teploměr, jehož výstup je čistě analogový. Zde bývá výstup většinou napětí, např. 1°C představuje přírůstek 10mV. Poté je nutné toto napětí zpracovat. Pokud je ve výsledném obvodu již mikrokontrolér, tak je právě nejlepší volbou na jeho vyhodnocení.

4.6.1 Analogové teploměry

Tyto teploměry i přesto, že mají analogový výstup, stále tvoří nezanedbatelnou část trhu. V práci se nejčastěji setkávám s Pt1000. Jedná se o odporové teploměry v tomto případě s využití platiny. Připojují se na výstup řídicí jednotky, v našem případě mikrokontroléru, který obsahuje potřebný A/D převodník. Další častou metodou získání teploty je využití přechodu P-N. Při stoupaní teploty se zvyšuje napětí na diodě v určitém poměru, kde se jedná o úbytek napětí mezi bází a emitorem tranzistoru, kdy s rostoucí teplotou se tranzistor „otvírá dřív“. Pokud se toto napětí zesílí, lze jednoduše vygenerovat analogový signál, který je přímo úměrný teplotě. Výhoda těchto čidel je, že jsou poměrně levná a stále přesná, dále, že nepotřebují kalibraci.

4.6.2 Digitální teploměry

Číslicové teploměry mají svoji výhodou v tom, že odpadá nutnost A/D převodníku, jelikož součástí teploměru je i číslicová logika. Ta dává na výstup údaje o teplotě v binární podobě. Princip snímání teploty je takový, že uvnitř čidla, se neházejí dva oscilátory, kde jeden z nich disponuje nízkým teplotním koeficientem frekvence a druhý naopak vysokým. Mikrokontrolér zadá příkaz pro převod teploty senzoru a digitální teploměr spustí čítání obou těchto oscilátorů. Doba převodu teploty záleží na zvolené přesnosti. Například u teploměru DS18B20 může tato doba dosahovat až 700 ms, kde je výsledkem 12b hodnota odpovídající aktuální teplotě. Ta se uloží ve vnitřních registrech teplotního čidla, kde je následně vyčtena mikrokontrolérem. Komunikace probíhá po standardizovaných sběrnicích. Nejčastěji se používá již

v předchozí části kapitoly vysvětlená sběrnice 1-Wire, ale toto není zásadou. Hojně se využívá sběrnice I2C nebo SPI. Toto vybrání náleží návrhářovi anebo podmínkám řešení.

4.7 Základy mikrokontrolérů

Mikrokontrolér neboli taky uC je elektronická součástka nejčastěji v podobě integrovaného obvodu. Tento IC obvod je navržen tak, aby umožňoval nahradit široké spektrum obvodů. Například A/D a D/A převodníky, časovače, paměti, sekvenční obvody, komunikační obvody, čítače, spínače atd. Dříve bylo nutné tyto obvody vytvořit z diskretních součástek. To ovšem znamenalo potřebu velkého místa pro dostatečně velkou desku plošných spojů anebo prostor pro jiné zařízení. Díky všemožným integrovaným najde uC uplatnění všude. Dnes už i jednoduché hračky pro děti obsahují mikrokontroléry. V průmyslu jako je automobilový, strojní, atd. už ani nemluvě. Mikrokontroléry obsahují nepřehledné množství funkcí a vyplatí se takto vyrábět, i když je koncový uživatel všechny nevyužije. Je to odůvodněno výslednou ekonomickou úsporou při výrobě, jež umožňuje takto „nadupaný“ čip prodávat stále za malou cenu.

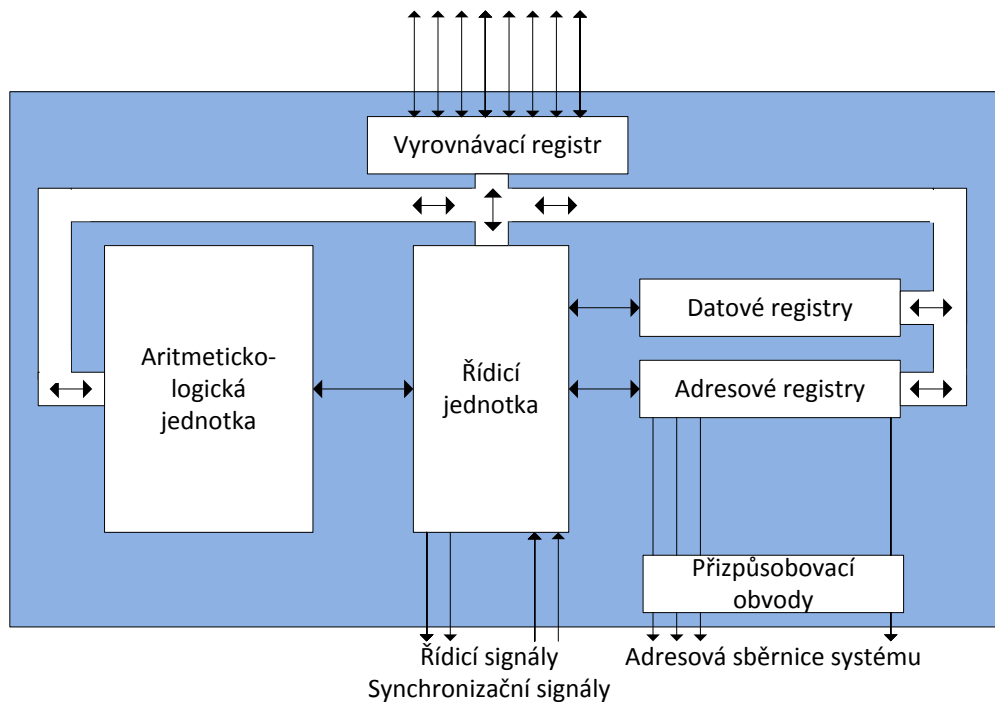
4.7.1 Výhody mikrokontrolérů

- Vysoká spolehlivost – jejich velká odolnost proti vysokým a nízkým teplotám, nárazů, proti výpadku napájení
- Malá spotřeba oproti diskretním obvodům
- Možnost pracovat v reálném čase
- Znatelně malé rozměry [9]

4.7.2 Koncepce mikrokontrolérů

Mikrokontrolér vzniká sdružením všech částí mikropočítače (řídící jednotka, paměť RAM, ROM, I/O, čítač/časovač a jiné periferie) na čip. Základní struktura se skládá z ALU. Její taktovací kmitočet bývá v rozmezí jednotek až stovek MHz. Operační paměť se liší dle kusu, ale vesměs se dá říct, že je od jednotek až po desítky kB. Rovněž je nutná instrukční paměť, ta se nabízí typu ROM, EPROM, EEPROM nebo flash a dosahuje řádově až stovek kB. Celý mikrokontrolér je nutno obrazně řečeno něčím rozhýbat, pro tuto činnost je zde základní interní RC oscilátor, ale nedosahuje velké přesnosti. Proto se k uC připojuje hlavní krystalový oscilátor. Dále bývá možnost doplnit mikrokontrolér o přesný oscilátor typu 32.768 kHz[12], který

slouží pro interní hodiny reálného času. Rovněž uC obsahuje I/O rozhraní, jež právě umožňují komunikaci s ostatními perifériemi.

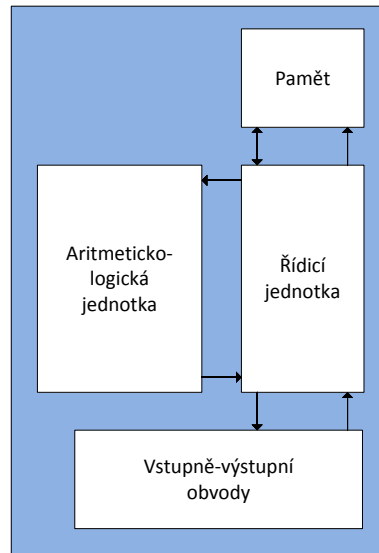


Obrázek 4.7.2.1: Obecné schéma mikroprocesoru [12]

Mikropočítače se můžeme rozdělit podle jejich architektury na dvě základní koncepce. Von Neumannovu a Harvardskou. Jejich dělení je však při dnešním stupni integrace již poněkud akademické. U moderních architektur se často uživateli adresový prostor jeví navenek jako lineární (Von Neumannovský), zatímco fyzicky jsou paměti k jádru připojeny pomocí několika nezávislých sběrnic (např. jedna sběrnice pro FLASH/ROM (paměť programu), druhá pro uživatelskou vnitřní RAM a zásobník, třetí pro připojení integrovaných paměťově mapovaných periférií, další pro připojení externí RAM.

Von Neumannova architektura

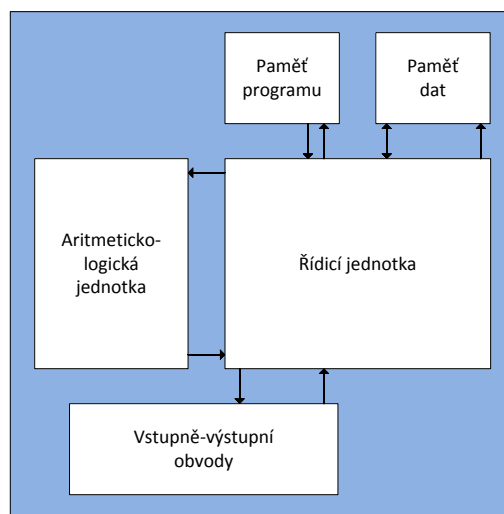
Tato architektura obsahuje základní bloky mikropočítače. Disponuje společnou pamětí pro data a instrukce. Z toho plyne, že zpracovávání musí být sekvenční. Toho dneska využívají především počítače typu x86, v domácnostech používané stolní počítače.



Obrázek 4.7.2.2: Obecné schéma Von Neumannovy architektury [12]

Harvardská architektura

Tato architektura historicky navazuje na předešlou, je však upravena o některé nedostatky. Nemůže už přepsat svůj řídicí program, to je způsobeno tím, že paměť je rozdělena na programovou a datovou. Musí se využít dvě sběrnice. Tuto architekturu využívá většina mikrokontrolérů.



Obrázek 4.7.2.2: Obecné schéma Harvardské architektury [12]

Dělení podle instrukční sady

RICS a CISC představují názvy pro dvě rozdílné architektury procesorů. Ty se odlišují od sebe vykonáváním instrukcí a velikostí instrukčního souboru.

CISC

Tato zkratka znamená Complex Instruction Set Computer, což se dá přeložit jako procesor s velkou sadou instrukcí a to až řádově stovek. Dále obsahuje malý počet registrů, obvykle toto číslo nepřesahuje 30. Rozdíl oproti RISC je, že jsou instrukce u CISC různě dlouhé, z toho plyne, že i vykonávání těchto instrukcí je různě dlouhé. Tuto sadu lze běžně vidět na domácích počítačích, které využívají architekturu x86.

RISC

Jedná se o koncepci procesorů s redukováným souborem instrukcí (Reduced Instruction Set Computer), je založen hlavně na jednoduchých instrukcích. Oproti CISC je délka provádění jedné instrukce vždy jeden cyklus. Tyto instrukce jsou implementovány na procesoru. Tím dochází ke zrychlení procesoru a celého zařízení. Tento způsob využívají mikrokontroléry PIC firmy Microchip. [12]

5 Výběr vhodných součástek

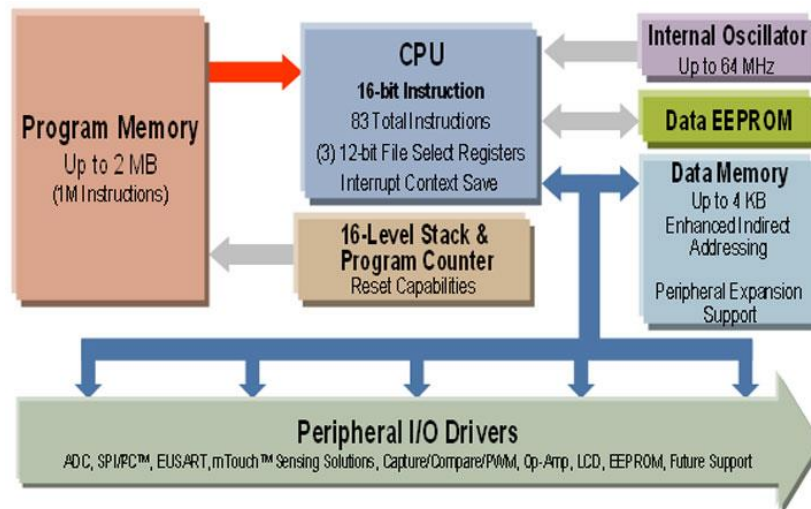
Při výběru součástek na zařízení jsem se řídil svými zkušenostmi z předchozích let, kdy jsem stavěl různé zařízení doma anebo ze střední školy. Do výběrového pohledu jsem i zužitkoval nově nabyté informace z FELu. Bohužel střední škola skončila pro mě tím, že jsem znal součástky jako stabilizátory, tranzistory, časové obvody, sáhnul jsem si i na mikrokontroléry, ale v jazyce assembler to bylo s nadsázkou řečeno peklo. Zde na FELu jsem se seznámil výbornými integrovanými obvody. Zároveň nám bylo vysvětlováno, že znovuobjevením Ameriky, už díru do světa neuděláme. To můj výběr obrátilo směrem k nabízeným produktům zahraničních firem jako je MAXIM IP, Texas Instruments, Linear Technology apod. Dále jsme se naučili v předmětu IAE, že nám do hlavy vyceповané prodejny elektrosoučástek GES a GME neznamení vše. A že při srovnání s ostatními na žebříčku nabídnutých služeb, se umísťují někde okolo první příčky žebříku, ne-li blíže země. E-shop společnosti TME mi umožnil krásně vyfiltrovat součástky přesně dle mých požadavků a ještě mi nabídnul podobné produkty v dané kategorii.

5.1 Výběr řídicí jednotky

Řídicí jednotka bude srdcem celého provozu bezdrátového teploměru, proto její výběr byl velmi důležitou částí. Už před nástupem na FEL jsem si osahal mikrokontroléry od firmy Microchip a po absolvování předmětu Mikrokontroléry byla moje volba více než jasná. Rodina uC PIC představuje mikrokontroléry založené na Harvardské koncepci.

5.1.1 Mikrokontrolér PIC18F25J11

Rodina 8 bitových uC poskytuje dodatečný výkon pro zařízení. Dalšími požadovanými vlastnostmi jsou funkce na omezení spotřeby energie, jež tato řada pojmenovaná nanoWatt XLP disponuje. To ve výsledku uspoří značnou část spotřebované energie, kde se navíc dá použít vnitřní RC oscilátor.



Obrázek 5.1.1.1: Vnitřní uspořádání PIC řady PIC18 [14]

Důvodem pro výběr tohoto μC byla jeho nízká energetická náročnost. Mikrokontrolér disponuje čtyřmi druhy běhu, kdy mód Deep Sleep přeložen jako hluboký spánek, odebírá pouze 13nA. Ovšem na veletrhu v Norimberku, který nám zařídila katedra mikroelektroniky, jsme se při konzultaci se zástupcem Microchipu dozvěděli, že každý pin mikrokontroléru může odebírat proud a ten je větší než 13nA a že změřit takto malý proud už je velice obtížné. Tedy že výrobci toto číslo počítají a spíše se jedná o marketingový tah, než o reálné údaje. Ale tuto informaci jsem se dozvěděl až po vybrání uC. I přes toto zjištění nebylo důvodu měnit tuto součástku, protože jsem byl ujistěn, že odběr je velmi malý. Další důležitým parametrem pro zapojení bylo přítomnost reálných hodin. Řada 18FxxJxx jí disponuje a výrobce ji označuje anglickou zkratkou RTCC (Real Time Clock and Calendar). [15] Tato vnitřní periférie umožňuje běh hodin reálného času i při Deep Sleep módu, to RTCC umožňuje nastavit přerušení, které pak v závislosti na konfiguraci uživatele probudí uC z hlubokého spánku a vykoná program. Taktéž je nutné, aby mikrokontrolér umožňoval komunikaci s ostatními zařízeními na desce plošných spojů. V našem případě se jedná o sběrnice 1-Wire a SPI. Řada PIC18F disponuje těmito vlastnostmi, dá se pomalu říci, že téměř celé portfolio PIC18 obsahuje vnitřní obvody pro komunikaci po standardních

sběrnicích. Pro výrobce to není nic těžkého při výrobě uC. To samé platí pro zbytek výbavy mikrokontroléru v otázce A/D převodníků, časovačů apod.

