

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra technologických zařízení staveb

**Návrh technického řešení ostrovní stanice pro
sběr dat (např. meteostanice) včetně návrhu
struktury dat pro přenos.**

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zdeněk Votruba, Ph.D.

Autor práce: Zdeněk Kolář

Praha 2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Zdeněk Kolář

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Návrh technického řešení ostrovní stanice pro sběr dat (např. meteostanice) včetně návrhu struktury dat pro přenos.

Název anglicky

A technical solution island station for data collection (eg. Meteorological station), including a proposal for the structure of the data transmission.

Cíle práce

Analyzujte technické a technologické potřeby pro technické řešení autonomní meteostanice včetně návrhu struktury přenášených dat. Navrhněte odpovídající technické řešení. Předpokládejte přenos dat v rámci moderních sítí v rámci tzv. Internetu věcí (Sigfox, LoRa).

Metodika

- 1) Literární rešerše
- 2) Návrh struktury dat a datových přenosů
- 3) Návrh a praktická realizace napájecí části meteostanice
- 4) Výběr vhodných detektorů meteostanice
- 5) Definice struktury a ověření sběru dat od zvolených detektorů
- 6) Návrh komunikačního rozhraní
- 7) Ověření funkce, vyhodnocení
- 8) Závěr a finanční zhodnocení

Doporučený rozsah práce

30 až 40 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Klíčová slova

detektory, mobilní komunikace, automatizace

Doporučené zdroje informací

Brtník, B.: Programování mikrokontrolérů s jádrem 8051 v jazyce C, BEN, 2010, 978-80-7300-264-0

DAVIS, David E. GIS for everyone: exploring your neighborhood and your world with a Geographic Information System. Redlands: ESRI Press, 1999, viii, 156 s. ISBN 1879102498.

LORA ALLIANCE, INC. LoRa Specification. 1.0. San Ramon, 2015, 82 s.

Pinker, J.: Mikroprocesory a mikropočítače, BEN, 2004, 80-7300-110-1

ROSA, Zdeněk. The Net: Principy činností a techn. vybavení počítačových sítí. 1 vyd. Pardubice: STAPRO spol. s.r.o., 1991, 172 s.

SMOLKA, J. – LUKOVIČ, T. – PERNECKÝ, M. *Příklady programů pro jednočipové mikropočítače rady 8051*. Praha: TESLA Eltos, Institut mikroeletronických aplikací, 1990. ISBN 80-7102-018-4.

ŠUBRT, V. *Jednočipové mikropočítače Intel?8048-8096*. Praha: Grada, 1992. ISBN 80-85424-66-5.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Zdeněk Votruba, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 3. 2. 2016

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 2. 3. 2016

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 28. 03. 2017

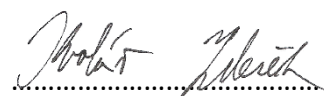
Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „Návrh technického řešení ostrovní stanice pro sběr dat (např. meteostanice) včetně návrhu struktury dat pro přenos“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne 31. 3. 2017



Zdeněk Kolář

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Zdeňkovi Votrubovi Ph.D., za odborné vedení, ochotu a cenné rady, které mi při zpracování této bakalářské práce poskytl.

Abstrakt: Cílem této bakalářské práce je navrhnout jednoduchý hardware s velmi nízkou spotřebou elektrické energie. Naměřené veličiny budou prostřednictvím bezdrátových sítí Sigfox a LoRa periodicky přenášeny k dalšímu zpracování. V teoretické části bakalářské práce je nastíněna oblast IoT a moderní bezdrátové sítě s nízkou energetickou náročností. Dále je popsán základní přehled o akumulátorech, které poskytují energii sensorům a moderní integrovaný obvod pro management a správu napájení. V praktické části bakalářské práce jsou popsány použité senzory. Především struktura přenášených dat s ohledem na možnosti a mezení bezdrátových sítí.

Klíčová slova: Sigfox, LoRa, IoT, akumulátory, senzory

A technical solution island station for data collection (eg. Meteorological station), including a proposal for the structure of the data transmission.

Summary: The aim of this bachelor thesis is to design a simple energy-efficient hardware. Recorded quantities will be periodically transferred via wireless networks SigFox and Lora for further processing. In the theoretical part of the thesis IoT field as well as modern energy-efficient wireless networks are outlined. Also, a basic summary of accumulators which provide energy for sensors and a modern power management integrated circuit management can be found. Practical part contains descriptions of sensors used. Emphasis is placed on structure of transmitted data with respect to possibilities and restrictions of wireless networks.

Key words: Sigfox, Lora, IoT, sensors, accumulators

1	Úvod	1
2	Cíl práce	2
3	Metodika práce	3
4	Přehled řešené problematiky	4
4.1	<i>IoT - Internet věcí</i>	4
4.1.1	LPWAN	5
4.1.2	LoRa	6
4.1.3	Sigfox	8
4.2	<i>Autonomní měřící zařízení</i>	9
4.2.1	Akumulátory	10
4.2.2	Napájení	14
4.2.3	Sběrnice	17
5	Praktická část práce	23
5.1	<i>Použité senzory</i>	23
5.1.1	BME280	24
5.1.2	Indikace směru větru	24
5.1.3	Rychlost větru	26
5.2	<i>Blokové schéma zapojení</i>	27
5.2.1	Sigfox	28
5.2.2	LoRa	28
5.3	<i>Struktura přenášených dat</i>	29
5.3.1	Teplota	30
5.3.2	Relativní vlhkost	31
5.3.3	Tlak	32
5.3.4	Směr větru	32
5.3.5	Rychlost větru	33
5.4	<i>Celková struktura přenášených dat</i>	34
5.5	<i>Návrh plošného spoje</i>	34
5.5.1	Návrh 50 ohmového spoje	36
6	Výsledky a jejich hodnocení	38
7	Závěr	40
8	Seznam použitých zdrojů	41

1 Úvod

Ve 21. století jsme všichni obklopeni elektronikou. Ať už jsou to chytré telefony, televize, automobily nebo pračky, myčky a jiná zařízení. Když se podíváme na to, co mají tato zařízení společného, zjistíme, že všechna zařízení potřebují pro svoji funkci nespočet senzorů. Jednotlivá zařízení však naměřené údaje využívají čistě pro svoji funkci. Díky tomuto „nedostatku“ vznikla myšlenka, co kdyby si zařízení uměly vyměňovat data, takzvaně spolu komunikovat. Myšlenka se velmi rychle ujala a vznikl svět IoT (Internet of Things).

Problém IoT je, že realizace myšlenky byla díky použitým technologiím komplikovaná. Postupně došlo i na samotný vznik nových bezdrátových sítí, které řeší problémy komunikace na velkou vzdálenost se zachováním velmi nízké spotřeby elektrické energie. Příchodem nových technologií Sigfox a Lora se otevírá pole působnosti s novou koncepcí bezdrátových senzorů.

S novými bezdrátovými technologiemi, které mají minimální spotřebu elektrické energie, však nastává problém s aktuálním hardwarem. Je potřeba vytvořit „nový“ hardware, který bude pracovat se spotřebou i několik let, až desítek let, provozu na baterii.

2 Cíl práce

V této práci bude posouzeno využití nových bezdrátových sítí v praxi. Bude proveden návrh jednoduchého hardware, měřící fyzikální veličiny. Ověření možnosti realizace senzorů s výdrží na akumulátor v řádech několika let. Využití nových sítí pro IoT a začlenění senzorů do praktického nasazení.

3 Metodika práce

V rámci přehledu řešené problematiky se budeme věnovat bezdrátovým technologiím Sigfox a Lora, přes které budou naměřená data odesílána v rámci LPWAN sítí. Aby bylo možné navrhnout v praktické části optimální řešení, je potřeba detailně zjistit funkčnost a parametry sítí. Důležitými body je pokrytí v rámci České Republiky a provozní parametry daných sítí.

Odborná literatura se obvykle věnuje akumulátorům z hlediska chemického složení a fyzikálních vlastností, ale nás spíše zajímají akumulátory z praktického hlediska pro použití... Proto byly informace čerpány na výstavách od výrobců baterií a provedených měření z internetových článků.

Na základě načerpaných informací z teoretické části bude navržena vhodná struktura pro přenos dat prostřednictvím sítí LoRa a Sigfox s ohledem na jejich omezení. Bezdrátové sítě budou přenášet naměřené hodnoty z vybraných senzorů.

Bude provedena základní koncepce zapojení hardware a vyrobeno několik testovacích přípravků, na kterých bude měřena spotřeba elektrické energie.

Z naměřených hodnot spotřeby elektrické energie jednotlivých komponent bude vyvozen závěr s dobou životnosti celého zařízení.

S těmito získanými informacemi bude navržen prototyp se správným zapojením komponent a nízkou spotřebou elektrické energie pro reálné testování.

4 Přehled řešené problematiky

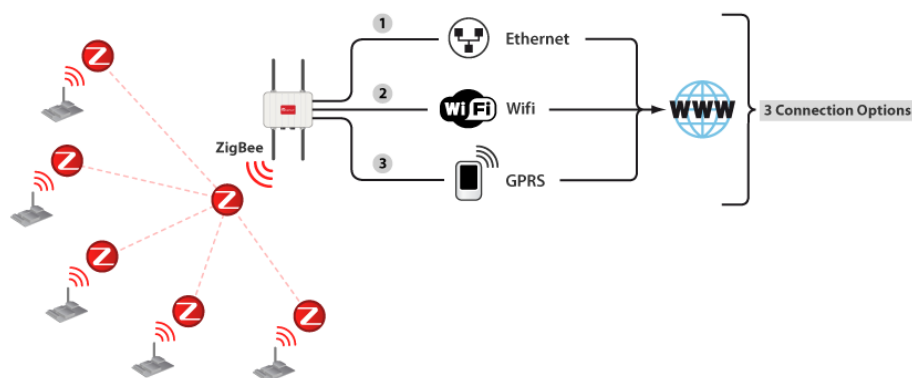
4.1 IoT - Internet věcí

Internet věcí (Internet of Things) je nový trend v oblasti moderní elektroniky. Zahrnuje možnosti komunikace zařízení mezi sebou či komunikace s člověkem. Především pomocí bezdrátových technologií s minimálním nárokem na elektrickou spotřebu. Prostor pro implementaci IoT je v podstatě neomezený. V dnešní době je elektronika téměř v kterémkoli zařízení okolo nás. Jsou to obyčejné každodenní spotřebiče jako mikrovlnná trouba, mobilní telefon, pračka či automobil. Cílem internetu věcí je, aby si zařízení byla schopna mezi sebou vyměňovat data. [1]

Ke komunikaci v IoT se díky dlouhému rozvoji používá mnoho technologií, pomocí kterých jsou si zařízení schopna mezi sebou vyměňovat data, a to jak za pomoci člověka, tak zařízení napřímo mezi sebou. Obvykle se využívají bezdrátové technologie RFID, Bluetooth (Low Energy), ZigBee, IQRF, Sigfox, LoRa. [1]

Každá technologie má technologické možnosti a podle potřeb se rozhoduje, která technologie bude zvolena. K tomu, aby zařízení byla smysluplně využitelná, je potřeba připojení do internetu. S tím jsou spojeny určité komplikace. Momentálně nejde z hlediska technologií problém řešit univerzálně. Do nedávna se problém konektivity řešil zařízením s názvem gateway v rámci dané sítě či subjektu. Jedná se o jednotku, která je připojena do internetu prostřednictvím ethernetu a obsahuje komunikační bezdrátový modul, který slouží jako most k bezdrátovým senzorům (viz Obr. 1)

Obr. 1 lokální gateway a senzory [2]



Dnes se již testují bezdrátové sítě, které mají tento problém řešit. Každé zařízení v sobě bude mít komunikační modul a napřímo komunikovat s poskytovatelem bez nutnosti gateway v rámci objektu. To je výhodné například v městských oblastech na monitorování stavu ovzduší.

4.1.1 LPWAN

LoRa, Sigfox, Lora – technologie rozvíjející se posledních pár let. Patřící do skupiny Low-Power WAN technologie. Jsou to zařízení, které mají velmi malou spotřebu elektrické energie. Nízká spotřeba je velice důležitá, jelikož zařízení, ve kterých jsou technologie použity, jsou obvykle napájeny z baterie a minimální spotřeba elektrické energie je základ pro životnost celého zařízení. Nízké spotřeby je dosaženo především nízkým počtem komunikací v rámci dne. Od jednoduchého senzoru měřící například venkovní teplotu nám stačí informace několikrát za den. Bezdrátový přenos se u jednotlivých technologií liší délkou vysílané zprávy, nicméně jsou to informace v řádech několika mála bytů. [1]

Všechny LPWAN technologie pracují v ISM pásmu. Jsou to frekvenční pásma pro průmyslové, vědecké a osobní oblasti. Frekvence schválené pro Českou Republiku jsou 433–434 MHz a 863–870 MHz. Mimo Českou Republiku, především v Americe, se používá pásmo 902–928 MHz. Ačkoliv je pásmo pro volné použití bez licenční poplatků, je nutné se chovat dle Všeobecného oprávnění. [3] To nám říká, že zařízení musí dodržet omezení maximálního efektivního vyzářeného výkonu na 10 mW pro pásmo 433–434 MHz a 25 mW pro pásmo 863–870 MHz. Dalším důležitým parametrem je dodržení 1 % odvyšlaného času v rámci dne. [1]

Z těchto omezení stanovené ve všeobecných oprávněních [3] plyne, že se technologie nehodí pro všechny účely. Především pro dálkově ovládané letouny či roboty. Výborně se však hodí pro jednoduché senzory, které se instalují v rámci měst a pravidelně hlásí informace o kvalitě ovzduší v ulicích, odečítají stavy energií a podobně.

4.1.2 LoRa

Obr. 2 Logo LoRa Alliance [4]



Bezdrátová technologie s otevřeným standardem, která je vyvíjena neziskovou organizací LoRa Alliance. Členové organizace sdílí své informace, společně pak vyvíjí hardware a software.

Samotná technologie funguje v pásmu 433–434 MHz a 863–870 MHz v rámci Evropské unie. Primárně je nastavena na 863–870 MHz, přes kterou komunikuje s gateway obvykle umístěnou na vhodném místě z hlediska šíření signálu (například nejvyšší budovy v rámci města). Umožňuje však přepnutí do proprietárního módu, ve kterém si výrobce může provádět své vlastní vylepšení produktů, jako je vzdálené přeprogramování firmware do jednotlivých senzorů. Proprietární mód pracuje na frekvenci 433–434 MHz.

Průměrné energetické nároky bezdrátových modulů jsou velmi malé:

- Pohotovostní stav 2,8 mA
- Příjem dat 14,2 mA
- Spánek 1,8 μ A
- Vysílání dle nastavení výkonu a frekvence 14,7–38,9 mA

LoRa využívá změn rychlosti přenosu pro docílení optimalizace spotřeby a propustnosti sítě. Rychlost přenosu se pohybuje mezi 0,3–22 kb/s. V Evropě může LoRa využívat rychlost 100 kb/s s modulací GFSK, ale s malým dosahem maximálně do 3 km od gateway. Většina modulů umožňuje nastavit větší vyzářený výkon, než je v České Republice povoleno a je potřeba softwarově na tuto skutečnost myslet. [5]

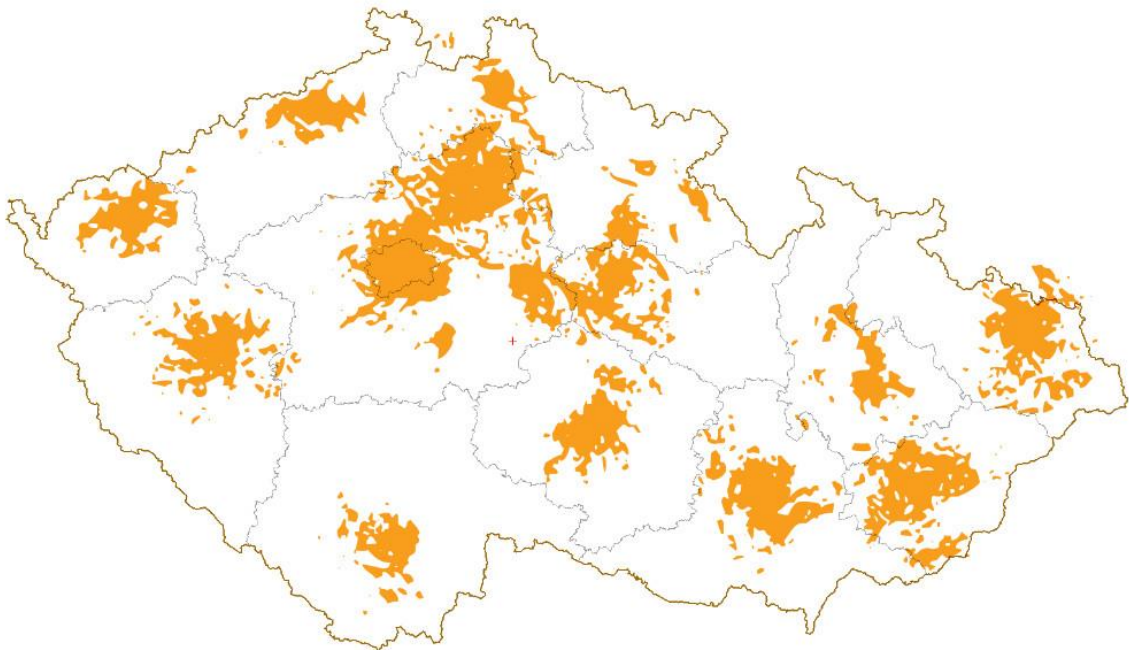
LoRa používá vlastní modulaci pro přenos dat. Podporuje široké množství topologií však doporučená je hvězda. V topologii hvězda je centrálním prvkem sítě gateway, která je připojena do internetu. Je potřeba, aby připojení k internetu bylo spolehlivé, ideálně garantované. Nicméně záleží na způsobu využití a prioritě potřeby přenést data od senzorů. [5]

Při komunikaci může jeden packet přenést až 256 Bytů dat a technologie stanovuje 3 varianty koncových bodů, které se liší stylem komunikace s gateway.