5.2 Výběr teploměru

Při výběru teploměru jsem se řídil zkušenostmi se zařízeními. Rukama mi prošel digitální teploměr od firmy MAXIM IP DS18S20. Tato součástka komunikuje po sběrnice 1-Wire, která vyčnívá svojí jednoduchostí. Dalším plusem pro tento teploměr je podpora vývojového prostředí, tedy implementované knihovny. Není třeba dokazovat, že jde napsat knihovnu na komunikaci, když už ji vývojové prostředí obsahuje. Tento teploměr má teplotní rozsah od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. To je pro měření teploty v naší republice uspokojivé. A horní mez teplot, no řekněme si rovnou, že to se při měření vzduchu v místnosti moc nevyužije. [19]

5.2.1 DS18B20

V průběhu prací, jsem tento teploměr vyměnil za obdobný, za DS18B20. Ten umožňuje lepší přesnost. Prvně vybraný teploměr dosahoval opravdu jen přesnosti $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. To mi příliš nevyhovovalo, takže jsem vybral jiný. DS18B20 umožňuje naprogramovat svoji přesnost měření, tzv. rozlišení. To se pohybuje od $0,5 - 0,0625\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při maximální rozlišení se doba převodu protáhne na 750 ms. Teploměr je možné napájet v rozmezí 3 – 5,5 V. [16] Součástka disponuje i funkcí termostatu, kde se do paměti EEPROM uloží požadovaná hodnota sepnutí, ale tuto funkci jsem nepotřeboval. Celý teploměr s integrovanými obvody je zapouzdřen to standardního pouzdra TO-92.

5.3 Výběr správce napájení

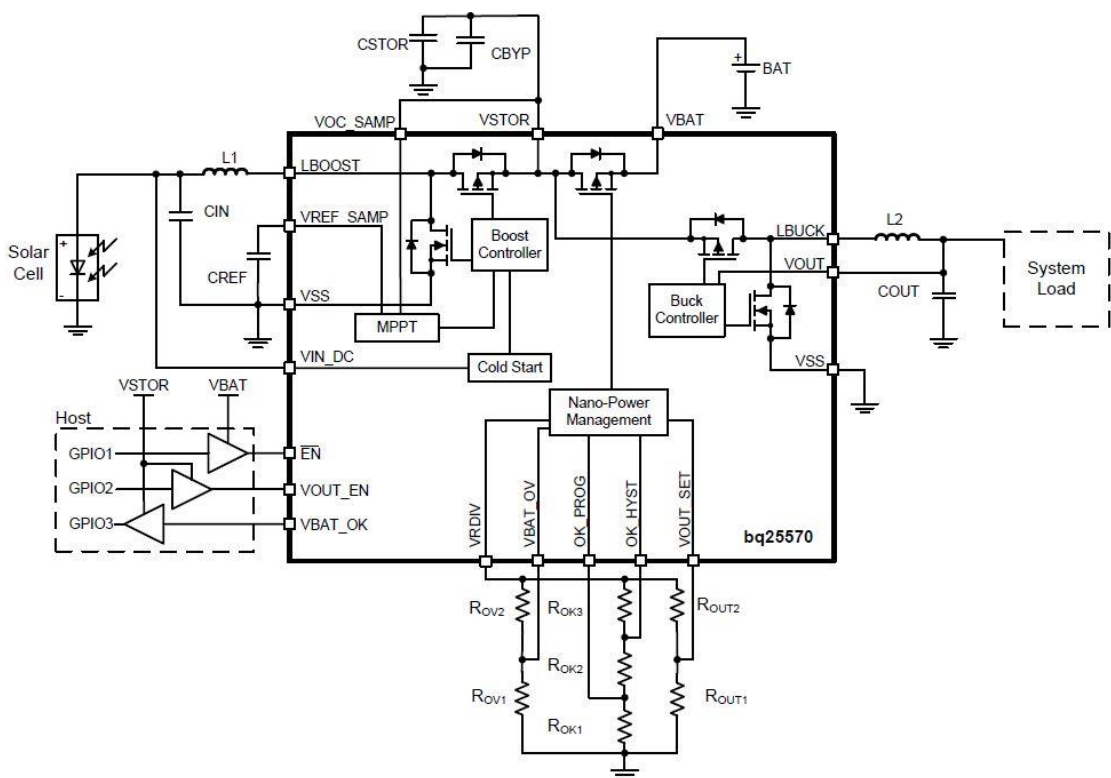
Tento obvod je důležitý po energetické stránce. Pokud by zařízení mělo neomezený přístup k energii, tak by tuto součástku mohl nahradit klasický stabilizátor. V našem případě je potřeba se podívat po efektivním správci napájení, který obsahuje funkce stabilizátoru, ale i mnohem více. A to umět vytvořit na výstupu čipu stálé napětí 3,3 V, které je nezbytné pro veškeré provozní operace celého zařízení, umět získat energii z alternativních zdrojů, v našem případě je to solární panel. Dále je potřeba aby se dokázal starat o baterii či akumulátor v případě nedostatku alternativního zdroje energie, který je očekáván.

5.3.1 BQ25570

Prvním vybraným integrovaným obvodem byl obvod firmy Texas Instruments s názvem BQ25570 Ultra Low Power Harvester Power Management IC with Boost Charger and Nano-Powered Buck Converter. Tento obvod nabízí možnosti správy napájení celého senzoru. Vyznačoval se tím, že už při výstupním napětí 330 mV alternativního zdroje (solární panel, vibrace nebo magnetického pole). Po „nastartování vnitřních obvodů“ může výstupní napětí alternativního zdroj klesnout na 120mV a stále bude BQ25570 schopen pomocí vnitřních obvodů zvednout napětí na pracovní úroveň 3,3 V a umožnit funkčnost bezdrátového teploměru. Dále umožňuje ukládání energie do nabíjecí baterie, super kondenzátorů či klasických kondenzorů. BQ25570 se tímto snaží pokrýt energetickou poptávku z alternativních zdrojů ve chvíli, kdy zbytek zařízení nepracuje. Další vlastností je, že obsahuje MPPT – Maximum Power Point tracking, což je, že čip se snaží „dostat“ maximum z alternativního zdroje do zátěže. [20]

Nastavení integrovaného obvodu BQ25570

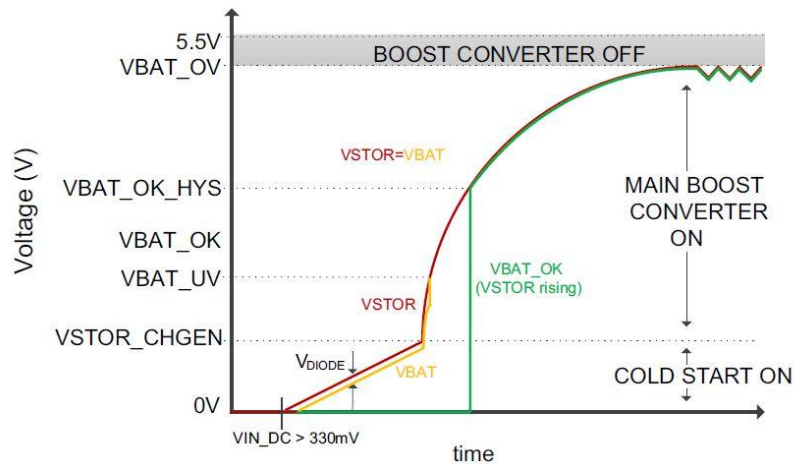
Nastavení obvodu zde uvádím z důvodu pochopení dalších textů. Musí být provedeno tak, aby i po odpojení alternativního zdroje energie popřípadě napájecí baterie bylo stále zachováno nastavení výstupního napětí, tzv., že nastavení BQ25570 není závislé na přísunu energie. Tohoto lze dosáhnout statickou pamětí podobně jako u mikrokontroléru anebo pomocí rezistorové sítě. První řešení by nebylo v našem případě moc praktické, jelikož by se musely čipy programovat už před zapojením nebo by tištěný spoj vyžadoval servisní konektor pro nastavení napájení. BQ25570 využívá druhou možnost.



Obrázek 5.3.1.1: Typické zapojení s BQ25570 [20]

Zde se k nastavení námi požadovaných výstupních napětí používají rezistory ROUT, ROK, ROV a 2 nastavovacích pinů EN, VOUT_EN. VBAT_OK slouží jako indikátor stavu baterie a nabývá logických hodnot 0 nebo 1. Pomocí rezistorů ROUT jsem nastavil výstupní napětí 3,3V jež vhodné a zároveň doporučené výrobcí ostatních součástek v celkovém obvodu bezdrátového teplotního senzoru. Dále je důležité nastavit maximální napětí, které může nabíjecí baterie dosáhnout. Je to nutné, aby nedošlo k poškození baterie a k její následné destrukci popřípadě ke zničení celého senzoru. Toto se nastavilo pomocí rezistorů ROV, over voltage protection. Pro LiFePo4

akumulátor je toto napětí 4V. V následujícím kroku je třeba určit napětí, dokdy je možné mít připojenou zátěž, tedy veškeré ostatní obvody a určit hysterezi, kdy lze opětovně připojit, pokud napětí baterie pod tuto mez klesne. Je třeba toto provést tak, aby připínání zátěže k BQ25570 nekmitalo. Na následujícím obrázku 5.3.1.2 jsou ukázány průběhy napětí. [20]



Obrázek 5.3.1.2: Nabíjecí operace po připojení vybitého akumulátor k BQ25570 [20]

Z grafu na obrázku 5.3.1.2 je vidět napěv VBAT_OV, tedy over voltage akumulátoru, dále VBAT_UV=> napětí, kdy se odpojuje zátěž a zároveň min napětí akumulátoru, aniž by došlo k poškození baterie. Dále VBAT_OK_HYS, to je určená hystereze přepínání a odepínání zátěže. Zelená křivka určuje stav baterie, tzv. kdy je OK a akumulátor je nabit na úroveň, která je min požadována. Zde ovšem vzniknul problém s určením min napětí baterie VBAT_UV. [20] Aby celý senzor správně fungoval je třeba napětí 3,3 V, ale standartní napětí baterie s chemií LiFePo4 je 3,2V a minimální napětí před odpojením baterie aniž by došlo k poškození článku je 2V. Pomocí hodnoty VBAT_UV se určuje hodnota, kdy se odpojuje zátěž. Tato hodnota je určena jako 3,0 V, ale to znamená, že by se z akumulátoru využila jen škála 200 mV, což představuje 6,5% napěťového rozsahu akumulátoru. Na základě tohoto se nedá mluvit o efektivním využití zdroje. A v důsledku tohoto aspektu i přes slibné ostatní parametry se tento integrovaný obvod jeví jako nevhodný pro naše řešení a bylo nutné se podívat po jiném.

5.3.2 LTC3330

Dalším vybraným obvodem je čip od firmy Linear Technology. Tento integrovaný obvod se vyznačuje 2 vstupy pro alternativní zdroje. Což zvyšuje jeho šanci na vytěžení více energie oproti BQ25570. Dále automatické přepínání zdrojů mezi alternativním a baterií. Pokud je dostupná energie např. ze solárního panelu/panelů, tak obvod automaticky využije tuto energii a zbytečně nevybíjí baterii. Což je velmi výhodné pro zapojení, jelikož to silně prodlouží životnost baterie. Integrovaný obvod také obsahuje Supercapacitor Balancer, tedy další úložiště energie, v tomto případě do super kondenzátorů. LTC3330 pak dává možnost čerpat až 10mA z těchto 2 kondenzátorů a to je dostačující pro provoz, kdy bezdrátový teplotní senzor nekomunikuje s ostatními prvky senzorové sítě. Obvod dále obsahuje vnitřní obvod Buck-Boost DC-DC měnič. BQ25570 obsahuje právě jen buď stoupající DC-DC měnič anebo klesající DC-DC měnič. Neumožňuje zvyšovat a snižovat napětí zároveň v průběhu provozu. A díky tomuto režimu Buck-Boost DC-DC měniče je možno využít plného napěťového rozsahu baterie. Bohužel obvod LTC3330 nedisponuje možností dobíjení baterie, pouze její prodloužení životnosti na základě přepínání vstupních zdrojů (baterie anebo alternativní zdroje energie). [21] Je nutno šáhnout po nabíjecím obvodu anebo využití lepší baterie, jež tuto potřebnou elektroniku obsahují již v sobě. Menší problém u těchto integrovaných obvodů spočívá v jejich pouzdrech. Jsou použita QFN pouzdra, která jsou rozměrově v tomto případě 5x5 (mm) a obvod LTC3330 na tomto rozměru disponuje 32 piny.

5.4 Výběr nabíječky akumulátoru

Při vybírání nabíječky je nutno zohlednit použitou chemii v akumulátoru. Já zvolil jako akumulátor Li-Ion baterii. Taktéž je nutno dodržet max. napětí akumulátor, min napětí, aby nedošlo k jeho poškození a i dobíjecí proud. Firma Linear Technology mě příjemně oslovila při seznamování se s integrovaným obvodem LTC3330, takže jsem i při hledání nabíječky opět zašel na její stránky vydat se hledat potřebný obvod.

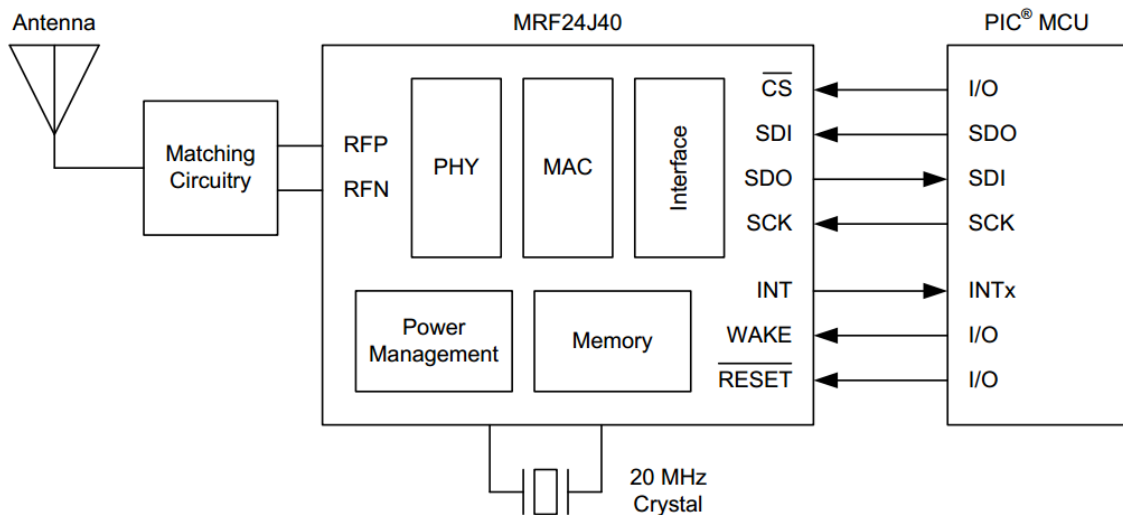
5.4.1 LTC4088-2

Jako velice vhodný pro řešení problematiky se jevil obvod LTC4088-2. Tento integrovaný obvod vyniká vnitřním řešením, kdy umožňuje dobíjet baterii a zároveň zásobovat zátěž. Tomuto režimu se říká Power-Path a je velkou výhodou. Jako vstupní napětí do nabíječky může být klasický adaptér na 5 V, ale celkový rozsah je od 4,25 V do 5,5 V. Integrovaný obvod je těmito rozpětími vymezen pro provoz na napětí

odběrem. Zároveň aby byl schopen signálově dosáhnout k dalšímu prvku sítě. Tato vzdálenost nesmí být zase natolik malá, aby nevznikl problém s tím, že by klasické drátové teplotní čidlo bylo ekonomicky výhodnější. Výsledná cena modulu hraje velkou roli ve výběru. Po přihlédnutí k těmto požadavkům, jsem opětovně vybral výrobek firmy Microchip.

MRF24J40

Čip z portfolia společnosti Microchip, jenž obsahuje implementovány všechny potřebné náležitosti pro komunikaci pomocí IEEE 802.15.4. Komunikace mezi čipem a uC probíhá pomocí sběrnice. Nastavování požadovaných vlastností a akcí se provádí pomocí jednotlivých registrů v čipu obdobně jako u mikrokontroléru PIC. Provozní napětí je 2,4 V – 3,6 V, avšak výrobce uvádí jako doporučenou hodnotu 3,3 V. Přenos dat dosahuje až 250 kbps, což pro měření teploty je dostačující. [23]

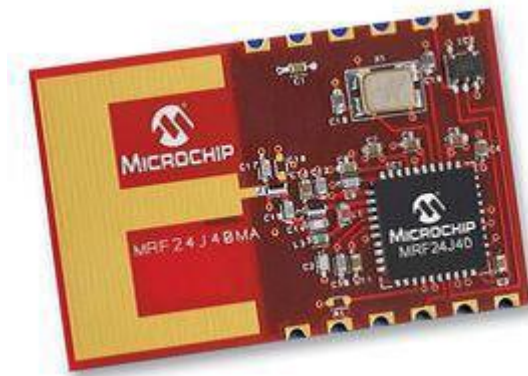


Obrázek 5.3.2.1: Zjednodušené vnitřní blokové schéma ZigBee integrovaného obvodu MRF24J40 [23]

5.5.1 ZigBee modul MRF24J40MA

Nabízených modulů od firmy Microchip je velké množství, ale pro naše řešení je třeba vybrat modul, který má, co nejmenší proudový odběr. Samozřejmě za splnění ostatních podmínek provozu, tj. aby modul dokázal komunikovat na nějakou relevantní vzdálenost. Ideální volbou se jeví modul MRF24J40MA. Tento modul má spotřebu při přijímání signálu 19 mA, vysílání 23 mA a spánek pouze 2 μ A. To se přímo nabízí pro bateriově napájené obvody. Jeho spotřeba ale ovlivňuje pochopitelně jeho vysílací výkon a s tím spjatý komunikační dosah modulu. Ten výrobce udává jako 120 m při přímé viditelnosti. [24] To na obyčejný dipól vytvořený na desce plošných spojů není

špatné. Tuto část jsme ověřovali později v sekci měření. Modul komunikuje s uC pomocí sběrnice SPI. Značnou výhodou a zároveň to ovlivnilo výběr kritéria, bylo to, že vývojové prostředí MikroC obsahuje knihovnu pro tento modul. Tato knihovna byla později dobrým startovním můstkem pro vývoj firmwaru bezdrátového teploměru.