- **Bidirectional end device**– po odvysílání zprávy senzorem následují 2 krátké sloty pro příjem zpráv. Senzor vysílá pouze tehdy, když potřebuje. Energeticky výhodné řešení.
- **Bidirectional end device with sheluded recieve slots**– stejné jako v předchozím případě, ale zařízení ve stanované časy přijímá data z gateway.
- **Bidirectional end device with max receive slots**– zařízení neustále poslouchá. Nejméně vhodné pro bateriové aplikace.

V České Republice se snaží společnost České radiokomunikace o celoplošné pokrytí. V této době jsou technologií LoRa pokryta krajská města (viz Obr. 3).

Obr. 3 Pokrytí LoRou České Republiky 2017 [6]



4.1.3 Sigfox

Obr. 4 Logo Sigfox [7]



Technologie Sigfox je od roku 2009 vyvíjena francouzskou společností Sigfox a v rámci Evropy se jí daří budovat jednotné celoplošné pokrytí. V České Republice společnost spolupracuje s operátorem T-Mobile a partnery Blue Cell Networks. Veškerá infrastruktura je ve vlastnictví společnosti Sigfox a jediné místo, kde je možnost pro partnerské firmy, je v podobě modulů s bezdrátovou částí, takzvané nody.

Průměrná spotřeba energie u modulů Sigfox:

- Příjem dat: 10,4 mA
- Vysílání dat: 32,7 mA
- Idle stav: 50 μ A
- Režim vypnuto: 5 nA

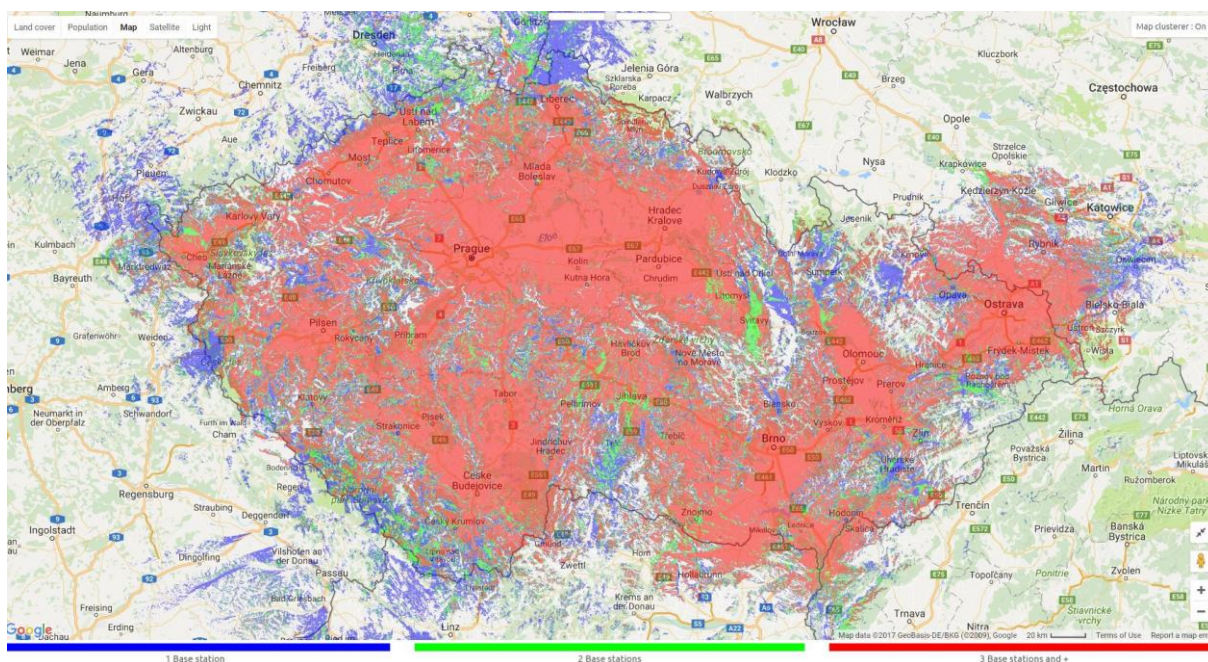
Technologie využívá pouze frekvenci 863–870 MHz a přenosové rychlosti jsou 100 b/s s modulací DBPSK (Differential Binary phase-shift keying). Doba přenosu je přibližně 4–6 sekund a maximální počet zpráv za den je 140. Vysílací výkon modulů je kolem 25 mW a není potřeba jako u technologie LoRa si výkon v rámci České Republiky hlídat.

Síť je od počátku budována s tím, že data poskytují převážně senzory a zpětná vazba není téměř možná. V rámci jednotlivých tarifů je sice možnost na nod vyslat zprávu, ale maximálně 4× za den a jedna zpráva může mít maximálně 8 Bytů. Data si nod může „vzvednout“ na gateway jedině, když sám odvysílá naměřená data. Problém je, že nelze vytvořit aplikace, kde by šlo ovlivnit, jak rychle budou nodem data přijata.

Jak již bylo zmíněno, celková infrastruktura sítě patří společnosti Sigfox a díky tomu veškerá data, která z bezdrátových senzorů putují sítí, jsou přenášena do Francie, kde jsou takzvané network servery. Z těchto serverů data putují zpět k zákazníkovi.

Společnost Sigfox má velmi dobré pokrytí téměř v celé Evropě, a především v rámci České Republiky (viz Obr. 5).

Obr. 5 Pokrytí technologií Sigfox 2017 [5]



4.2 Autonomní měřicí zařízení

Koncepce IoT zařízení je velmi podobná a liší se pouze senzorskou částí. Skládají se z komunikačního modulu. Může to být komunikační modul Sigfox či LoRa. U většiny aplikací nezáleží na výběru, jelikož parametry jsou obdobné. Pokud nám stačí z IoT zařízení data pouze sbírat, pravděpodobně si vybereme Sigfox. Přeci jen, co se pokrytí týče, je k dnešnímu roku na tom lépe Sigfox, než konkurenční LoRa. Nicméně LoRa nám dává rozšířené možnosti v podobě volby komunikační rychlosti a tím i propustnosti sítě. Dále je možné použít zpětný kanál, tedy komunikace od gateway směrem k senzoru. Ten je sice u Sigfox také možný, ale pouze několikrát za den. Dále je možnost na dálku LoRa modul přepnout do proprietárního módu a dálkově tak například v senzoru přehrát firmware. Každá technologie nabízí to své a je jen na potřebách konkrétního produktu, která technologie se zvolí.

Další částí zařízení je nepochybně napájecí zdroj. Většina senzorů je malých rozměrů a cílem je snadná montáž. Z toho nám plyne, že zařízení jsou obvykle napájena z baterie, případně doplněna o solární panel, který se snaží prodloužit životnost celého zařízení.

Odlišnou částí je senzorka, která se mění podle potřeb měření. Jsou na ni kladeny poměrně vysoké nároky, co se spotřeby týče, jelikož jsou zařízení malá a baterie nemá neomezenou kapacitu. Je potřeba, aby zařízení umělo pracovat s elektrickou energií. Plynou z toho různá omezení v podobě množství naměřených dat, jelikož si nemůžeme dovolit kontinuálně sledovat měřené veličiny, ale měříme pouze s nízkou periodicitou. Nicméně pro většinu aplikací jsou tyto informace dostačující.