Obrázek 5.3.2.1: Pohled na ZigBee modul MRF24J40 [25]

5.6 Výběr alternativního zdroje energie

Jako smysluplný alternativní zdroj energie se jeví fotovoltaický panel. Použití piezoelektrického jevu, kdy je krystal schopen přeměnit energii vynaloženou na jeho dočasnou deformaci na elektrickou, je zbytečný. Jelikož teplotní senzor umístění na zdi např. v rodinném domě by moc vibrací, které by mohl přeměnit, k dispozici neměl. Získáváním elektrické energie z elektromagnetického pole cesta taktéž nevede. Tudíž zbývá solární panel, jenž by mohl dodávat energii při osvětlení a to buď za dne anebo při dostatečném a správném umělém osvětlení. Tímto se radikálně prodlouží životnost baterie.

5.6.1 Fotovoltaické panely

Zažívají nebo spíše v tuto chvíli dožívají svůj boom. Ale v těchto nízkopříkonových aplikacích by mohli ještě najít své uplatnění. Základním rozdělením můžeme rozdělit fotovoltaické panely na 3 skupiny panelů: [26]

- Amorfnní články – účinnost toho panelu je okolo 5 – 8 % z dopadající energie od Slunce. Základem je napařovaná křemíková vrstva. Tyto panely jsou nejlevnější a je u nich třeba mít dostatečnou plochu. [26]
- Polykrystalické články – zde je základem křemíková podložka, články se skládají z většího počtu menších polykrystalů pro zvětšení výkonu panelu. Účinnost se pohybuje od 10% do 14%. [26]

- Monokrystalické – základem je křemíková podložka, krystaly se vyrábí tažením roztaveného křemíku ve formě tyčí o průměru 300 mm. Ty se poté rozřezají na plátky a pospojí na panelu. Zde účinnost dosahuje od 13 do 17%. [26]

Po přihlídnutí těchto vlastností, ceně a dodávanému výkonu panelu, jsem si vytvořil srovnávací tabulku

Tabulka 5.6.1.1. – Přehled fotovoltaických panelů

| | | | | | | | |
|---------------------------------------|---------|-------|---------|------|-------------|---------------------|------------|
| Výrobce | Miniisw | - | Miniisw | DIY | OPTOSUPPLY | - | - |
| model | SW-008 | - | SW-015 | - | OPL90A44101 | ASI30002 060090M | MF- 10W |
| U_{out} (V) | 5-6 | 4,2 | 5-6 | 2 | 9 | 2 | 17,49 |
| P (mW) | 800 | 580 | 1 500 | 700 | 4 000 | 269 | 10 000 |
| I_{MAX} (mA) | 160 | 140 | 300 | 350 | 440 | 10,1 | 570 |
| x (cm) | 8,5 | 8 | 11 | 10 | 18 | 6 | 36 |
| y (cm) | 8 | 8 | 11 | 6,9 | 22 | 9 | 30 |
| z (cm) | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 2,8 |
| plocha (cm ²) | 68 | 64 | 121 | 69 | 396 | 54 | 1 080 |
| cena (\$)) | 4,22 | 13,14 | 6,29 | 5,45 | - | - | - |
| cena (Kč) | 86,1 | 268,1 | 128,3 | 111 | 773 | 184 | 658 |
| výkon na plochu (mW/cm ²) | 11,8 | 9,1 | 12,4 | 10,1 | 10,1 | 5,0 | 9,3 |
| Odkaz | [27] | [28] | [29] | [30] | [31] | [32] | [33] |

V tabulce 5.6.1.1 jsem uvedl různé variace solárních panelů, jež jsem našel na stránkách dealerů TME a Deal Extreme. Prvně jsem vybíral solární panel, jenž by byl pouze přes montážní krabici bezdrátového senzoru, jenže tato velikost aktivní plochy neumožňovala dostatečný výkon, jenž by pokryl energetickou náročnost obvodu. Výkon při maximálním osvětlení byl pouze 180 mW, přičemž dodávaný max. proud byl pouze 6,6 mA. To jsem shledal jako málo dostačující. Využil jsem stránek DealExtreme, jež nabízejí velký sortiment solárních panelů a taktéž prodejce TME. Z uvedených stránek jsem vybral pár, které by mohly dodat dostatek energie, aby obvod fungoval v době, kdy je dostupné dostačující osvětlení pouze ze solárního panelu. Jako vhodný se jeví první ze solárních panelů, jenž umožňuje dodat až 160 mA do obvodu. Plný běh systému vyžaduje je cca max. 45 mA, což tento panel splňuje a má i rezervu. Fotovoltaické panely jsem si přepočítal na společné kritérium. Taktéž bylo měřítkem ekonomická stránka, jelikož panely od prodejce TME byly silně dražší. Panel s plochou 68 cm² má rozměry 8,5x8 (cm) a druhý solární panel již 11x11 (cm). První natož druhý

panel nemá smysl připevňovat na montážní krabici teplotního senzoru. Z toho vyplývá, že 2. větší panel i přes jeho rozměry je vhodnější, jelikož je schopen dodat 1,5 W. Jeho technologické řešení je pomocí polykrystalických článků a je zvýrazněn v tabulce 5.6.1.1. pomocí žluté barvy. Výrobce dodávaný výkon na provoz zařízení překonává spotřebu obvodu při plném běhu, ale je nutno brát v potaz, že teplotní senzory se ne vždy montují na místo, kde je plný osvit slunce. To z pochopitelných důvodů, že Slunce při osvitu teplotního čidla by ohřívala teploměr zařízení a tím by docházelo ke zkreslení měřených dat. Poslední v tabulce je solární panel, který nabízí k dispozici 10 W, ale svými rozměry a cenou již není vhodný pro toto řešení.

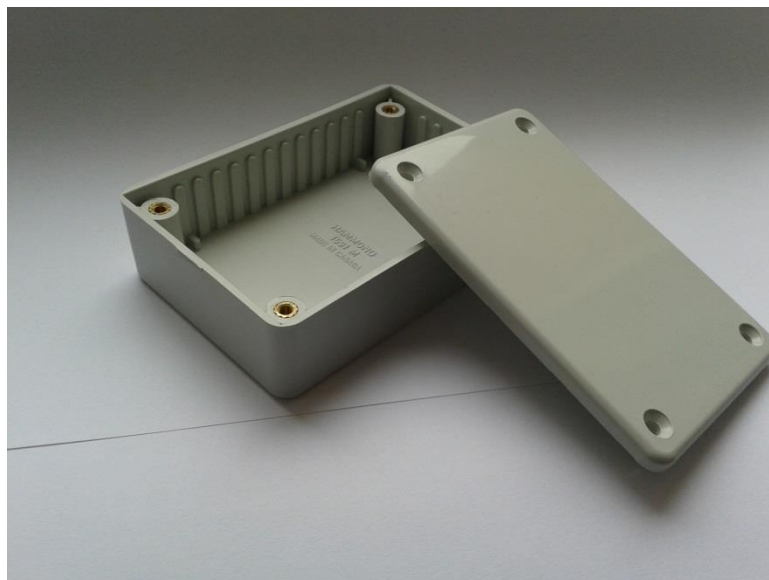
5.7 Výběr akumulátoru

Vhodný akumulátor je třeba vybírat podle chemie. Jako největší uložení se dnes jeví chemie LiFePo₄, ale pro tuto verzi je těžší sehnat vhodné nabíjecí obvody. Po přihlédnutí na odebíraný proud jsem došel k závěru, že pro řešení bezdrátového teploměru postačí Li-Ion akumulátory, které můžeme běžně nalézt v mobilních telefonech. Pracovní napětí těchto akumulátorových baterií je 3,7 V a obvod LTC4088-2 je přesně pro ni určený. Tyto baterie se vyrábějí v nepřehledném množství. Takže jsem vybíral podle kapacity vůči rozměrům krabičky pro senzor. Volba padla na akumulátor firmy SANYO s chemií Li-Ion a kapacitou 1700 mAh.

5.8 Výběr konstrukční krabičky

Ve své podstatě pohled na krabičku je vše, co laický koncový zákazník uvidí. Tudíž je třeba, aby krabička nebudila dojem, že si zákazník zakoupil teplotní senzor z pořídní prodejny, ale aby cítil, že má robustní výrobek, který splní jeho očekávání. Při praxi v práci mi prošla rukama spousta montážních krabiček od senzorů, ovladačů apod. Po zkušenostech, kdy jsem jako brigádník vykonával čistou elektromontáž, jsem zjistil, že je třeba, aby plast (pokud je krabička plastová) jevil dojem pevnosti a nejenom jevil. U senzorů není přímo třeba, aby krabička byla umělecké dílo. To spíše u zařízení, které má zákazník v ruce. Při montáži se může stát, že senzor spadne z velké výšky a je vskutku vhodné, aby tato krabička přežila. Po doporučení jsem zrak obrátil směrem k výrobci Hammond. S jeho krabičkami jsem měl poté možnost se více osobně seznámit na veletrhu v Německu přímo v Norimberku, tento zájezd nám umožnila škola a byl pro mě velkým přínosem v rozhledu. Při výběru jsem zohlednil, že není potřebné, aby krabička byla velikosti rodinného auta. Postačí taková, která v klidu obsáhne veškerou

potřebnou elektroniku. Každé volné místo stojí při velkovýrobě peníze, které jdou vniveč, a zákazník nechce primárně platit za vzduch dovozený z fabriky. Materiál jsem zvolil plast, jelikož při montáži často nastává situace, kdy není možné krabičku připevnit výrobcem připraveným způsobem a zkušený montér má s sebou potřebné nářadí na úpravu a nápad. U každé elektroinstalační krabice je otázka krytí, kterou definuje norma stupeň krytí IP. Ta udává odolnost proti vniknutí cizího tělesa či kapalin. Zkratka IP přímo znamená z angličtiny Ingress Protection. První číslo udává ochranu před vniknutím cizích předmětů a druhé číslo proti vodě. U vybrané krabičky výrobce udává stupeň krytí IP54. To představuje ochranu proti jakékoliv pomůcce, částečně proti prachu a proti stříkající vodě ve všech úhlech. [34] Tuto ochranu jsem byl nucen, ale pozměnit, jelikož je třeba, aby k teploměru mohl proudit okolní vzduch, který bude měřen.



Obrázek 5.8.1: Pohled na konstrukční krabičku

6 Konstrukce zařízení

Po vybrání správných součástek už samotná konstrukce nepředstavuje takový problém. Je dobré se inspirovat výrobcí doporučenými zapojeními.

6.1 Rozdělení obvodu bezdrátového teploměru

Obvodové řešení bezdrátového teploměru po výběru hlavních komponent není extrémně složité. Obvod je složen z několika částí. Tyto části můžeme rozdělit na čtyři hlavní.

- **Řídicí obvod** – skládá se z mikrokontroléru PIC18F25J11 a potřebných nastavovacích součástek
- **Senzorový obvod** – zde je srdcem digitální teploměr DS18B20 a potřebné nastavovací součástky
- **Komunikační obvod** – rádiový ZigBee modul MRF24J40MA a potřebné nastavovací součástky
- **Energetický obvod** – hlavní prvky zde tvoří správce napájení LTC3330 a Li-Ion inteligentní nabíječka LTC4088-2 a jejich potřebné nastavovací součástky.

6.2 Obvodové zapojení

Pro zhotovení fyzického výrobku je začít odspoda. První kroky jsme už splnili, nyní přichází na řadu zhotovení elektrického schématu celého zařízení. Je dobré volit program, který umožňuje vytvořit elektrický schéma zařízení a desku plošných spojů v jenom prostředí. Předchází se tím možným omylům, kdy návrhář může přehlédnout součástku a tím dochází k fatální chybě celého výrobku. Na střední škole jsme měli ke kreslení schémat zastaralé programy. Zde na FELu jsem se seznámil se spoustou nových programů, od simulátorů po kompletní řešení. Přesto jsem si vybral program Eagle 6.5.0 Light se kterým se mi dobře pracuje. Umožňuje současně nakreslit elektrické schéma, tak na jeho základě i vytvořit návrh desky plošných spojů, dále DPS. Knihovny programu disponují velkou paletou součástek. Jelikož ale součástky bezdrátového teploměru nejsou natolik standartní, bylo nutné jich velkou část nakreslit pomocí vnitřního editoru.

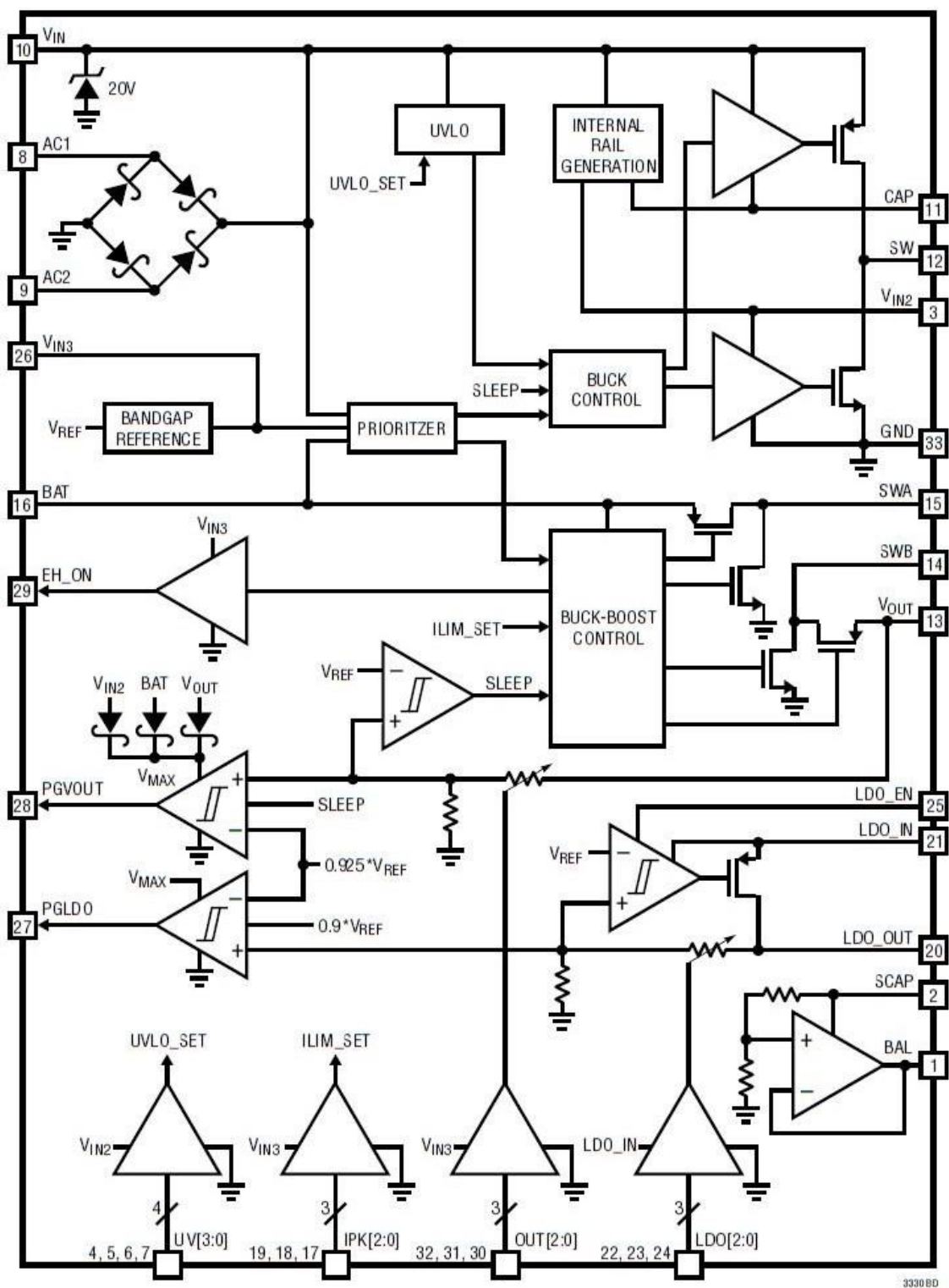
6.2.1 Kreslení symbolů součástek v programu Eagle 6.5.0. Light

Jedinými součástkami, které nebylo nutné upravovat, byly rezistory, kondenzátory, servisní piny, křemíkové oscilátory, LED, diody, tlačítko. Vše ostatní bylo nutné nakreslit v editoru programu. U mikrokontroléru byla výhoda, že i když knihovna neobsahovala vybraný uC, tak bylo dostupné stejné pouzdro součástky. V tomto případě jsem si pouze upravil symbol mikrokontroléru pro použitou součástku. Po delším hledání jsem na internetu objevil i volně dostupnou knihovnu pro teploměr řady DS18x20 a rádiového modulu ZigBee MRF24J40MA. Kreslení symbolů se dá říct, že jde od ruky. Kreslené součástky stačilo nakreslit jako bloky, u kterých jsem vytvořil a popsal jejich piny – součástky LTC3330 a LTC4088-2. Při kreslení USB portu a konektoru fotovoltaického panelu jsem si dopomohl již dostupnými symboly v knihovnách. Po vytvoření své databáze součástek jsem dokreslil elektrické schéma a začal propojovat jednotlivé obvody (řídící, energetický, sensorový a komunikační). Při této činnosti jsem s hrůzou zjistil, že jelikož jsem kreslil pouzdra součástek v milimetrech a symboly též, tak veškeré symboly používané programem Eagle jsou v palcích. V tuto chvíli jsem začal proklínat Američany používaný imperiální systém. Zkoušel jsem všemi možnými způsoby spojit jednotlivé obvody. Zmenšování mřížky ani její změna do normálního metrického systému nepomohla a po pár hodinách jsem byl nucen ustoupit a půlku výkresu kompletně předělat. Znamenalo to i předělat knihovny čerstvě nakreslených symbolů.