4.2.1 Akumulátory

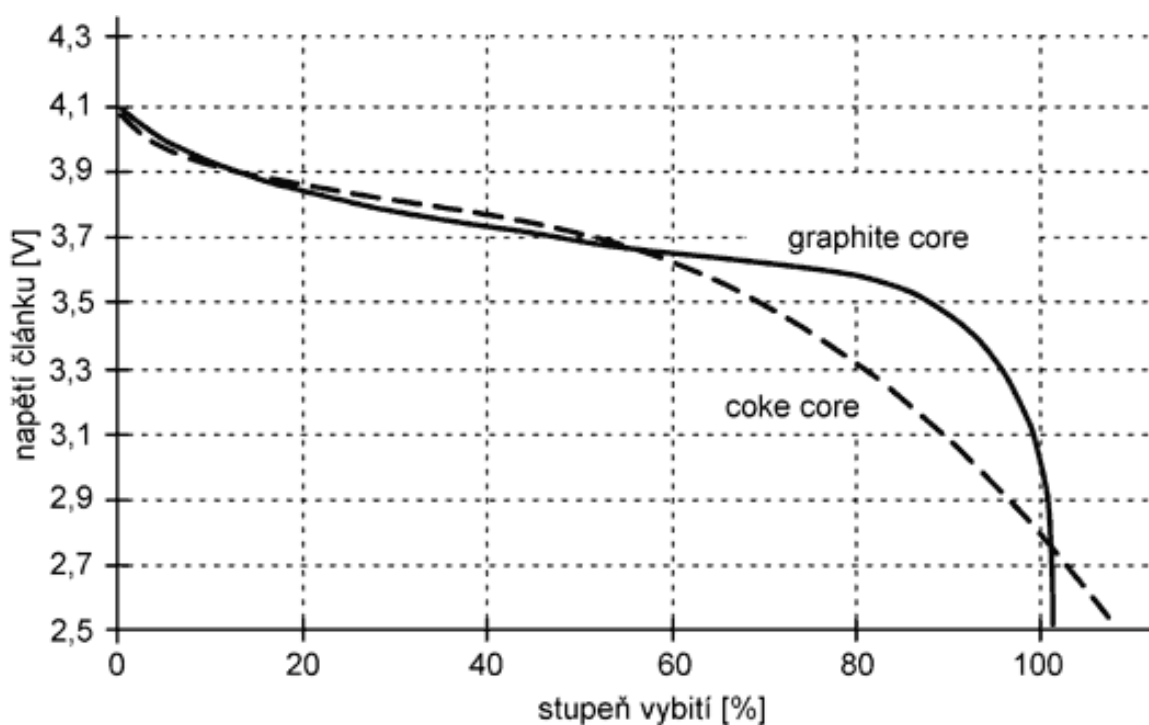
Na zařízení jsou kladeny jisté nároky, především co se týče životnosti na baterii/akumulátor. Je proto důležité vybrat vhodný akumulátor, aby zařízení bylo schopné vydržet v provozu bez zásahu obsluhy alespoň pět let.

Li-Ion

V současnosti se výrobci do své elektroniky naučili používat akumulátory typu Li-Ion. Důvodem je vysoká energetická hustota vzhledem k objemu. Velká výhoda těchto baterií je velmi nízká hodnota samovybíjení, která se pohybuje do 5 % za měsíc. Dále baterie netrpí paměťovým efektem a mají poměrně dlouhou životnost v podobě 1200 nabíjecích cyklů. Napětí článku je v nabitém stavu 3,7 V a hodí se tedy ideálně ve spojení s mikroprocesory a drobnou senzorkou. [8]

Bohužel i tyto baterie trpí negativními vlastnostmi, které lze do určité míry ovlivnit. Baterie stárne, a to i přes to, že nemusí být využívána. Nemají rády vysoké teploty, velké vybíjecí proudy nebo přechovávání v plně nabitém stavu. Při poklesu napětí pod přibližně 2,8 V je velmi těžké baterii znovu oživit. [8]

Obr. 6 Charakteristika vybíjení Li-Ion [8]



Na Obr. 6 vidíme vybíjecí křivku článku dvou typů Li-Ion akumulátoru. Články se liší konstrukcí záporné elektrody. Je použita uhlíková elektroda, jednou jako coke a v druhém případě grafit. Jak je vidět, články mají odlišnou charakteristiku převážně od stavu vybití pod 40 %. Dále se liší napájecím napětím, při kterém dochází k ukončení nabíjení. [8]

Li-Pol

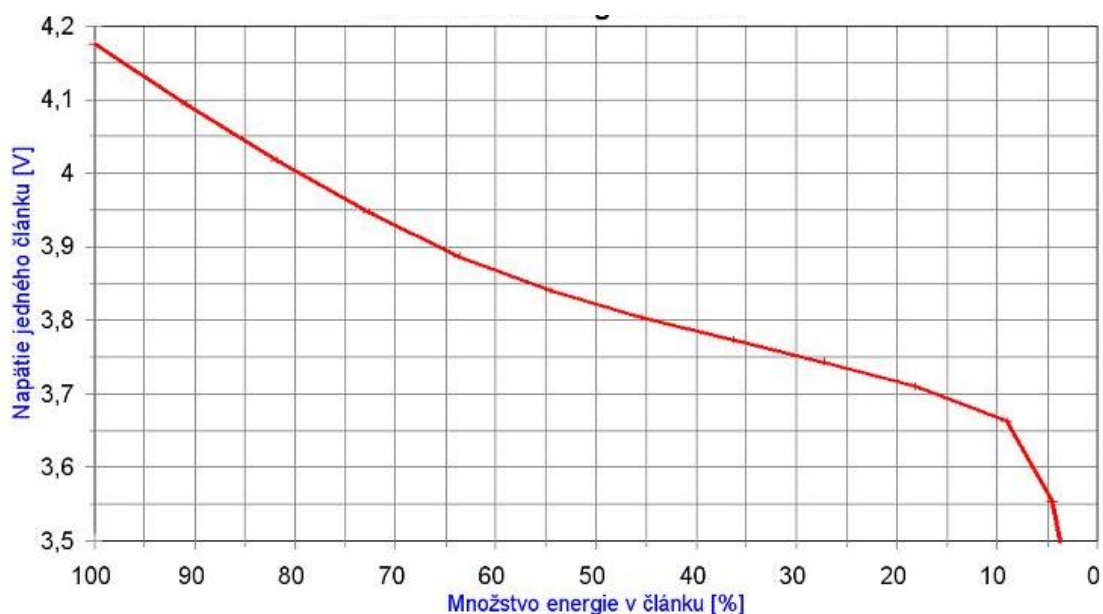
Akumulátory Li-Pol navazují na Li-Ion technologii, kterou vylepšují po stránce vlastností. Mají nízkou hmotnost, vysokou kapacitu, minimální samovybití a netrpí paměťovým efektem. V dnešní době se používají ve většině spotřební elektroniky, jako například v mobilních telefonech nebo v modelářství.

Plně nabitý článek má 4,2 V. Toto napětí se nesmí při nabíjení překročit, protože by mohlo dojít k nevratnému poškození akumulátoru. Kritické napětí je také 2,7 V, pod toto napětí se článek nesmí dostat. Je tedy nutno hlídat, aby se napětí pohybovalo v rozmezí 2,8 až 4,2 V. Baterie jsou podle konstrukce schopny dodávat proud 0,5–1 C (C= kapacita článku). Při použití v modelářství a použití jiné konstrukce článku jsou akumulátory schopny dodat vybíjecí trvalý proud 20–50 C. Počet nabíjecích a vybíjecích cyklů se pohybuje kolem 2000.

Problematickou vlastností akumulátoru je postupně snižující se kapacita i při nepoužívání daného akumulátoru, možnost vznícení u starých typů akumulátorů, dnes již zabudovaná pojistka nedovoluje vznícení například při zkratu. Akumulátor se po čase nafukuje. Je to zapříčiněno jeho chemickými vlastnostmi a postupně se uvnitř článku zvyšuje tlak.

V případě potřeby vytvoření akumulátoru s větší jmenovitou hodnotou se články dají zapojovat do série. Je však nutno připojit balancovací obvod, který se při nabíjení snaží regulovat napětí na jednotlivých člancích tak, aby bylo na všech stejné. Při nabíjení se články nabíjejí až k hraniční hodnotě 4,2 V na článek. V případě nevyrovnávání napětí na jednotlivých člancích by mohlo dojít k přebití jednoho článku a tím jeho poškození.

Obr. 7 Závislost napětí na množství energie v článku Li-Pol [9]



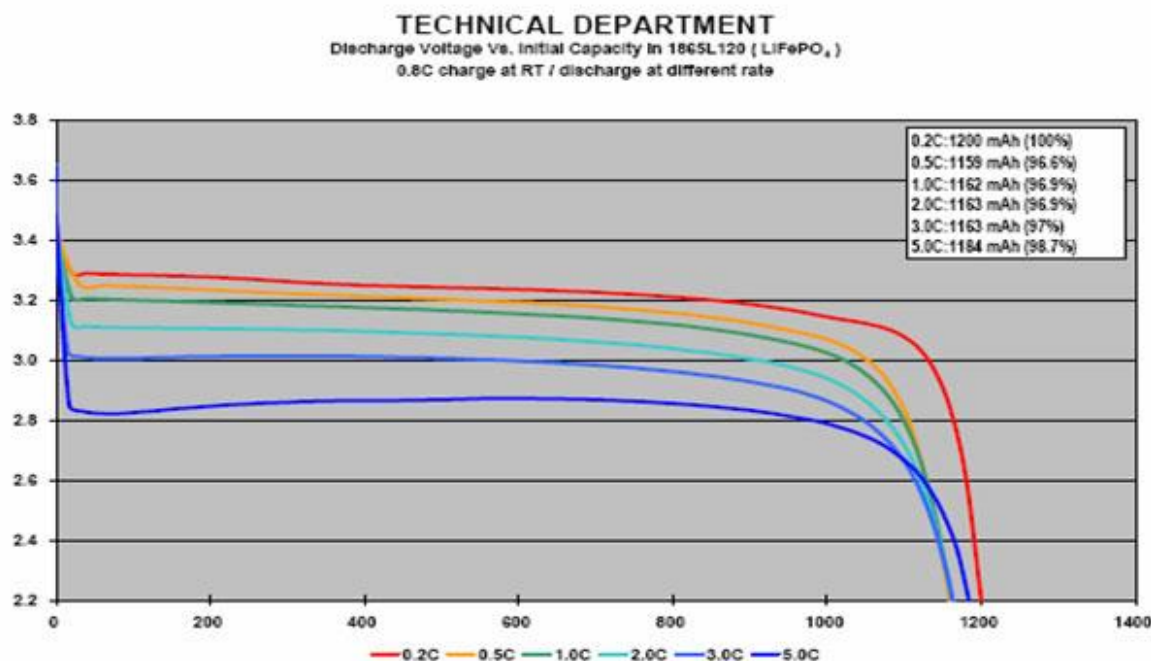
Výběr akumulátoru Li-Pol se hodí především u aplikací, kde je potřeba dodat větší množství energie v krátkém čase. Výhodou také může být, že se akumulátor může vyrobit v rozměrech dle požadavků zákazníka, což značně přispívá k efektivnímu využití prostoru v krabici. Musíme však pamatovat na skutečnost, že u baterie dochází k nafukování článku. Nevýhodou může být, že akumulátor vyrobený na zakázku je chráněn jen tenkou ochrannou vrstvou a špatná manipulace s akumulátorem může zapříčinit požár. I z tohoto důvodu je problematická přeprava samotných akumulátorů například leteckou přepravou a akumulátory se od výrobce dováží pozemní dopravou.

LiFePo4

Stejně jako akumulátory Li-Pol, tak i akumulátory LiFePo4 navazují na Li-Ion akumulátory. Počátek sahá do roku 1996, kde na texaské univerzitě byl objeven právě LiFePo4 jako katodový materiál. Akumulátory vzbudily zájem díky svým parametrům, jako jsou netoxičita, vysoká energetická hustota, tepelná stabilita, ale problém těchto akumulátorů je v podobě vysokého vnitřního odporu, který akumulátorům znemožňoval v použití v aplikacích s potřebou dodání většího množství energie. V posledních letech probíhá vylepšování těchto akumulátorů a dnes akumulátory mají své obrovské použití v elektromobilech, kde slouží jako zdroj elektrické energie. Dále akumulátory našly uplatnění v solární energetice, kde přes den je elektrická energie vyrobena ze solárních panelů ukládána a přes noc se z akumulátorů energie čerpá. [10]

Postupně dochází k částečnému nahrazování klasických olovených akumulátorů právě za typ LiFePo4. Aby tento krok byl možný, tak se uvnitř celého akupacku nachází i elektronika, která se stará o správné zacházení s akumulátorem při nabíjení a vybíjení článků.

Obr. 8 Vybíjecí charakteristika LiFePo4 [11]



Na Obr. 8 je znázorněna vybíjecí křivka akumulátoru o kapacitě 1200 mAh. Akumulátor je několikrát vybíjen pod různým proudem a je patrné, že při vybíjení malým proudem má akumulátor téměř ideální charakteristiku vybíjení po celé své možné kapacitě akumulátoru

a k poklesu napětí dochází až těsně před vybitím akumulátoru. Díky tomuto jevu se akumulátor výborně hodí do elektroniky s malou spotřebou, kde jsme schopni provoz na baterii provozovat po daleko delší dobu než při použití jiných článků se stejnou kapacitou.

4.2.2 Napájení

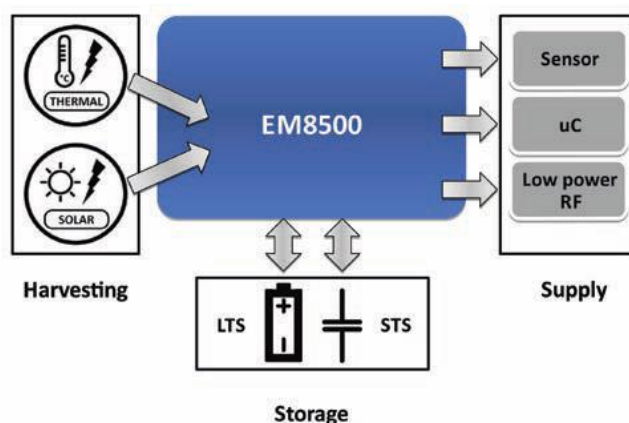
Při návrhu ostrovního systému je pro nás velmi důležité se snažit navrhnout celé řešení s co nejmenší spotřebou. Jednou z nejkritičtějších částí celého návrhu je právě napájecí část zařízení. V dnešní době je mnoho společností, která si tuto problematiku uvědomují a vyrábí obvody přímo určené pro management a správu napájení. Nejsou to však obvody, které se jen starají o správné průběhy dobíjení a vybíjení baterie. Dnešní obvody umí pracovat s alternativními zdroji energie, jako je solární elektřina či termální zdroje elektřiny. Tato skutečnost velmi usnadňuje celý návrh systému a minimalizuje, jak potřebný mechanický rozměr na montáž, tak spotřebu celého zařízení.

Jedním z obvodů od firmy EM Microelectronic je obvod EM8500 případně obvod EM8502. Tyto integrované obvody nabízí kompletní správu a kontrolu napájení z alternativních zdrojů energie. Obvody umožňují využívat nejen klasické primární bateriové články, ale i akumulátory či takzvané superkapacitory. Obzvláště použití superkapacitorů namísto akumulátorů je velmi zajímavé, neboť mají parametry klasického kondenzátoru, ale náboj, který se vejde do superkapacitoru je obrovský a mají dlouhou životnost, která je u klasického akumulátoru dána počtem nabíjecích a vybíjecích cyklů, který se pohybuje v řádů tisíců díky chemickým změnám na elektrodě akumulátoru. [12]

Další důležitou funkcí obvodu je možnost získávání alternativní energie, skladováním této energie do akumulátorů a následné poskytnutí energie danému zařízení. Jelikož ale množství energie vyrobené miniaturními solárními panely je velmi malé, je důležité, aby jak napájecí obvod, tak samotná elektronika zařízení pracovala s energií co nejúsporněji. Jsou to vysoké nároky na veškeré komponenty ať hardwarové, tak softwarové, neboť právě software v mikroprocesoru má extrémní vliv na spotřebu celého zařízení. [12]

EM8500

Obr. 9 Ukázka použití obvodu EM8500 [12]



„Obvod EM8500 zajišťuje integrované řešení řízení a kontroly napájení pro aplikace s velmi nízkou spotřebou. Je schopen současně spolupracovat s širokým spektrem primárních zdrojů energie i sekundárních zdrojů energie, jako jsou například různé typy nabíjecích akumulátorů, speciálních i standardních kondenzátorů, a optimálně spolupracovat s různými typy alternativních vstupních zdrojů, především fotovoltaických panelů – solárních zdrojů napětí a termoelektrických generátorů (TEG). Velký důraz je rovněž kladen na velmi rychlou dobu náběhu celého systému (start-up) v okamžiku, kdy je hlavní zdroj energie (Long Term Storage – LTS) zcela vybitý nebo nedostatečně napájen, a to s pomocí dalšího zdroje energie, který je schopen tyto krátkodobé požadavky na napájení systému pokrýt (Short Term Storage – STS).“ [12]

„Pokud je v napájecím systému používán nenabíjecí článek – primární baterie, pak integrovaná jednotka řízení napájení dokáže s pomocí připojeného alternativního zdroje napětí prodloužit dobu života primární baterie.“ [12]

„V obvodu EM8500 je integrován speciální konvertor, který umožňuje „nastartovat“ jeho základní funkce již při vstupním napětí zdroje od 300 mV a poté pracovat i se vstupním napětím alternativního zdroje energie od 100 mV.“ [12]

„Obvod EM8500 disponuje celkem čtyřmi nezávislými napěťovými výstupy a samozřejmě také „sleep módem“, což umožňuje maximálně efektivní řízení toku energie do jednotlivých částí napájeného zařízení a inteligentní vypínání jeho nepoužívaných bloků.“ [12]

„Nabízí také přímé připojení k externímu zdroji energie pomocí USB pro zajištění co nejrychlejšího nabití hlavního, dlouhodobého zdroje energie (LTS).“ [12]