6.2.2 Návrh elektrického schématu zařízení

Při návrhu elektrického schématu jsem se řídil doporučenými zapojeními od výrobců součástek a zároveň zužitkoval získané zkušenosti a teoretické poznatky během studií. Obvod jsem začal projektovat od jeho srdce, tedy od mikrokontroléru. K uC PIC18F25J11 jsem připojil součástky nutné pro jeho provoz. Pro udání pracovní frekvence jsem použil křemíkový krystal o frekvenci 20 MHz. Je nutné ho osadit o blokační kondenzátory. Výrobce je uvádí v dokumentaci 15 pF, taktéž jsem připojil k uC další výrobcem udávané kondenzátory. V případě zaseknutí běhu programu, nebo když bude třeba, je nutné, aby mikrokontrolér mohl být resetován. Pro tento účel má Microchip na mikrokontroléru vyhrazený pin MCLR. Na vstup MCLR jsem připojil odpory R1 a R2. Mezi nimi je dle doporučeného zapojení blokační kondenzátor, jeho druhá strana je přivedena na zem. Na základě doporučení jsem umístil mezi MCLR pin a odpor R1 diodu. Jelikož uC bude zdrojem hodin reálného času, je třeba k němu

připojit krystal přesného času. Jeho frekvence je 32,768 kHz a pro svůj běh se k němu připojují dva 12 pF kondenzátory. [15] Tímto by byl nastaven mikrokontrolér pro svůj běh. Je samozřejmě nutné ho připojit k zdroji napětí a uzemnit. Pro signalizaci jsem k uC na port RB4 připojil nízkopříkonovou LED1 v sérii se ztrátovým odporem 470 Ω . Její proudový odběr je 2 mA, to ji dovoluje spínat pomocí mikrokontroléru. Aby se LED1 rozsvítila, stačí ji uzemnit skrz uC. K řídicímu mikrokontroléru je připojen digitální teploměr DS18B20 na port RA0. [16] Zapojení teploměru jsem provedl podle doporučení výrobce a to, že pin DQ z teploměru je připojen do vstupu uC, GND pin teploměru je připojen na společnou zem a poslední pin teploměru VDD je připojen k napájecímu napětí celého obvodu. Je důležité připojit pin DQ přes odpor 4,7 k Ω k napájecímu napětí. Tato hodnota je specifická pro sběrnici 1-Wire. Komunikační rádiový modul MR24J40MA se k mikrokontroléru připojí pomocí sběrnice SPI, výrobce PIC18F25J11 už má předem definovaný piny mikrokontroléru, jsou to SDI, SDO, SCK. Další důležitým pinem z rádiového modulu je pin sloužící k přerušení. Na rádiovém modulu je označen jako INT (interrupt – přerušení). Připojuje se k mikrokontroléru na pozici s externím přerušením – RBO. [15] Zbylé piny jsem připojoval libovolně k mikrokontroléru na pozice portů. Rádiový modul je opět nutné připojit k napájecímu napětí 3,3 V a na společnou zem. [25] Dalším prvkem obvodu je jeho energetická část. V této sekci je nejdůležitějším obvodem LTC3330. Ten je na nastavení značně složitější než mikrokontrolér, ale výrobce na toto myslí a v datasheetu [21]. součástky uvádí různé varianty zapojení.



Obrázek 6.2.2.2: Vnitřní blokové schéma integrovaného obvodu LTC3330 [21]

Dalším prvkem v obvodu k nastavení je nabíječka akumulátoru. LTC4088-2 je oproti správě napájení o dost lehčí k zapojení. Opět jsem vycházel z typického zapojení, které uvádí výrobce v datasheetu [22]. Výstup integrovaného obvodu se připojí namísto vstupu baterie u LTC3330. Na čip nabíjecího obvodu je třeba připojit nastavovací

rezistory. Z pinu PROG a C/X vede rezistor na zem, který omezuje nabíjecí proud. Tento proud jsem omezil na 100 mA z důvodu USB od počítače, které pokud zařízení nevnese požadavek na větší proud, tak dodá max. 100 mA. Mezi svorku CLPROG a zem jsem připojil doporučenou kombinaci rezistoru a kondenzátoru. Na vstup nabíječky přišel připojit 10 μ F filtrovací kondenzátor a obdobně na výstup. Obvod už disponuje DC-DC měničem, z tohoto důvodu výrobce doporučuje zapojit mezi svorky SW a V_{OUT} cívku o velikosti 3,3 μ H. Na pin BAT se připojí akumulátor. Jelikož nepoužívám tepelné sledování akumulátoru, tak výrobce udává, tento pin připojit na zem. [22] Tímto jsou nastaveny integrované obvody. Pro možnost programování mikrokontroléru je nutnost servisních pinů. Skládají se z pinu zem, napájení, MCLR, PGD a PGC. Využil jsem klasické hřebínkové piny. Toto zapojení je dáno programátorem PICKIT3 v jeho manuálu. [35] Ve schématu jsem si připravil konektory pro připojení fotovoltaického panelu, kde kladná svorka vede do LTC330 na vstup AC1 [21], do nabíječky LTC4088-2 je připojen konektor mikro USB, vede do vstupu VBUS. [22]. Do výsledného schématu je zakomponoval 4 sady servisních pinů. Servisní sada JP2 slouží pro odladování programu a je připojena na piny RX1 a TX1 mikrokontroléru PIC18F25J11. Zbylé servisní piny umožňují připojený měřicích přístrojů k DPS. Viz Příloha A – schéma zapojení

6.3 Návrh desky plošných spojů

Pro návrh plošného spoje jsem opět využil programu Eagle. Který pomáhá návrh usnadňovat kontrolou zapojení.

6.3.1 Kreslení pouzder součástek

U nestandardních součástek bylo třeba nakreslit jejich pájecí plochy. (Kreslení pouzder a symbolů probíhá dohromady, ale zde jsem to rozdělil.) Výrobce na konci datasheetu uvádí technický výkres s rozměry pouzdra součástky a jak by měla vypadat pájecí plocha. Tyto výkresy bývají většinou jak v metrickém systému, tak i v imperiálním. Je velmi důležité to nepoplést. V knihovně součástek bylo třeba vytvořit novou, kde se spojil symbol s nakreslenou pájecí plochou.

6.3.2 Návrh DPS

Pro realizaci DPS jsem využil dvouvrstvou desku, ulehčuje práci při návrhu. Kreslicí prostor jsem si přizpůsobil podle rozměrů krabičky. Poté jsem na desku umístil jednotlivé součástky. Některé součástky jako blokační kondenzátory je nutné pro správný chod zařízení umístit tak, jak to doporučuje výrobce. Těmito kritickými součástkami jsou většinou kondenzátory o hodnotě 100 nF, jiné blokační kondenzátory. Speciální skupinou jsou i křemíkové krystaly. Výrobce Microchip při připojování této součástky přímo kreslí, že by okolo krystalu měla být rozlitá zem. Dostal jsem i radu, že toto může být i málo, že je doporučeno provést rozlitou zem nejen okolo součástky, ale i pod ní. Aby nedocházelo k zbytečným bludným proudům na desce, je lepší při použití dvouvrstvé desky udělat prokovy (spojení horní a spodní strany DPS). V krajních případech se využívá i stínící kostry okolo křemíkového krystalu. U ostatních součástek toto již nepředstavovalo problém. Jejich rozmístění na desce plošných spojů jsem provedl podle praktičnosti a prostorových možností. Vyhotovený návrh viz **Příloha B – Motivy desky plošných spojů**.

6.3.3 Výroba desky plošných spojů

Zpracovaný návrh DPS jsem poté nechal zhotovit u firmy PragoBoard s.r.o. Výsledný produkt byl dvouvrstvou deskou, která z obou stran obsahovala nepájivou masku, potisk na vrchní straně a s chemickým zlatem na ploškách k pájení. Výroba trvala přibližně týden. Hotová deska plošných spojů viz **Příloha D – Zhotovená deska plošných spojů**

6.3.4 Osazení desky plošných spojů

Při osazování desky jsem poprosil pana Ing. Duška Ph.D. o pomoc při zapájení QFN pouzder součástek LTC3330 a LTC4088-2. Na tyto součástku jsem si příliš netroufal.. Zapájení ostatních součástek už jen vyžadovalo jistou zkušenost s mikropájkou. Takto osazenou desku jsem zadělal do krabičky, kterou jsem upravil poté do finální podoby. Viz **Příloha D – Vyhotovená deska plošného spoje** a **Příloha E – Fotodokumentace výrobku**

7 Způsob vzájemné komunikace

Vytvoření komunikace mezi senzory a sběrnou jednotkou.

7.1 Dohoda o komunikaci mezi sběrnou jednotkou a senzory

Jelikož hotový výrobek neslouží jako samostatná jednotka, bylo třeba s kolegou domluvit pravidla společné komunikace. Hlavní sběrná jednotka bude fungovat nepřetržitě, ale u senzoru při běhu na baterii je dobré vypínat jeho nepoužívané periferie. Hlavní jednotka tedy naslouchá po celou dobu, kromě času vymezeného její vysílání. Komunikaci jsme si rozdělili na následující činnosti.

7.1.1 Přidání nového senzoru

Po zapnutí nebo resetování senzoru jednotka uvede svoji konfiguraci do tzv. továrního nastavení. Jednotka následně vyšle informace o svém stavu a požadavek na přidání sama sebe do sítě. Pokud hlavní jednotka tuto informaci nedostane a neodpoví, senzor opakuje svoje vysílání po 10 s. Toto opakování se děje dohromady max. 6. Poté se senzor odmlčí, aby zbytečně nespotřeboval energii. Pokud hlavní jednotka odpoví a pošle patřičné údaje k provozu, senzor se opět odmlčí, ale již je nastavená a pokračuje ve správném běhu měření.

7.1.2 Standartní komunikace senzoru s hlavní jednotkou

Po správném nastavení senzoru, obsahuje jednotka synchronní informace k provozu. Jsou to aktuální čas, datum, vysílací kanál, interval měření fyzikální veličiny a čas komunikace. Hlavní jednotka sice stále poslouchá, ale může nastat situace, kdy by jedno čidlo mohlo vysílat přes druhé, proto čas komunikace. Senzor vyšle údaje o změřené teplotě a svůj aktuální čas. Hlavní jednotka data přijme a pošle nazpátek senzoru data pro další plynulý běh sítě.

7.1.3 Odpojení čidla

Hlavní jednotka má možnost poslat senzoru příkaz k jeho odpojení od sítě. Senzor po přijetí tohoto příkazu se odpojí od sítě a uspí.

7.2 Struktura komunikace mezi senzorem a hlavní jednotkou

Komunikace musela být jednoznačně určena, z tohoto důvodu jsme se domluvili na společné struktuře posílaného komunikačního paketu. Posílaný paket je ukončen specifickou kombinací „*/“.

Tabulka 7.2.1: Tabulka struktury komunikačního paketu od senzoru k hlavní jednotce

| Byte | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
|----------------|---------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------|----------------|---------------------------|----|
| Druh informace | Stav jednotky | ID jednotky 1/2 | ID jednotky 2/2 | Typ senzoru | Teplota 1/2 | Teplota 1/2 | | |
| | | Nová = 0x31 | | Teploměr = 0x01 | | | | |
| | | Nastavená = 0x30 | | Vlhkoměr = 0x02 | | | | |
| 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Vlhkost 1/2 | Vlhkost 2/2 | Rezerva | | | Stav baterie | Vysílací čas | Interval měření | |
| 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| Rok | Měsíc | Den | Hodina | Minuta | Sekunda | Vysílací kanál | Ukončovací kombinace „*/“ | |

Tabulka 7.2.2: Tabulka struktury komunikačního paketu přijatý senzorem od hlavní jednotky

| Byte | 0 | | | | 1 | | | | |
|------------------------|--------------------------|-------------------------|-----|---------------------------|------------------------|--------|--------|---------|--|
| Druh informace | Znak pro příkaz jednotce | | | | ID jednotky 1/2 | | | | |
| | | | | | Čekej na příjem = 0x42 | | | | |
| | | | | | Reset = 0x52 | | | | |
| | | | | | Stav jednotky = 0x53 | | | | |
| | | | | | Nastav jednotku = 0x4E | | | | |
| 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| ID jednotky 1/2 | Vysílací čas | Interval měření | Rok | Měsíc | Den | Hodina | Minuta | Sekunda | |
| 11 | | 12 | | 13 | | | 14 | | |
| Nový kanál na vysílání | | Současný vysílací kanál | | Ukončovací kombinace „*/“ | | | | | |

Ve vysílaném paketu od senzoru hlavní jednotce, jsme úmyslně vytvořili rezervu pro možné budoucí požadavky.

8 Firmware pro senzor

Při vybírání vývojového prostředí pro programování jsem svůj pohled opíral o čerstvě získané zkušenosti z předmětu Mikrokontroléry. V tomto předmětu jsme se učili programovat v softwaru od firmy MikroElektronika MikroC. K dispozici byla zkušební deska EasyPic 7, která disponuje spousty periferiemi, od displejů pro RS232. Taktéž vývojové prostředí má v sobě zakomponováno velké množství knihoven, Pro mě velice užitečné knihovny byly například: SPI pro komunikaci s rádiovým modulem na protokolu ZigBee, 1-Wire pro komunikaci s digitálním teploměrem DS18B20. Dále software disponuje ukázkové příklady s různými moduly. Přímou obsahuje i ukázkový program pro ZigBee modul. Ten fungoval, že jeden modul vysílal byte s informacemi o LEDkách k rozsvícení druhému ZigBee modulu, mikrokontrolér následně podle této přijaté informace rozsvítil na zkušební desce příslušnou kombinaci LED. Toto bylo pro mě veliké kritérium při výběru prostředí. Programovací jazyk je C#, je to jazyk podobný JAVE, kterou jsme se učili v prváku, ale dle mého pohledu to pro mě mělo minimální přínos. Mnohem praktičtější by bylo se rovnou učit C#, které má znatelně větší využití. Program jsem rozdělil na několik částí, které jsem v průběhu prací postupně skládal dohromady. Zároveň to umožňuje do budoucna využití těchto samostatných programů pro jiné projekty. Celý program s podrobnějším popisem příkazů je na přiloženém DVD.

8.1 Receiver.c

Tento soubor je hlavní částí firmwaru senzoru. Je v něm nadefinovaná velká část proměnných, které se využívají v dalších souborech. Dále jsou v tomto souboru veškerá přerušení programu. Těch jsem využil z následujících důvodů: senzoru bude udávat běh program RTCC (Real Time Clock a Calendar) u kterého jsem využil možnosti alarmu k vykonávání činnosti senzoru. RTCC dá podle nastavení impuls k vykonání měření následnému odeslání dat do hlavní jednotky sítě. Abych mohl používat správně ostatní funkce programu, bylo nutné, aby veškeré inicializace probíhala ve funkci Interrupt (přerušení). To je podmíněno tím, že není dovoleno volat ostatní funkce jak z hlavní funkce programu „main“ tak z funkce „interrupt“. Z toho vyplynulo, že v hlavní funkci „main“ proběhlo minimum nastavovacích příkazů jednotky. Z hlavní funkce se uměle skáče do přerušení, kde se v uměle vyvolaném přerušení vykoná zbylé funkce pro správné spuštění sensorové jednotky.