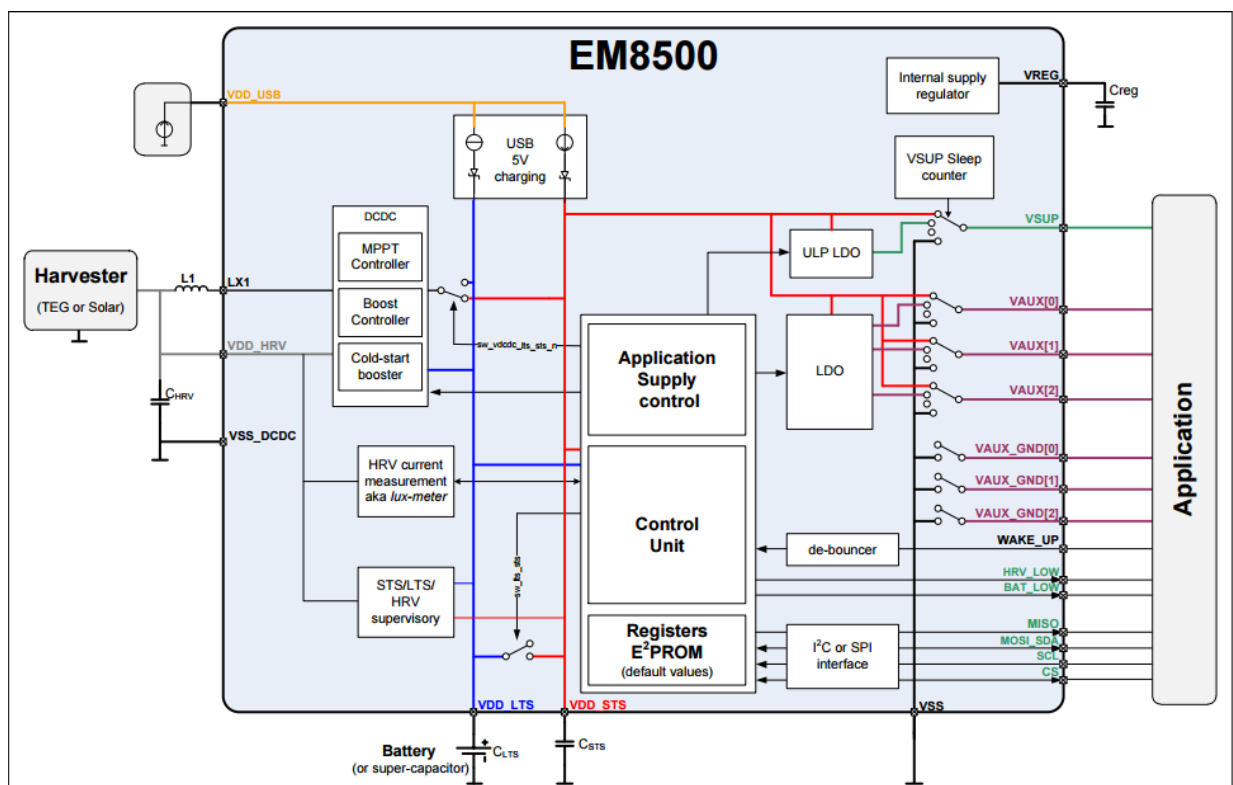
„Vestavěná kontrolní jednotka zajišťuje kontrolu minimálního a maximálního napájecího napětí, aby nedošlo k poškození hlavního zdroje energie (LTS). Výstupní napětí jsou samozřejmě regulována na úroveň vhodnou pro připojená elektronická zařízení.“ [12]

Pracovní režimy

Obvod umožňuje pracovat ve třech různých režimech. Jsou to:

1. Standardní režim (STS a LTS připojeno)
2. LTS ochranný režim (STS a LTS odpojeno)
3. Režim spánku (Sleep mode)

Obr. 10 Blokové schéma obvodu [13]



Jak je patrné z Obr. 10, obvod má několik výstupů, u kterých je možné měnit výstupní napětí tak, jak je požadováno připojenou elektronikou. Výhodou je také možnost úplného vypnutí a tím šetřit energii, jelikož i zařízení ve sleep režimu spotřebovává energii. Aby bylo možné konfigurovat potřebné chování obvodu, je obvod vybaven komunikační sběrnici SPI a I2C. V našem případě se používá sběrnice I2C. Důvodem je úspora vodičů a také skutečnost,

že pro nás není důležitá vysoká přenosová rychlost, která se u I2C pohybuje v rychlostech 100 kHz až 1 MHz dle možností připojených obvodů.

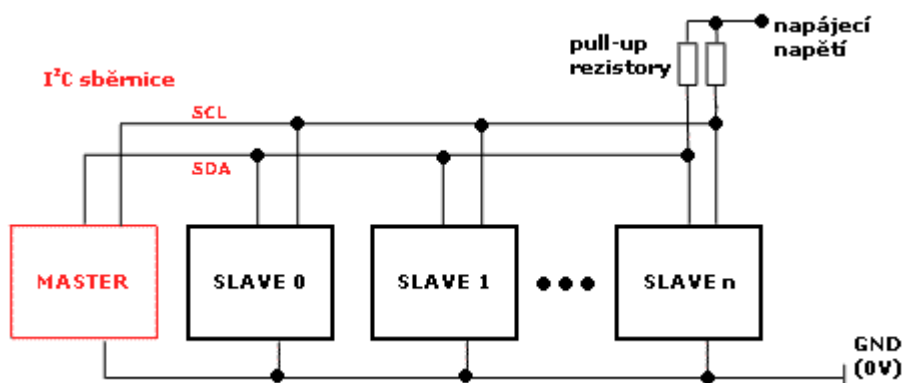
4.2.3 Sběrnice

Sběrnice jsou signálové vodiče, které slouží k přenosu dat mezi jednotlivými obvody. Sběrnice mohou být sériové, paralelní nebo kombinace sériové–paralelní (PCI). Na sběrnici se připojuje dva a více elektronických prvků. Sběrnice se dělí také podle maximální vzdálenosti, na kterou lze použít. Například sběrnice SPI, I2C jsou v rámci komunikace několika centimetrů až desítek centimetrů a používá napěťové úrovně vůči zemnímu vodiči. Oproti tomu je sběrnice RS485, která slouží pro přenos až na vzdálenosti několika set metrů. Využívá se zde diferenciálních párů, díky kterým je sběrnice spolehlivá i na dlouhé vzdálenosti.

I2C

I2C sběrnice komunikuje po 2 vodičích a slouží ke komunikaci v rámci jednoho zařízení či plošného spoje mezi jednotlivými obvody. Vývoj sběrnice probíhal firmou Phillips přibližně v roce 1980 a od té doby proběhlo mnoho změn. V dnešní době tuto sběrnici podporuje mnoho obvodů od procesorů až po jednotlivé periferní obvody. Přenos po 2 vodičích je obousměrný. Vodiče jsou označeny datové SDA (serial data) a taktovací SCL (serial clock). Výhodou této sběrnice je právě potřebný počet vodičů. Na sběrnici se připojují zařízení paralelně a musí být dodržována určitá komunikační pravidla. Zařízení jsou rozdělena do skupin master a slave, přičemž master zahajuje komunikaci se slave zařízením, a to mu následně odpovídá na jednotlivé příkazy. Obvykle je jedno zařízení master a několik obvodů slave. Může se však vyskytnout i model, kde je více zařízení master a několik zařízení slave. V tomto režimu musí být použita kolizní detekce na sběrnici, protože nesmí dojít ke stavu, kdy by komunikovali 2 mastery ve stejnou chvíli. Obvody mají většinou detekční obvod vestavěný ve vlastní komunikační periférii, a tak není zapotřebí další hardware. [14]

Obr. 11 Ukázka sběrnice i2c [14]

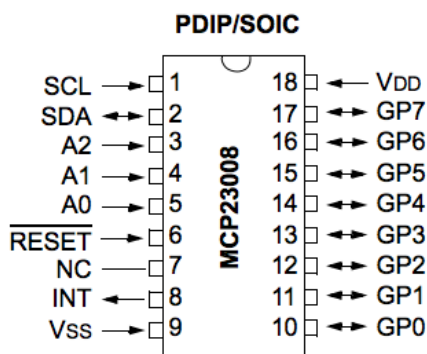


Adresování na I2C

Aby se od sebe jednotlivá zařízení odlišila, je potřeba je adresovat. Adresování funguje tak, že slave zařízení již z výroby mají stanovenou adresu a pokud je potřeba použít více stejných obvodů, tak jsou k dispozici hardwarové piny, které adresu obvykle až o 8 adres umožňují posunout výš. Ukážeme si na příkladu:

Obvod od společnosti Microchip MCP23008 je port expander, který slouží k rozšíření počtu i/o pinů.