8.2 Soubory pro inicializaci ZigBee rádiového modulu

Do této sbírky souborů jsou zahrnuty soubory, jež se podílí na inicializaci ZigBee a jeho provoz: `ReadWrite_Routines.c`, `Reset_Routines.c`, `Misc_Routines.c`, `Init_Routines`. Prvotní inicializace probíhá, že rádiový modul se softwarově a pak hardwarově restartuje. Poté se nastaví zapnutí modulu, kde se provede nastavení polarity probouzecího signálu, povolí se přerušení pro probuzení. Dále se nastaví adresa jednotky, PAN ID. Z těchto souborů se dále provede inicializace nonbeacon komunikace. Ta obsahuje nastavení potřebných registrů pro oscilátor, správu sítě, napájení atd., vybere se první mód z CCA metody (detekce volného kanálu), pro komunikaci je vybrána metoda s detekcí energie nad prahovou úrovní. Povolí se přerušení (ovládá běh programu senzoru), nastaví se vysílací kanál a provede se opětovný reset, to proto, aby se modul zapnul s novým nastavením. U senzoru je nutné nastavit modul, že se nejedná o koordinátora sítě, tím je v síti hlavní sběrná jednotka. Po těchto operacích zbývá nastavit filtr a přijímací mód. Filtr se skládá ze čtyř variant. V programu je využito módu, kdy se přijme vše. U přijímacího módu byly na výběr tři varianty. Jako vhodná se jevila varianta normální, která akceptuje pouze paket s dobrým CRC (kontrolní součet) splňující požadavky ZigBee IEEE 802.15.4

8.2.1 Přijímání a odesílání paketů

V souborech se taktéž nachází procedury a funkce pro již samotnou komunikaci mezi senzorem a hlavní sběrnou jednotkou. Pro odesílání se využívá procedura „`write_TX_normal_FIFO`“. Do této procedury se vloží délka posílaných dat, ta v naší zvolené komunikaci je od 0 do 63 bajtů. Tabulka 8.2.1.1 ukazuje, jak jdou data za sebou. Následně jsou data přesunuta do rádiového modulu, kde se nastaví potvrzovací rámeček na ano a že nebude rámeček kódován. Nyní už se zapsáním 1 do `TXCON(0x1B<0>)` pošle na cílový modul.

Tabulka 8.2.1.1. Pořadí dat v rámci

| Byte | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Obsah | Délka hlavičky | Délka hlavičky + dat | 0x01 | 0x88 | Sekvenční číslo | Cílové PAN ID1/2 | Cílové PAN ID2/2 |
| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | n | |
| Adresa přijímače 1/2 | Adresa přijímače 2/2 | Místní PAN ID 1/2 | Místní PAN ID 2/2 | Adresa zdroje 1/2 | Adresa zdroje 2/2 | Data | |

Příjem dat se provádí pomocí přerušení. To nastává na pinu RB0 mikrokontroléru. Softwarově se otestuje, zda se nastalo přerušení. Poté se volá procedura „read_RX_FIFO“, z ní se vyčte délka přijatých dat a vyčtou se data do pole DATA_RX. Z toho pole se následně vyčtou potřebné data pro senzor. Vyčtení se ukončí příkazem do modulu, který odblokuje příjem pro další komunikaci.

8.3 Prikazy.c

V tomto souboru jsou funkce a procedury, které se starají o nastavení senzoru. Nastavuje se zde datum, čas, příkazy k měření. Taktéž jsou tu procedury, které vyčítají z přijatých dat další nezbytné informace pro běh senzoru.

8.4 DS18B20.c

Jak je již patrné z názvu souboru, zde se nachází procedura, která vyčte z digitálního teploměru přes sběrnici 1-Wire aktuální teplotu a uloží ji do globální proměnné.

8.5 Rtcc_lib.c

Tento soubor je mnou vytvořená knihovna pro RTCC (Real Time Clock a Calendar), tato sekce programu mi zabrala velkou část při programování. Mikrokontrolér PIC18F25J11 je již vybaven vnitřním obvodem pro RTCC, byl to jeden z parametrů proč, jsem ho vybral. Po nastavení příslušných registrů dle možností v datasheetu od výrobce jsem ale zjistil, že stejně RTCC nefunguje. Po zkoumání různých variací programů s RTCC na internetu a prostudování problematiky v Národní technické knihovně jsem musel ustoupit a nainstalovat vývojové prostředí od Microchipu

MPLABX IDE. Nevýhodou prostředí MikroC je, že pokud není použita jejich vývojová deska, tak s programátorem PICKIT3 není možné debugování. To je nezbytné pro sledování aktuálních hodnot registrů mikrokontroléru. Po seznámení se s novým prostředím jsem sepsal nový jednoduchý program na RTCC, kde jsem nyní využil dostupných knihoven ve vývojovém prostředí MPLAB. Dostupné knihovny mi posloužily jako návod k pochopení problematiky. Při debugování mnou napsaného programu jsem zjistil, že nemohu nastavit v registru RTCCFG bit WREN na logickou 1. Tento bit hraje klíčovou roli v nastavení RTCC. Slouží jako klíč k povolení zápisu času, datu, alarmu k přerušení a zapíná vnitřní obvod RTCC. Po dlouhém hledání jsem se obrátil opět na knihovny a začal procházet program s RTCC od Microchipu. Kde jsem našel spouštěcí sekvenci tohoto bitu. Svůj program jsem upravil o tuto sekvenci a vnitřní obvod reálného času poté již fungoval.

8.6 Složení firmwaru senzoru

Po odzkoušení jednotlivých souborů programu přišla závěrečná kompilace kódu. Ta se nachází v souboru Receiver.c viz 8.1. Oproti programování lehčích zařízení, zde se muselo jít cestou přerušení, jak je stručně popsáno v 8.1. Bylo to hlavně z důvodů, že mohou nastat situace, kdy je potřeba vykonat tu či onu činnost, ale zároveň se nesmí na tu následující „zapomenout“. Přerušení je pro to dobrou volbou. Funguje jako zásobník příkazů, který se postupně vykonává. Určité komplikace nastaly v seřazení inicializací, které musely být všechny volány z umělého přerušení, a taktéž způsobila určité komplikace odemykací u RTCC.

9 Měření zhotoveného zařízení

9.1 Měření spotřeby elektrické energie bezdrátového teplotního senzoru

Pro ověření spotřeby celého obvodu jsem využil laboratoří na FELu katedry Mikroelektroniky. Pro ověření spotřeby jsem použil méně přesných přístrojů, jelikož měřené proudy byly v řádech mA a ne nA. Obvod jsem oživoval postupně a přitom jsem měřil proudový odběr obvodů. V tabulce 9.1.1. jsou změřené výsledné hodnoty. Prvním oživovaným obvodem byla nabíječka LTC4088-2. K ní jsem poté připojil správce napájení LTC3330 a následně připojil tyto dva funkční bloky ke zbytku obvodu.

Tabulka 9.1.1. Tabulka proudové spotřeby obvodů pro správu napájení

| spotřeba obvodů pro správu napájení | | |
|--|------------|-------|
| LTC4088-2 | | |
| Ubaterie | Ibat | Uout1 |
| (V) | (μ A) | (V) |
| 3,8 | 23,7 | 3,26 |
| LTC4088-2 spolu s LTC3330 | | |
| Ubaterie | Ibat | Uout2 |
| (V) | (μ A) | (V) |
| 3,8 | 50 | 3,339 |
| celkový odběr zařízení s krystalovým oscilátorem | | |
| Ubaterie | Ibat | Uout2 |
| (V) | (mA) | (V) |
| 3,8 | 22,5 | 3,321 |

Po změření odběru proudu samotným obvodem, jsem změřil odběr proudu i se zbylými aktivními součástmi bezdrátového senzoru jako je rádiový modul. Zde jsem při měření vyzkoušel i mód, kdy jsem přepnul běh mikrokontroléru na vnitřní RC oscilátor namísto krystalového oscilátoru. Změřené hodnoty viz tabulka 9.1.2

Tabulka 9.1.2 Tabulka proudové spotřeby obvodů pro správu napájení

| celková proudová spotřeba obvodů | |
|----------------------------------|--------------------------|
| | I _{bat} (mA) |
| běh bez rádiového modulu | |
| vnější oscilátor | 22,5 |
| vnitřní oscilátor | 15 |
| spotřeba rádiového modulu | |
| příjem dat | 42 |
| vysílání dat | 46 |

9.2 Měření komunikace v reálném prostředí

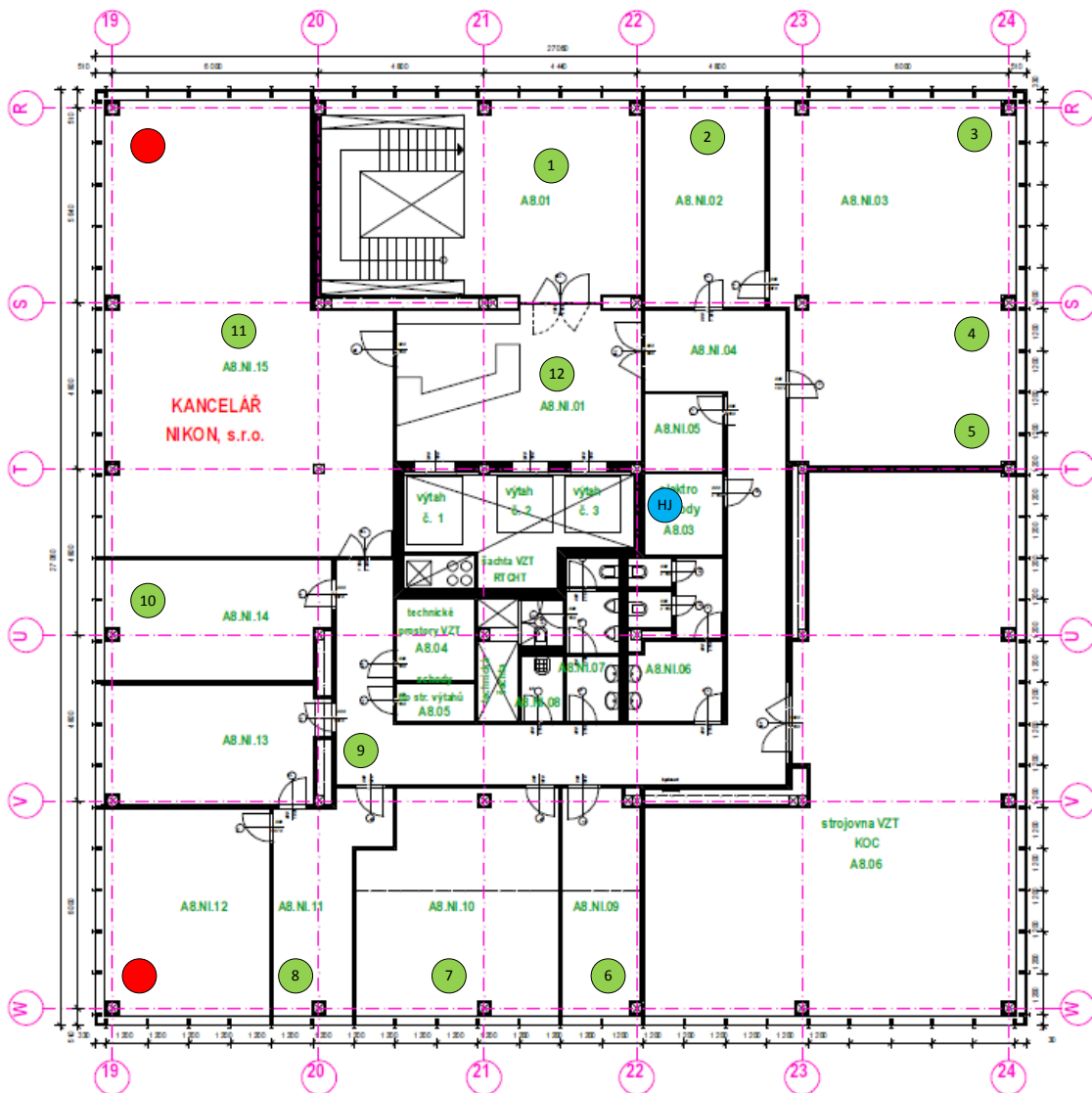
Pro ověření a prozkoumání komunikace jsme s kolegou využili prostor kancelářské budovy na Kohinooru Palác Kodaňská Office Center pro některé známá podle dřívější sídlící firmy Chemapol a.s. Tuto budovu jsme volili z důvodu, že bychom rádi s kolegou udělali nabídku naší senzorové sítě do této budovy. Měření probíhalo v 8. vystěhovaném patře budovy A. Skelet budovy je ze železobetonu. Jelikož jsou kancelářské budovy neustále přestavovány po interiérové stránce, tak příčky jsou stavěny ze sádrokartonové konstrukce. Samotný sádrokarton bývá o tloušťce 20 mm.

9.2.1 Měření na 8 nadzemním podlaží v budově A

Řídicí systém vzduchotechniky na patře je umístěn v technické místnosti spolu s ostatní elektroinstalací. Tímto se nám určilo místo, kde bude umístěna potenciální bezdrátová sběrná jednotka. Ta je na obrázku 9.2.1.1 označena modrým kolečkem s nápisem HJ. Hlavní jednotka byla při měření osazena všesměrovou anténou o zisku 2 dBi. Měření probíhalo tak, že jsme měřili kvalitu přijímaného signálu do hlavní jednotky od senzoru z různých míst, které byly potenciální pro umístění senzoru anebo z míst, kde byl již namontován současný drátový senzor. Naměřené hodnoty jsme brali z hlavní jednotky z přijatého rámce v počítači. Hlavní jednotka dává k dispozici již zpracované údaje, tudíž jsme do této části měření nezasahovali. Na obrázku 9.2.1.1. jsou umístěné barevné tečky s čísly. Zelená tečka signalizuje místa, kde proběhla komunikace v pořádku, červené tečky označují místa, kde se nepodařilo navázat komunikaci. Přijatý číselný údaj je v rozmezí 0 – 255, kde 255 představuje nejlepší sílu signálu.

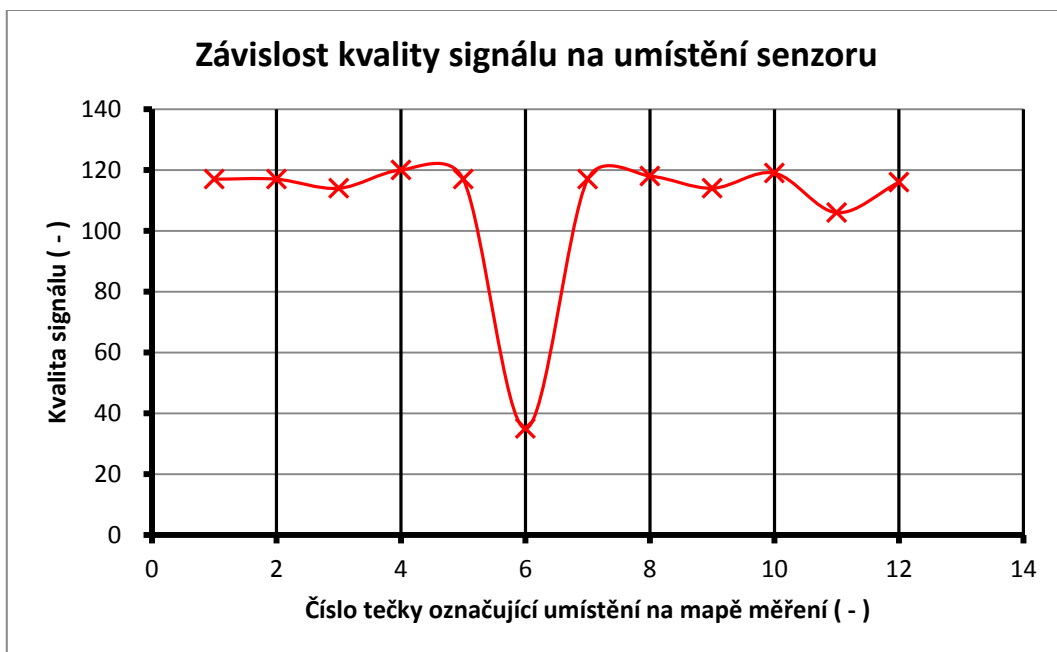
Tabulka 9.2.1.1. Měření pro 8 NP podlaží budovy A

| Měření pro 8 NP podlaží budovy A | | | |
|----------------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------|
| Číslo měření | vzdálenost od hlavní jednotky | Kvalita signálu | Síla signálu |
| (-) | (m) | (-) | (dBm) |
| 1 | 10,2 | 117 | -60,9 |
| 2 | 8,3 | 117 | -70,8 |
| 3 | 13,6 | 114 | -73,2 |
| 4 | 10,0 | 120 | -68,9 |
| 5 | 9,3 | 117 | -68,6 |
| 6 | 13,4 | 35 | -80,9 |
| 7 | 14,6 | 117 | -78,8 |
| 8 | 16,8 | 118 | -86,6 |
| 9 | 9,4 | 114 | -65,6 |
| 10 | 15,0 | 119 | -77,3 |
| 11 | 15,0 | 106 | -68,0 |
| 12 | 4,5 | 116 | -59,2 |

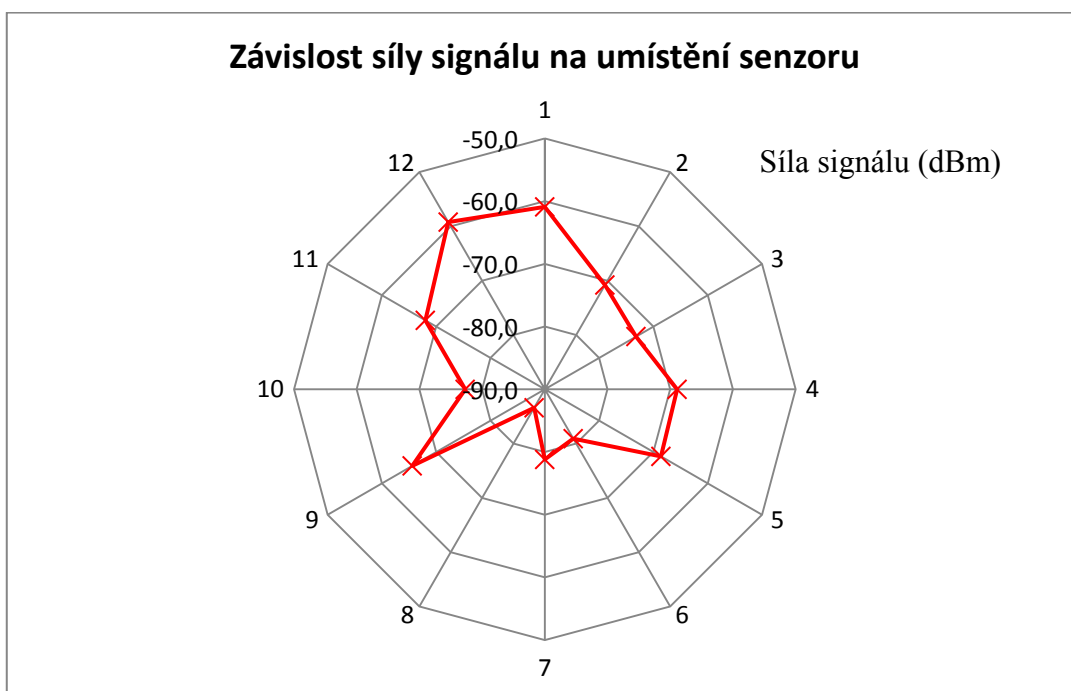


Obrázek 9.2.1.1.: Výkresová mapa 8 NP budovy A Palác Kodaňská [36]

Hlavní sběrná jednotka ● Změřený senzor ● Nezměřený senzor ●



Obrázek 9.2.1.2.: Graf závislosti kvality signálu na umístění senzoru

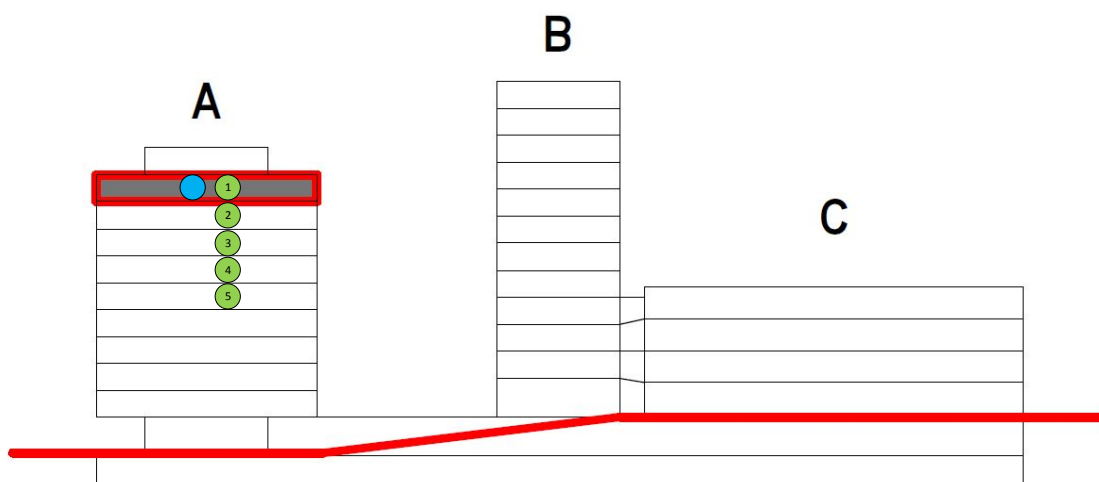


Obrázek 9.2.1.3.: Graf závislosti síly signálu na umístění senzoru

Z grafů je patrný útlum v místech, kde signál prochází více příčkami anebo jsou v okolí prvky, které ovlivňují signál. Toto je velmi patrné v místě č. 6. Ve vedlejší místnosti je strojovna vzduchotechniky. Může to být způsobeno různými odraze, které strojovna mohla vyvolat.

9.2.2 Měření skrz nadzemní podlaží v budově A

Měření jsme taktéž provedli i pro vertikální směr šíření signálu. Vybavení měření bylo stejné jako v předchozím bodě. Jelikož jsme měli přístupné jedno podlaží a to 8, které je to nejvyšší v budově, mohli jsme měřit, jak daleko signál dostřelí směrem dolů skrz podlaží. Na jednotlivých patrech jsme prováděli měření v místě, které je na obrázku 9.2.1.1 označeno zelenou tečkou s číslem 12, prostor před výtahy. Plán řezu budov je na obrázku 9.2.2.1

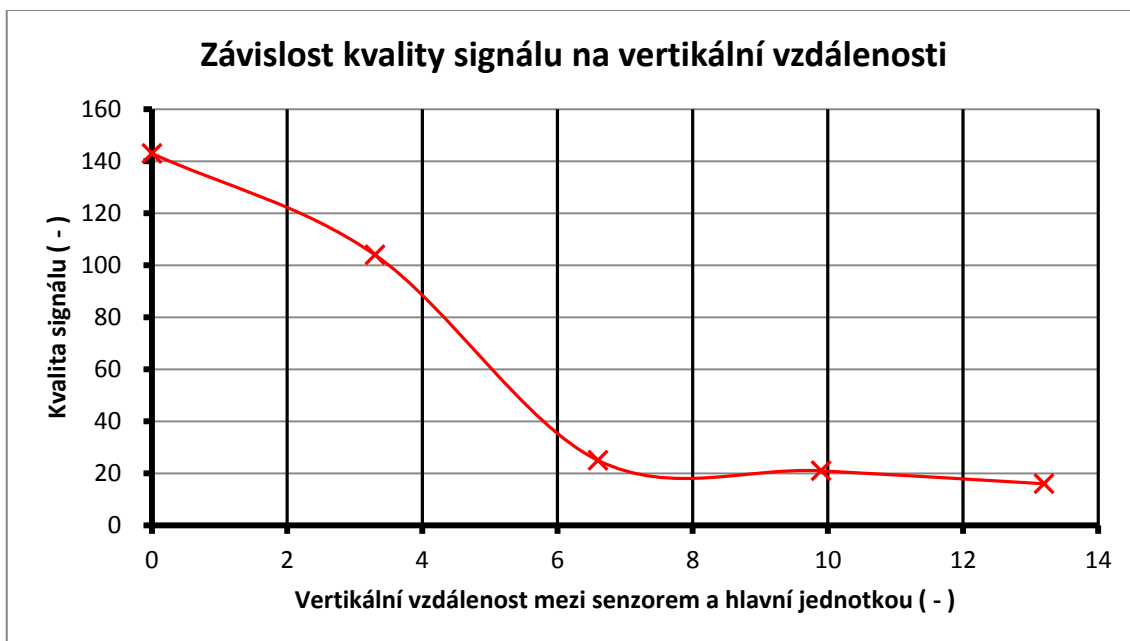


Obrázek 9.2.2.1.: Plán řezu budov Palác Kodaňská Office Center

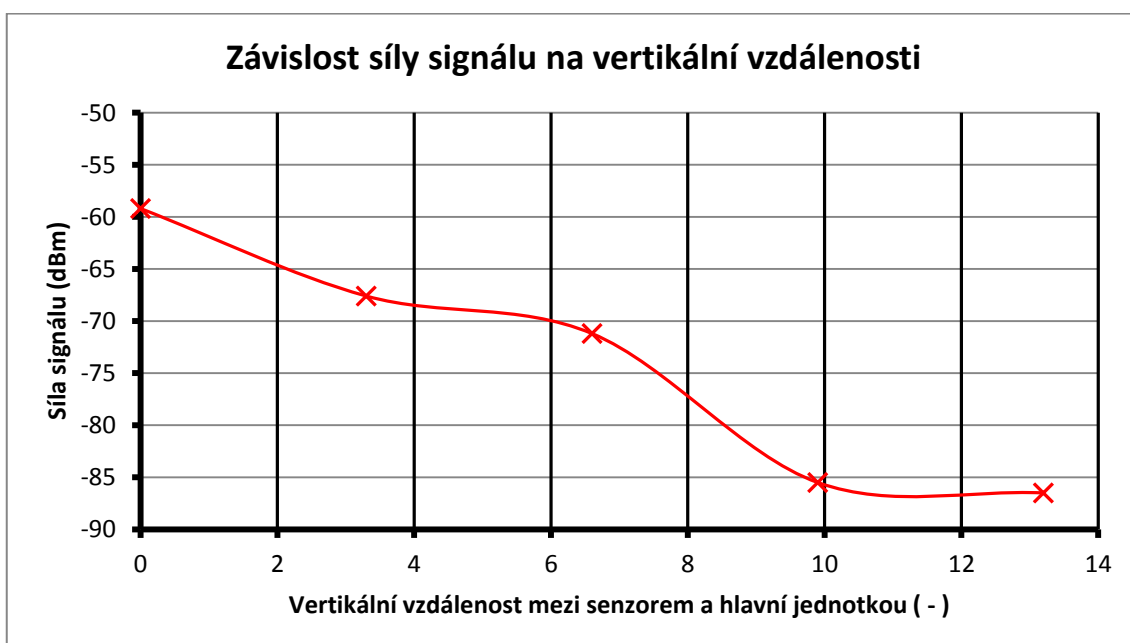
Tabulka 9.2.1.1. Měření pro 8 NP podlaží budovy A

| Měření průchodu signálu podlažím v budově A | | | | | |
|---|-------------|--------------|------------------|-----------------|--------------|
| Číslo měření | Výška patra | Rozdíl výšky | Nadzemní podlaží | Kvalita signálu | Síla signálu |
| (-) | (-) | (m) | (-) | (-) | (dBm) |
| 1 | 23,1 | 0,0 | 8 | 143 | -59,2 |
| 2 | 19,8 | 3,3 | 7 | 104 | -67,6 |
| 3 | 16,5 | 6,6 | 6 | 25 | -71,2 |
| 4 | 13,2 | 9,9 | 5 | 21 | -85,5 |
| 5 | 9,9 | 13,2 | 4 | 16 | -86,5 |

Jak je z tabulky patrné, nejnižší podlaží, odkud se nám podařilo změřit signál ze senzoru je 4NP (nadzemní podlaží). Ale už tato hodnota je silně kritická k normálnímu používání. Z nižších pater jsme signál již nezachytili.



Obrázek 9. 2.2.2.: Graf závislosti kvality signálu na vertikální vzdálenosti



Obrázek 9.2.2.3.: Graf závislosti síly signálu na vertikální vzdálenosti

Z grafů je vidět, že kvalita signálu rychle klesá a po vertikální vzdálenost 6 m už je značně malá. Toto bude nejspíš dáno konstrukcí budovu a tím, že jsme měřili v chodbě, kde byly výtahy, jiné místo v budově nebylo přístupné. U síly signálu to vypadá lépe, ale musí se brát v potaz náhoda, tzv., že jsme mohli měřit v místech, kde útlum okolím byl malý.

9.2.3 Měření komunikace ve volném prostřanství

V tomto testu měření jsme se zaměřili na max. možnou vzdálenost komunikace ve volném prostřanství. Měření probíhalo za dobrého počasí s teplotou vzduchu 20 °C. Využili jsme příjezdové cesty do objektu. Jako největší vzdálenost jsme naměřili 86 m. Tato vzdálenost není přesná, brali jsme ji dle mapy.

9.2.4 Zhodnocení měření komunikace v reálném prostředí

Ze zpracovaných dat měření jsme usoudili, že senzorová síť tohoto typu by dokázala obstát v reálném prostředí. Výrobce modulu udává, že dosah na přímo viditelnou vzdálenost je až 120 m [23]. My jsme naměřili 86 m. Výrobce neudává pro tuto vzdálenost více parametrů měření, z čehož usuzuju, že námi naměřená vzdálenost odpovídá našemu předpokladu komunikace. Pro zlepšení komunikace na patře by bylo vhodné použít u hlavní jednotky anténu s větším ziskem. Námi používaná anténa měla zisk 2 dBi, taktéž vhodnější umístění antény by značně mohlo přispět k lepší komunikaci. Při komunikaci skrz podlaží budovy, jsme byli příjemně překvapeni. Komunikaci skrz více pater jsme primárně nezamýšleli a při testování jsme si ověřili, že je to možné. Opět by zde mohla dopomocť lepší anténa u hlavní jednotky.

10 Ekonomický rozbor senzoru

Ekonomicky pohled na věc je v případě bezdrátového senzoru těžší věc. V práci jsem na bezdrátové senzory nenarazil. Neřekl bych, že je to dáno tím, že nejsou na trhu, ale že na ně zákazníci nejsou zvyklí. Z pohledu zákazníka je dneska důležitá cena. Dost často předčí i vlastnosti zařízení. Tudíž je důležité minimalizovat finanční nároky na výrobu. Toho se dá docílit strojní výrobu. Tu jsem pochopitelně při výrobě prototypu nevyužil, jelikož při výrobě málo kusů, by se tato cena vyšplhala nepřiměřeně vysoko. Dalším efektivním prvkem ke snížení ekonomických nároků je nákup součástek u velkoobchodců. Toho jsem využil. V neposlední řadě je důležité snížit i cenu desky plošných spojů. V našem případě koukat po ruční výrobě DPS je čistý nesmysl. Deska je velmi využita při pohledu na její plochu. Z toho plyne, že vzdálenosti mezi jednotlivými vodiči jsou velmi malé a při ruční výrobě i fotocestou, nelze zaručit, že procento zkažení desky bude malé, obzvláště po přihlídnutí faktu, že na desce plošných spojů jsou 2 součástky s pouzdem QFN, které vyžadují prokovy. Ostatně prokovy se vyrábí v domácím či poloprofesionálním prostředí velmi těžko. Další výhodou zhotovení DPS u cizí firmy je její určitá odpovědnost za výrobek, to znamená přenesení jisté odpovědnosti na její bedra. Při výrobě „doma“ lze jen stěží toto zajistit. Výroba 1 ks DPS při dobře zadané zakázce u firmy PragoBoard vyšla cca na 300 Kč. Tato částka je velmi přijatelná s ohledem na tyto výhody.