Obr. 12 Port expander mcp23008 [15]



Obvod disponuje komunikačním rozhraním i2c a při pohledu na Obr. 12 komunikační piny SCL, SDA. Dále piny A0, A1, A2. Právě tyto piny slouží k posouvání adresy. Posouvání adresy je znázorněno v následující Tab. 1. Adresy jsou adresovány pomocí sedmi bitů. Osmý bit slouží k indikaci zápisu nebo čtení do obvodu. V rozšířené verzi adresace může adresa mít až desetibitovou délku. To umožňuje připojení až 1024 obvodů na jednu sběrnici. Ve skutečnosti jsou však tato čísla nereálná a velký adresní prostor slouží k dostatečnému

rozmístění konkrétních adres obvodu v celém spektru pro výrobce tak, aby nedocházelo ke kolizím adres.

Tab. 1 Posun adres na I2C

Vstupy			Nastavená adresa i2c zařízení
A1	A2	A3	
L	L	L	32 dekadicky nebo 0x20 hexadeximálně
L	L	H	33 dekadicky nebo 0x21 hexadeximálně
L	H	L	34 dekadicky nebo 0x22 hexadeximálně
L	H	H	35 dekadicky nebo 0x23 hexadeximálně
H	L	L	36 dekadicky nebo 0x24 hexadeximálně
H	L	H	37 dekadicky nebo 0x25 hexadeximálně
H	H	L	38 dekadicky nebo 0x26 hexadeximálně
H	H	H	39 dekadicky nebo 0x27 hexadeximálně

Fyzická vrstva

Jak je vidět na Obr. 11, samotná sběrnice potřebuje pro svůj provoz dva takzvané pull up rezistory. Tyto rezistory mají hodnotu přibližně 10 kΩ, nicméně jejich hodnota je závislá na frekvenci provozované na sběrnici a kapacitě vodičů sběrnice. Samotný pin obvodu je zapojen jako otevřený kolektor a z toho plyne, že logická úroveň high je vytvářena pull up rezistorem, kdežto logická úroveň low je vytvářena tranzistorem v obvodu. Díky tomuto způsobu zapojení je jednoduché mít více zařízení na sběrnici, aniž by docházelo k složitému přepínání směru komunikace.

Princip přenosu

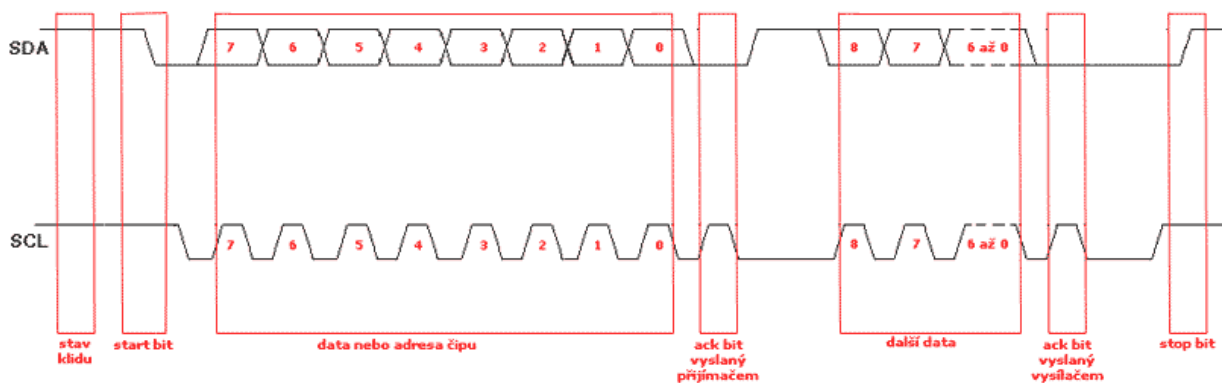
Nejběžnější variantou je zapojení master a více slave. Při samotné komunikaci je nezbytné, aby master generoval hodinový signál, podle kterého se řídí jednotlivé slave obvody.

Na sběrnici se může odehrávat několik základních stavů, které jsou znázorněny na:

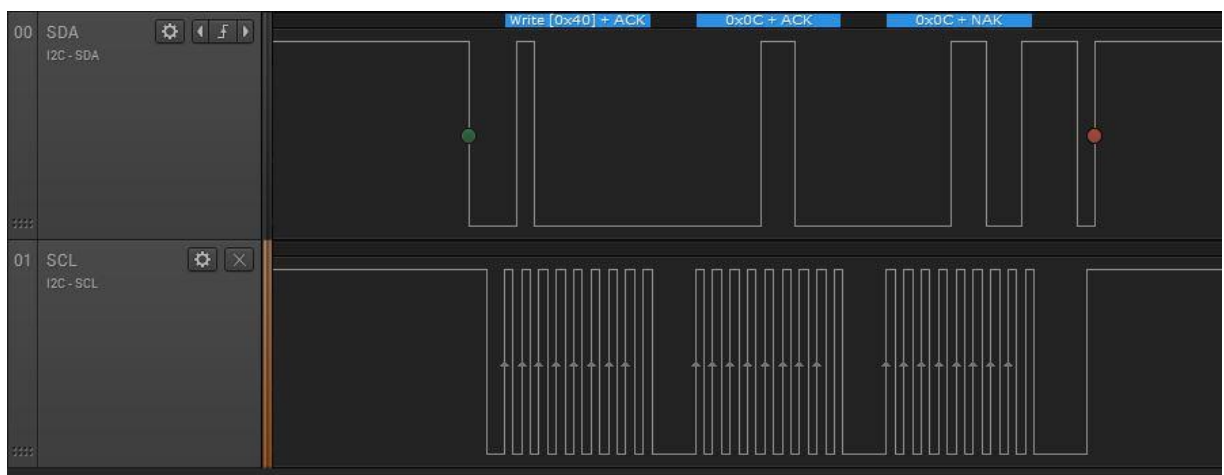
- Klidový stav – v tomto stavu jsou logické jedničky na obou dvou vodičích. Master negeneruje hodinový signál.

- Start bit – zahajuje přenos případně pokračování komunikace. Na sběrnici je interpretován stavem SDA z logické 1 do 0 SCK je v logické 0
- Stop bit – ukončuje přenos dat. SDA z logické 0 na 1, SCL je v logická 1.
- Přenos dat – data jsou přenášena v podobě jednoho bytu, kde jako první se přenáší nejvyšší bit po nejnižší bit. Logická úroveň dat se může měnit, pouze když je SCL ve stavu 0, jelikož při přechodu SCL z 0 do 1 se čtou na SDA data. Jeden hodinový takt SCL je přenos jednoho bitu na SDA.
- Potvrzení ACK – slouží k potvrzení přijetí dat. Tento bit vždy generuje strana, která přijímá data. Pokud je přenos správný, obvod generuje stav 0 na SDA a zároveň tento stav znamená, že obvod je připraven na příjem dalšího byte. Při chybě přenosu obvod nic neposílá, jelikož je sběrnice držena pull up rezistorem v úrovni logická 1. Tento stav zároveň může znamenat, že zařízení s danou adresou se nenachází na sběrnici. Toho se může využít při hledání, která zařízení jsou na sběrnici připojena.

Obr. 13 Možné stavy na sběrnici [14]



Obr. 14 Ukázka naměřených hodnot logickým analyzérém [vlastní]



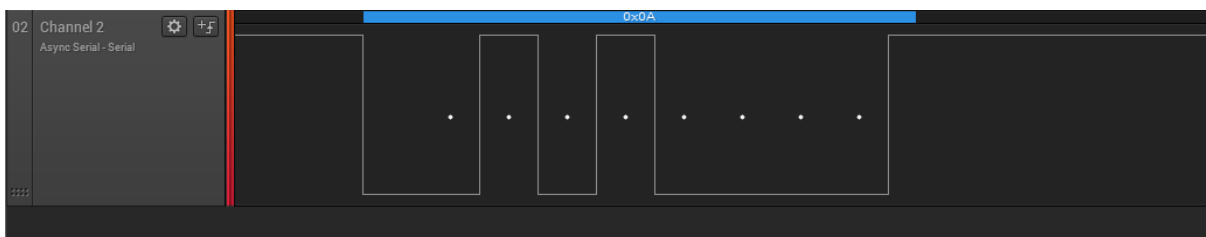
Na ukázce v Obr. 14 vidíme naměřené hodnoty pomocí logického analyzáru Saleae, který byl při pokusech se sběrnici i2c využit. Tento nástroj umí dekódovat naměřené údaje a prezentovat je ve formě dat. Počátek komunikace je zahájen start bitem (označeno zeleně), následuje adresace zařízení (0x40) a potvrzení ACK. Dále přenos dat a potvrzení ACK a na konci stop bit, který ukončuje komunikaci (označeno červeně).