Tabulka 10.1. Rozpočet součástek na 1ks bezdrátového teplotního senzoru

| Název | Pozice | Hodnota | Ks | Cena za kus | Celkem |
|-----------------------|-----------------|------------------|----|-------------|-----------|
| Li-Ion akumulátor | Battery | 1700 mAh | 1 | 212,38 Kč | 212,38 Kč |
| Keramický kondenzátor | C1, C2 | 15 pF | 2 | 0,25 Kč | 0,50 Kč |
| Keramický kondenzátor | C3, C4, C6, C17 | 100 nF | 4 | 0,17 Kč | 0,68 Kč |
| Tantalový kondenzátor | C5, C12, C16 | 10 μ F | 3 | 5,82 Kč | 17,46 Kč |
| Super kondenzátor | C7, C8 | 22 mF | 2 | 22,18 Kč | 44,36 Kč |
| Tantalový kondenzátor | C13, C14 | 4,7 μ F | 2 | 3,31 Kč | 6,62 Kč |
| Tantalový kondenzátor | C10 | 47 μ F | 1 | 3,81 Kč | 3,81 Kč |
| Tantalový kondenzátor | C11 | 22 μ F | 1 | 7,13 Kč | 7,13 Kč |
| Tantalový kondenzátor | C15 | 1 μ F | 1 | 7,13 Kč | 7,13 Kč |
| Keramický kondenzátor | C9 | 1 μ F | 1 | 0,57 Kč | 0,57 Kč |
| Keramický kondenzátor | C18, C19 | 12 pF | 2 | 0,19 Kč | 0,38 Kč |
| Dioda | D1 | - | 1 | 0,44 Kč | 0,44 Kč |
| Nabíjecí obvod | LTC4088-2 | - | 1 | 62,92 Kč | 62,92 Kč |
| Správa napájení | LTC3330 | - | 1 | 101,60 Kč | 101,60 Kč |
| Digitální teploměr | DS1820 | - | 1 | 35,73 Kč | 35,73 Kč |
| Mikrokontrolér | PIC18F25J11 | - | 1 | 64,80 Kč | 64,80 Kč |
| ZigBee modul | MRF24J40MA | - | 1 | 178,00 Kč | 178,00 Kč |
| Konektor | MICRO-USB_B_ECE | - | 1 | 33,00 Kč | 33,00 Kč |
| Konektor | DC-8N | - | 1 | 9,86 Kč | 9,86 Kč |
| Zástrčka do konektoru | FA67555 | - | 1 | 23,00 Kč | 23,00 Kč |
| Konstrukční krabička | - | - | 1 | 83,77 Kč | 83,77 Kč |
| Cívka | L1 | 47 μ H | 1 | 3,65 Kč | 3,65 Kč |
| Cívka | L2 | 22 μ H | 1 | 6,08 Kč | 6,08 Kč |
| Cívka | L3 | 3,3 μ H | 1 | 3,20 Kč | 3,20 Kč |
| LED | LD1 | žlutá | 1 | 4,52 Kč | 4,52 Kč |
| LED | LD2 | zelená | 1 | 4,76 Kč | 4,76 Kč |
| Krystal | Q1 | 20 MHz | 1 | 11,71 Kč | 11,71 Kč |
| Krystal | Q2 | 32.768 kHz | 1 | 3,86 Kč | 3,86 Kč |
| Rezistor | R1, R5, R6 | 470 Ω | 3 | 2,55 Kč | 7,65 Kč |
| Rezistor | R2 | 10 k Ω | 1 | 2,52 Kč | 2,52 Kč |
| Rezistor | R4 | 4,7 k Ω | 1 | 1,89 Kč | 1,89 Kč |
| Rezistor | R7 | 8,2 Ω | 1 | 0,23 Kč | 0,23 Kč |
| Rezistor | R3 | 2,94 k Ω | 1 | 0,21 Kč | 0,21 Kč |
| Rezistor | R8, R9 | 10,85 k Ω | 1 | 0,19 Kč | 0,19 Kč |
| Servisní piny | JP1 | - | 1 | 32,00 Kč | 32,00 Kč |
| Světlovod | - | - | 1 | 20,23 Kč | 20,23 Kč |
| Tlačítkový spínač | S1 | - | 1 | 4,97 Kč | 4,97 Kč |

| | |
|--------|-------------|
| Celkem | 1 001,81 Kč |
|--------|-------------|

Po součtu potřebného materiálu uvedeného v tabulce 10.1 a nákladů na pořízení DPS vychází materiální náklady na stavbu jednoho bezdrátového teploměru na cca 1 300 Kč. Ceny produktů, které nebyly k dispozici v České Republice, jsem objednával v aktuálním kurzu 1 \$ = 20,04 Kč, tento kurz jsem následně využil pro zbylé přepočty všech položek, které nebyly k dispozici v CZK. Do výsledné ceny 1 300 Kč není zahrnuta cena za vývoj řídicí firmwaru a zbylé náklady spojené s vývojem. Tabulka č. 10.2 ukazuje srovnání cenami srovnatelných produktů. Cena za vyvíjený bezdrátový teplotní senzor jsem po úvahách a zkušenostech z práce uvádím jako 2 900 Kč. Tuto cenu jsem bral ze zkušeností s nákupem prvku pro měření a regulaci, kdy ceny uváděné firmami na internetu jsou pro naprosto obyčejného zákazníka. Nejsou primárně určeny pro firmy, které se tímto odvětví zabývají. Od svého šéfa jsem se naučil, že při kupování např. senzorů firma je velmi ochotna dát slevu 30-40% z původní ceny (ceny na internetu, ceny pro běžného zákazníka) a že jsou tyto ceny na internetu již o tuto přírážku zvednuty. Tedy počítá se dopředu s tím, že pro specializované firmy se dá sleva. Proto jsem cenu navýšil na částku 2 900 Kč, kdy po uplatnění této strategie (sleva 40%) spadne cena na 1 740 Kč a po odečtení nákladů 1 300 Kč zbývá částka 440 Kč. Z této hodnoty bych odečetl 140 Kč na vývoj a zbylou fyzickou realizaci bezdrátového senzoru. Uvažovaný zisk z jedné jednoty by byl poté 300 Kč. Zhodnocení peněz za vývoj (firmware, hardware) je v tomto případě složité a je nutné uvažovat jejich postupnou dlouhodobou návratnost v podobě zisku. Pro zlepšení výnosu zisku je nezbytné se podívat na položky, u kterých lze dobře snížit náklady. Za tyto položky považuju nákup materiálu. Zakoupením méně přesných součástí jako jsou rezistory, některé kondenzátory, cívky a konektory by šla snížit cena rozumným způsobem. Další prvkem ke snížení výrobních nákladů je sériová výroba, ta by se promítla do výroby DPS, materiálu a kompletace výrobku.

Tabulka 10.2. Stručné srovnání cen senzorů na trhu s vyvíjeným senzorem

| Bezdrátové senzory | | | | |
|--|-------------------------------|--------------|-------------|-------|
| Výrobce | popis jednotky | model | cena | zdroj |
| Thermokon | teplotní senzor, regulátor | SR04 | 3 908,00 Kč | [38] |
| Thermokon | teplotní senzor | SR65 | 4 489,00 Kč | [39] |
| Omega | teplotní senzor | UWRTD-2-NEMA | 5 180,00 Kč | [42] |
| Mnou vyvíjený bezdrátový teplotní senzor | | | 2 900,00 Kč | - |
| Senzory s kabelovým připojením | | | | |
| Domat | Pokojové čidlo teploty Pt1000 | RSTF Pt1000 | 813,31 Kč | [43] |
| Thermokon | teplotní senzor | AGS54 | 411,40 Kč | [44] |

11 Závěr

Bezdrátový teplotní senzor ve finální podobě byl vytvořen v podobě jednoho kusu, druhý kus jednotky nemá konstrukční krabičku. Zhotovením finálního produktu neukončuju vývoj senzoru a spíše tím práce započala. Během vývoje došlo k různým problémům popsáných v předcházejících kapitolách. Tyto problémy se mi podařilo úspěšně vyřešit či obejít jiným řešením tak, abych dosáhl cíleného produktu.

Ve vývojovém čase jsem na základě aktuálních prací přicházel na možné zlepšení a ty které již nebylo možné zakomponovat do aktuálního výrobku, jsem si poznamenal. Jedna z myšlenek na budoucí vylepšení je oblast úspory energie, kdy bych rád do budoucna vylepšil režim spotřeby. Například zavedením zpětné vazby o síle signálu mezi senzorem a hlavní sběrnou jednotkou se dá docílit toho, že jednotka bude nastavovat vysílací výkon podle aktuální potřeby a tím sníží svoje energetickou náročnost. Dalším prvkem k vylepšení je zlepšení spacího módu. Po nepříjemných zkušenostech s RTCC (reálným časem) jsem dospěl k závěru, že mnohem efektivnější je využít externího modulu s RTC (Real Time Clock), který disponuje vlastní baterií. Komunikace by následně probíhala pomocí sběrnice SPI, výhodou je, že vývojové prostředí MikroC disponuje knihovnamy pro RTC namísto RTCC. Jednotku bych dále rád více prozkoumal v oblasti průmyslového použití a do dalšího vývoje zakomponoval další získané teoretické a praktické poznatky ze školy a práce.

Měřením zhotoveného zařízení jsem ověřil malý proudový odběr. Max odebíraný proud obvodem jsem naměřil 46 mA, tuto hodnotu jsem naměřil ve chvíli, kdy obvod vysílal informace hlavní jednotce. Při měření integrovaných obvodů pro správu napájení a nabíječky akumulátoru jsem ověřil jejich malý odběr, který dohromady činil 50 μ A. Měřením jsem ověřil, že zařízení odebírá přijatelně malé množství proudu, které je by bylo možné do budoucna vylepšit softwarovou stránkou, kdy je nutné se zaměřit na stav, kdy čidlo nekomunikuje a ani neměří teplotu vzduchu.

Aby bylo možné již současně postavenou jednotku upravovat o aktuální vylepšený firmware, zabudoval jsem do senzoru příslušné programovací servisní piny. Bezdrátový teploměr obsahuje dále servisní piny pro monitorování běhu programu, to umožní budoucí zlepšení firmwaru při pozorování chování v reálném prostředí po delší dobu. Pro širší využití senzoru do budoucna plánujeme s kolegou postavení různých převodníků, které umožní propojit senzorovou síť se systémem různých výrobců na trhu a tím zvýšit prodejní šance produktů.

V postaveném bezdrátovém teplotním senzoru z vlastního pohledu vidím potenciální přínos i do mé současné práce, jelikož při obměně periférii, může již vyvinuté zařízení sloužit pro další aplikace. Jedna z potenciálně možných je bezdrátový přenos informace o spotřebě elektřiny v budově, kde sídlí firma.

Seznam použité literatury a zdrojů:

- [1] – Ing. Jan Babčaník.: Spínané zdroje, www.hw.cz/teorie-a-praxe/spinane-zdroje.html, cit. dne 15.5.2014
- [2] – Martin Malý.: Sběrnice 1-Wire™, www.hw.cz/navrh-obvodu/rozhrani/sbornice-1-wiretm.html, 15.5.2014
- [3] – Datasheet pro teploměr DS18B20 od firmy Maxim IP.:
<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>, 15.5.2014
- [4] – Pavel Tišnovský.: Externí sériové sběrnice SPI a I2C,
<http://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbornice-spi-a-i2c/> , 15.5.2014
- [5] – Odborný popis architektury a programování 5081 MCU,
www.mikroe.com/chapters/view/67/chapter-4-at89s8253-microcontroller/#ch4.9,
15.5.2014
- [6] – Ata Elahi, Ph.D., Adam Gschwender.: ZigBee Wireless Sensor and Control Network, ISBN 9780137134854
- [7] – Ing. Aleš Lajcman: Přenos signálu mezi rádiovými moduly,
<http://www.artbrno.cz/index.php/technical-articles/theory-experience/46-signals-between-radio-modules>, 15.5.2014
- [8] – ZigBee Specification - Document 053474r17: <http://www.zigbee.org/> , 15.5.2014
- [9] – Mikrokontroléry PIC,[http:// mikrokontrolery-pic.cz/zaciname/co-je-to-mikrokontroler](http://mikrokontrolery-pic.cz/zaciname/co-je-to-mikrokontroler), 15.5.2014
- [10] – Thomas Kibalo, Beginners Guide to Programming the PIC24/dsPIC33, ISBN 9781468152630
- [11] – David Matoušek, C PRO MIKROKONTROLÉRY PIC, ISBN 9788073004132
- [12] Presentace Mikrokontroléry dostupná z:
http://www.umel.feec.vutbr.cz/bdom/predn/Mikrokontrolery_1.pdf 15.5.2014
- [13] Ing. Jan Formánek, Bakalářská práce – Infračervené dálkové ovládání s možností časového nastavení funkcí
- [14] - Microchip; Dostupné z: <https://www.microchip.com/pagehandler/en-us/family/8bit/architecture/pic18.html>, 15.5.2014

- [15] – Datasheet pro mikrokontrolér PIC18F25J11,
<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en533682>
15.5.2014
- [16] – Datasheet pro teploměr DS18B20,
<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>, 15.5.2014
- [17] – Pohled na pouzdro TO-92,
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/0a/TO-92_Front_with_Pin_Numbers.svg/350px-TO-92_Front_with_Pin_Numbers.svg.png,
15.5.2014
- [18] – Pohled na pouzdro I/SS,
<http://media.digikey.com/Renders/Microchip%20Tech%20Renders/20-SSOP.jpg>,
15.5.2014
- [19] – Datasheet pro teploměr DS18S20,
<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18S20.pdf>, 15.5.2014
- [20] – Datasheet pro BQ25570, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25570.pdf> ,
15.5.2014
- [21] – Datasheet pro LTC3330, <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3330fa.pdf>,
15.5.2014
- [22] – Datasheet pro LTC4088-2, <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/408812fc.pdf>,
15.5.2014
- [23] – Datasheet pro MRF24J40,
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39776C.pdf>, 15.5.2014
- [24] – Datasheet pro MRF24J40MA,
<http://www.tme.eu/cz/Document/447fd39ee088b7e6fcbab3efe2438046/mrf24j40ma.pdf>
, 15.5.2014
- [25] – Prodejní informace o MRF24J40MA, http://www.tme.eu/cz/details/mrf24j40ma-i_rm/komunikacni-moduly-rf/microchip-technology/#, 15.5.2014
- [26] – Typy fotovoltaických panelů, <http://www.solar-facts.com/panels/panel-types.php>,
15.5.2014
- [27] – Fotovoltaický panel, <http://dx.com/p/miniisw-sw-008-0-8w-solar-powered-battery-panel-board-black-224274>, 15.5.2014

- [28] – Fotovoltaický panel, <http://dx.com/p/solar-power-panel-4-2v-130-150ma-12391>, 15.5.2014
- [29] – Fotovoltaický panel, <http://dx.com/p/miniisw-sw-015-1-5w-polysilicon-solar-panel-black-223292>, 15.5.2014
- [30] – Fotovoltaický panel, <http://dx.com/p/diy-2v-350ma-solar-battery-panel-black-240177>, 15.5.2014
- [31] – Fotovoltaický panel, <http://www.tme.eu/cz/details/opl90a44101/fotovoltaiicke-moduly/optosupply/#>, 15.5.2014
- [32] – Fotovoltaický panel,
<http://www.tme.eu/cz/details/asi30002060090m/fotovoltaiicke-moduly/#>, 15.5.2014
- [33] – Fotovoltaický panel, <http://www.tme.eu/cz/details/mf-10w/fotovoltaiicke-moduly/#>, 15.5.2014
- [34] – Štěpán Berka, Elektrotechnická schémata a zapojení 2, ISBN 9788073002541
- [35] – Datasheet pro programátor PICKIT3,
https://www.sparkfun.com/datasheets/Programmers/PICKit_3_User_Guide_51795A.pdf, 15.5.2014
- [36] – Výkres 8. NP budovy A, Palác Kodaňská Office Center (bývalý Chemapol)
- [37] – Prodejní katalog firmy Legrand,
http://www.legrand.cz/userfiles/file/katalogy/byvanie/Celiane_katalog_2012.pdf, 18.5.2014
- [38] – Prodejní informace o výrobek SR04 firmy Thermokon, <http://www.rem-shop.cz/mereni-a-regulace/snimace-teploty/snimace-do-interieru/bezdratovy-snimac-teploty-sr04-992.html#bookmark-files>, 18.5.2014
- [39] – Prodejní informace o výrobek SR04 firmy Thermokon, <http://www.rem-shop.cz/mereni-a-regulace/snimace-teploty/snimace-venkovni/bezdratovy-snimac-teploty-sr65-973.html#bookmark-files>, 18.5.2014
- [40] – Datasheet pro SR65, <http://www.rem-shop.cz/files/files/973/thermokon-sr65-datasheet-en.pdf>, 18.5.2014
- [41] – Prodejní informace pro výrobek WNS,
<http://www.deltacontrols.com/products/hvac/network-sensors-io-expansion-modules/wns-zigbee-wireless-sensor>, 18.5.2014

[42] – Prodejní informace pro výrobek UWRTD-2-NEMA,

<http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc.asp?ref=UWRTD-2-NEMA>, 18.5.2014

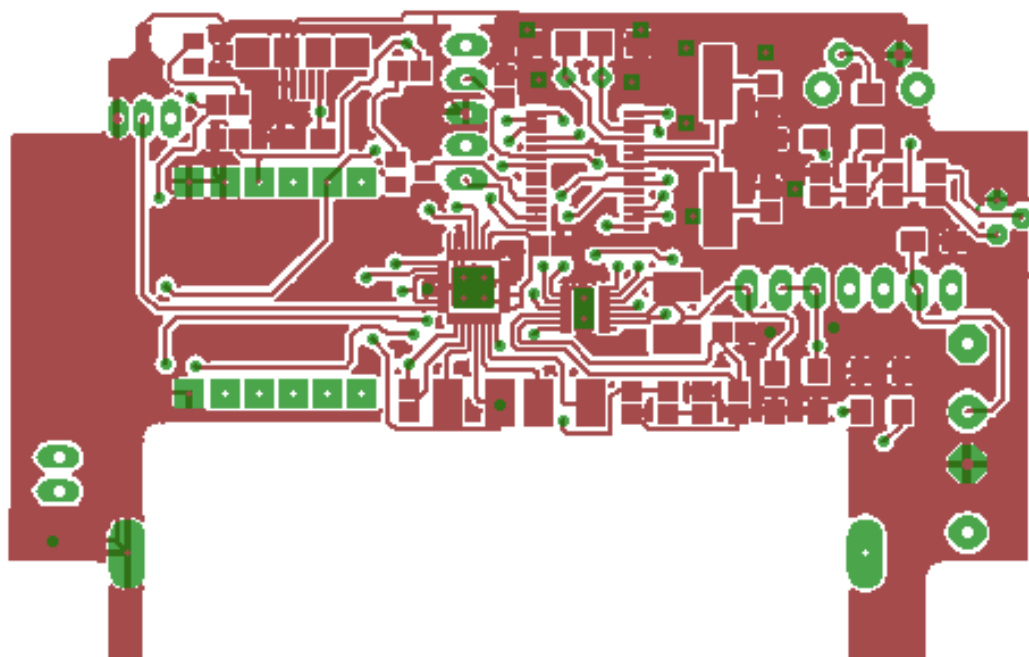
[43] – Katalog cen od firmy Domat pro teplotní senzor s kabelovým připojením

RSTF Pt1000, určeno pro firmu K+K Elektro s.r.o.

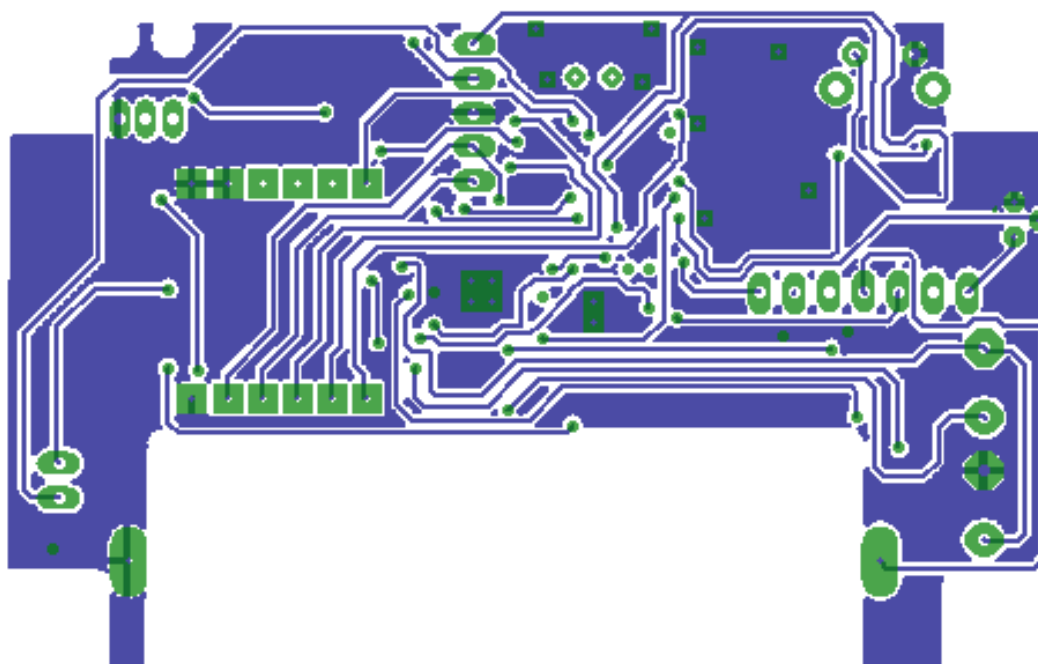
[44] – Prodejní informace pro výrobek Thermokon – AGS54, [http://www.rem-](http://www.rem-shop.cz/mereni-a-regulace/snimace-teploty/snimace-venkovni/ags54-venkovni-snimac-teploty-966.html)

[shop.cz/mereni-a-regulace/snimace-teploty/snimace-venkovni/ags54-venkovni-snimac-teploty-966.html](http://www.rem-shop.cz/mereni-a-regulace/snimace-teploty/snimace-venkovni/ags54-venkovni-snimac-teploty-966.html), 18.5.2014

12.2 Příloha B – Motivy desky plošných spojů

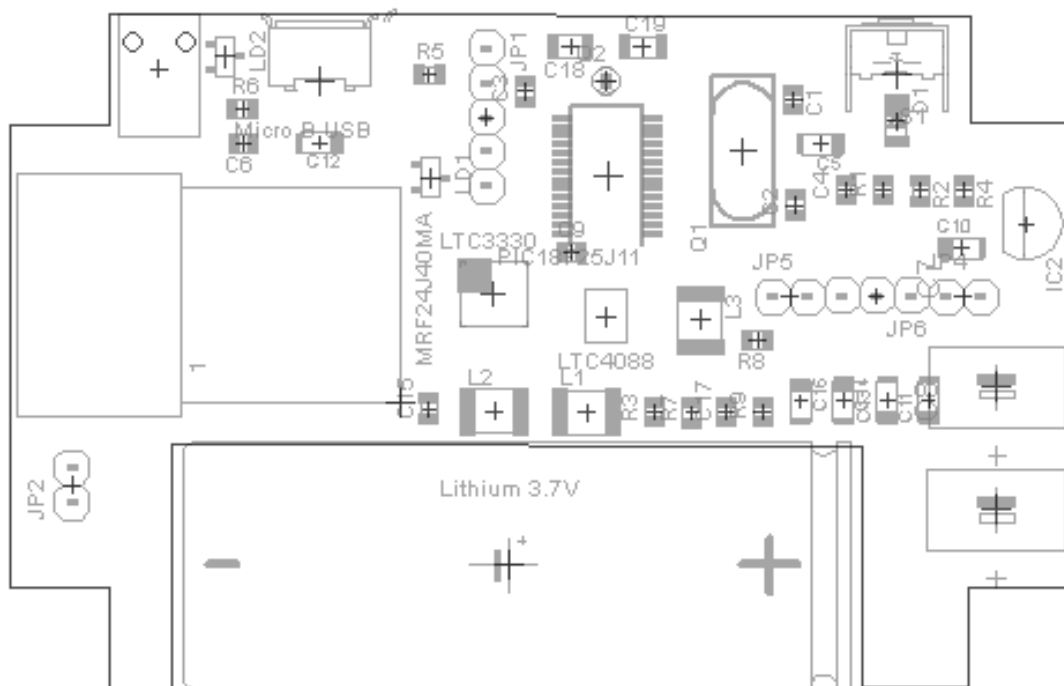


Obrázek 12.2.1.: Návrh desky plošných spojů – vrchní strana



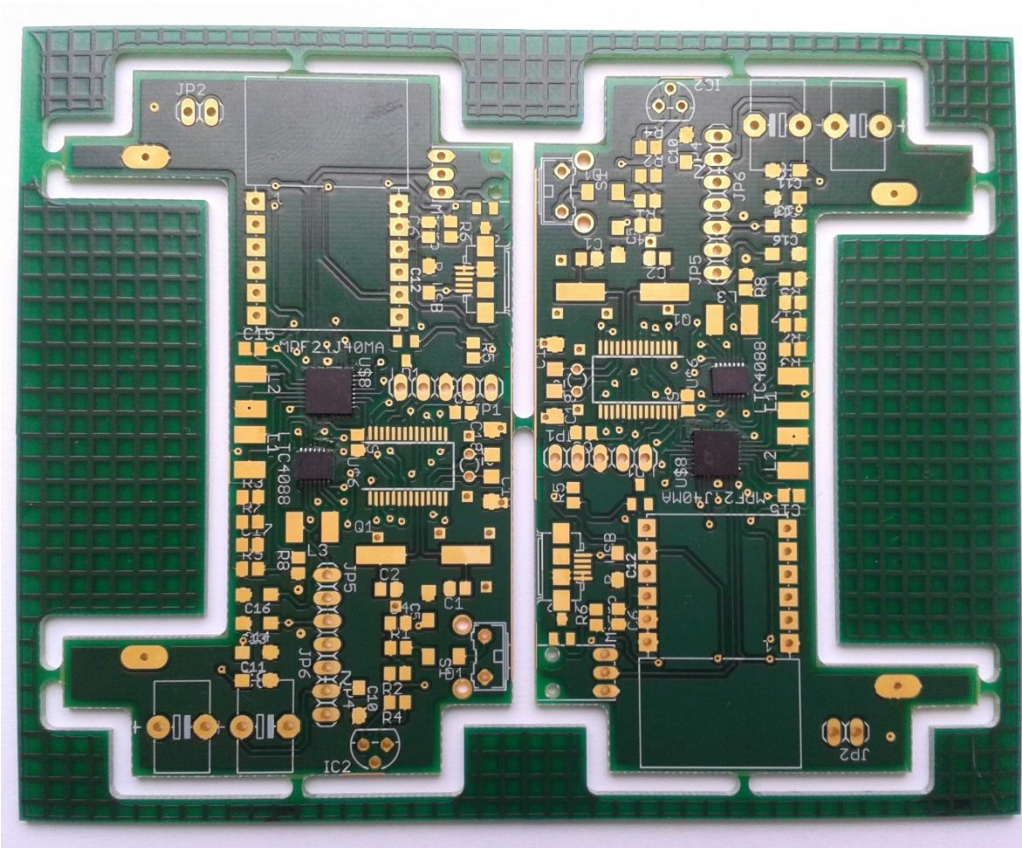
Obrázek 12.2.2.: Návrh desky plošných spojů – spodní strana

12.3 Příloha C – Osazovací plán

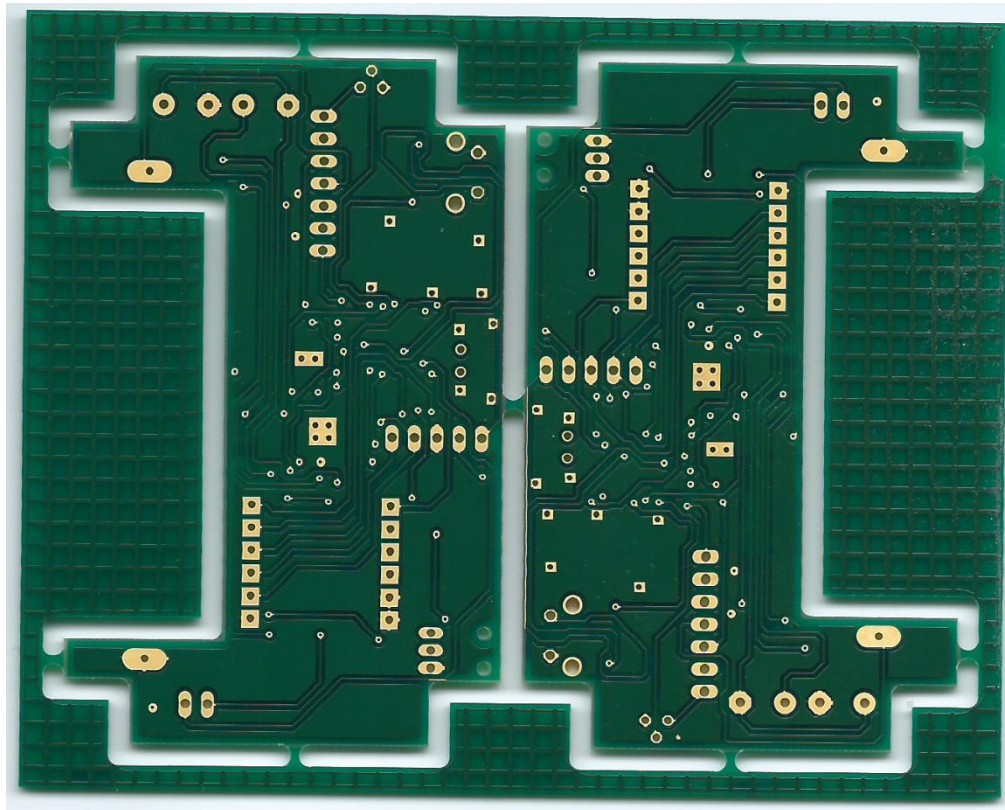


Obrázek 12.3.1.: Osazovací výkres - vrchní strana

12.4 Příloha D - Vyhotovená deska plošných spojů



Obrázek 12.4.1.: Zhotovená deska plošných spojů - vrchní strana



Obrázek 12.4.1.: Zhotovená deska plošných spojů - vrchní strana

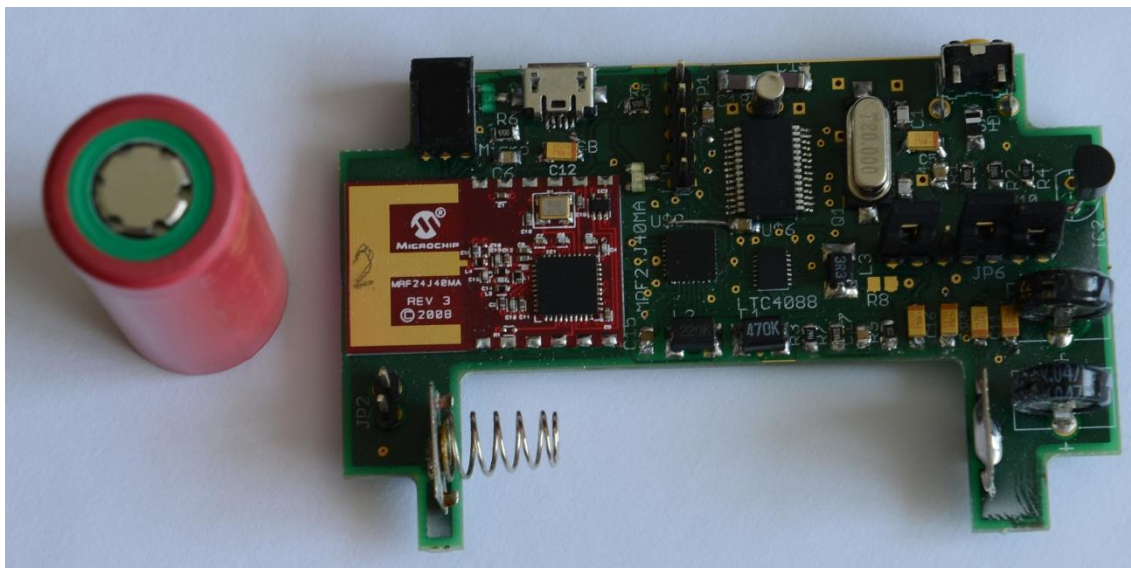
12.5 Příloha E – Seznam použitých součástek

| Název | Pozice | Hodnota |
|-----------------------|-----------------|------------------|
| Li-Ion akumulátor | Battery | 1700 mAh |
| Keramický kondenzátor | C1, C2 | 15 pF |
| Keramický kondenzátor | C3, C4, C6, C17 | 100 nF |
| Tantalový kondenzátor | C5, C12, C16 | 10 μ F |
| Super kondenzátor | C7, C8 | 22 mF |
| Tantalový kondenzátor | C13, C14 | 4,7 μ F |
| Tantalový kondenzátor | C10 | 47 μ F |
| Tantalový kondenzátor | C11 | 22 μ F |
| Tantalový kondenzátor | C15 | 1 μ F |
| Keramický kondenzátor | C9 | 1 μ F |
| Keramický kondenzátor | C18, C19 | 12 pF |
| Dioda | D1 | - |
| Nabíjecí obvod | LTC4088-2 | - |
| Správa napájení | LTC3330 | - |
| Digitální teploměr | DS1820 | - |
| Mikrokontrolér | PIC18F25J11 | - |
| ZigBee modul | MRF24J40MA | - |
| Konektor | MICRO-USB_B_ECE | - |
| Konektor | DC-8N | - |
| Zástrčka do konektoru | FA67555 | - |
| Konstrukční krabička | - | - |
| Cívka | L1 | 47 μ H |
| Cívka | L2 | 22 μ H |
| Cívka | L3 | 3,3 μ H |
| LED | LD1 | žlutá |
| LED | LD2 | zelená |
| Krystal | Q1 | 20 MHz |
| Krystal | Q2 | 32.768 kHz |
| Rezistor | R1, R5, R6 | 470 Ω |
| Rezistor | R2 | 10 k Ω |
| Rezistor | R4 | 4,7 k Ω |
| Rezistor | R7 | 8,2 Ω |
| Rezistor | R3 | 2,94 k Ω |
| Rezistor | R8, R9 | 10,85 k Ω |
| Servisní piny | JP1 | - |
| Světlovod | - | - |
| Tlačítkový spínač | S1 | - |

12.6 Příloha F – Fotodokumentace výrobku



Obrázek 12.6.1.: Pohled na otevřenou krabičku bezdrátového teplotního senzoru shora



Obrázek 12.6.2.: Pohled na osazenou desku pološných spojů bezdrátového teplotního senzoru shora spolu s akumulátorem



Obrázek 12.6.3.: Pohled na krabičku bezdrátového teplotního senzoru shora