Sériová linka (UART)

Je sběrnice určena pro sériový provoz. Umožňuje synchronní či asynchronní komunikaci. Komunikace probíhá po dvou vodičích označovaných v případě asynchronní komunikace jako TX a RX. Na pinu TX obvod vysílá sériovou komunikaci a na pinu RX data přijímá.

Sériová linka je v klidovém stavu v logické 1 a komunikace se zahájí změnou hodnoty do logické 0 po délku start bitu. Následují přenášená data (1 byte) řazena od nejméně významného bitu po nejvýznamnější. Dále může následovat parita a na konci přenosu je stop bit.

Obr. 15 Přenos na sběrnici UART [vlastní]

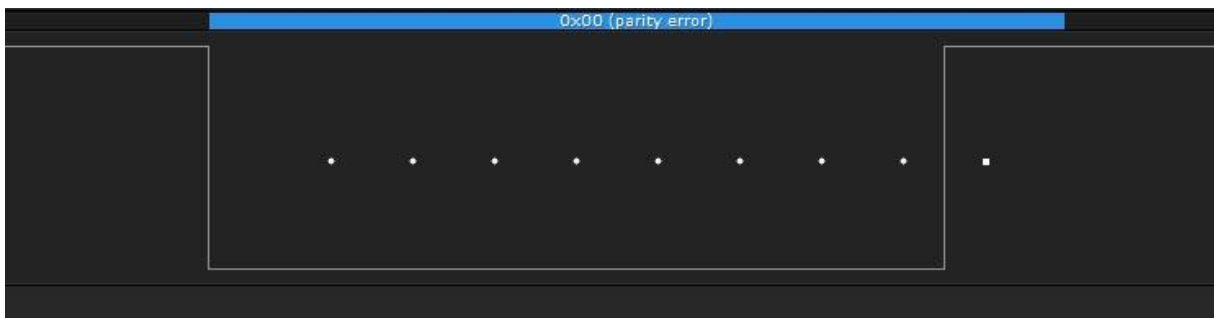


Na obrázku Obr. 15 vidíme přenos ze sběrnice. Na počátku je sběrnice v klidu a následuje start bit. Dále přenášené slovo, kde jednotlivé bity jsou znázorněny tečkami. Poslední částí je stop bit, který ukončuje komunikaci.

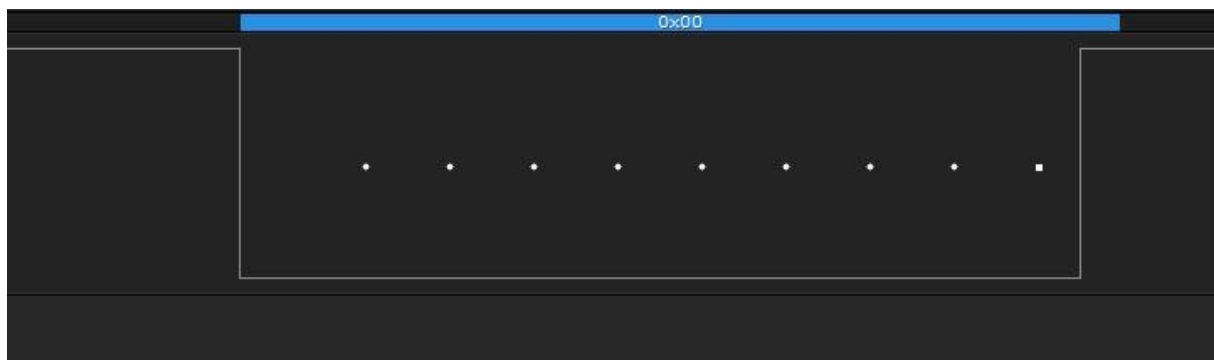
Parita

Je redundantní bit, který se vkládá za posílané slovo jako devátý bit komunikace. Slouží k ověření správnosti přenosu. Rozlišuje se na lichou a sudou paritu.

Obr. 16 Ukázka chybně vyhodnocené liché parity [vlastní]



Obr. 17 Ukázka vyhodnocení liché parity [vlastní]



Časová základna pro přenos

V případě asynchronní komunikace si časovou základnu generují samotné obvody. Je tedy důležité, aby obvody byly dobře nakonfigurovány a měly definováno, jakou rychlostí se bude komunikovat. V případě nedodržení komunikační rychlosti na straně vysílače a přijímače dojde ke špatnému přečtení posílané zprávy a nastane pravděpodobně chyba přenášeného rámce. Neboli obvod si kontroluje, jestli očekávaný stop bit je na správném místě a pokud není, k čemuž dojde v momentě, kdy jsou nastaveny špatně rychlosti, nastane chyba v komunikaci. Pak už záleží na samotném obvodu a softwaru, jak se k tomuto stavu postaví.

Existuje takzvaná autodetekce, která je schopna si přenosovou rychlost na straně přijímací části nastavit automaticky a obvykle reaguje na ASCII znak U. Nicméně nejjednodušší je rychlost nastavit ručně a správně od samotného začátku.

5 Praktická část práce

Samotný návrh nejdříve začal výběrem vhodného autonomního zařízení. Byla zvolena meteostanice a měření základních veličin jako jsou teplota, vlhkost, tlak vzduchu, směr větru a rychlost větru. Z konstrukčních důvodů byla zakoupena již hotová meteostanice, která byla rozebrána a využily se pouze mechanické části meteostanice.

Samotná meteostanice má jednoduše řešené snímání rychlosti větru, kde na hřídeli anemometru je umístěn plastový kroužek, který vytváří mechanickou zábranu mezi IR diodou a IR fototranzistorem. V prstenci kroužku je umístěna obdélníková díra, která v určité poloze umožňuje průchod světla z IR LED diody na fototranzistor. Celkově je možno rozeznat 8 stavů natočení. Provedení je vidět na Obr. 18.

Obr. 18 Snímač směru větru [vlastní]



5.1 Použité senzory

Při hledání nejvhodnějších senzorů bylo především potřeba zajistit co nejmenší spotřebu elektrické energie. Další prioritou při výběru senzoru je použití již kalibrovaného senzoru, který by nám poskytoval data bez toho, aniž bychom museli zjišťovat pravdivost naměřených údajů a porovnávat je s certifikovaným měřidlem. V případě měření veličin teplota, tlak a vlhkost byl jako nejvhodnější snímač zvolen BME280, který tyto parametry splňuje.

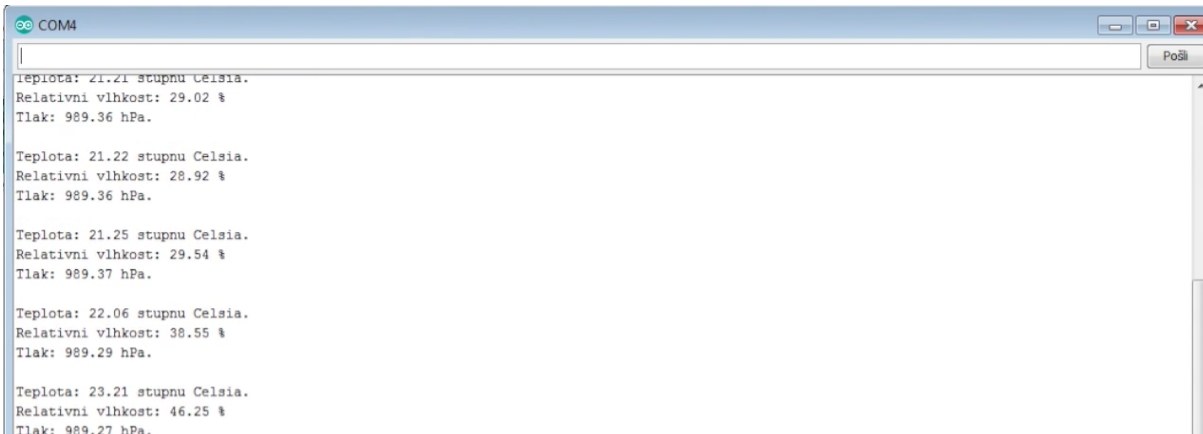
5.1.1 BME280

Je integrovaný senzor z portfolia společnosti Bosch navržený pro měření relativní vlhkosti, teploty a tlaku. Senzor je navržen pro aplikace s velmi nízkou spotřebou a miniaturními rozměry provedení montážního pouzdra. Jedná se o provedení, kde naměřená data jsou předávána prostřednictvím sběrnice SPI nebo I2C. V našem případě používáme variantu sběrnice I2C.

Spotřeba elektrické energie se při měření s obnovovací frekvencí 1 Hz pohybuje kolem 4 μA . Vzhledem k četnosti přenosů prostřednictvím bezdrátových sítí, která je jen několikrát za hodinu, není potřeba měřit s tokovou periodicitou a spotřeba je tedy ještě menší.

Pro testovací účely byl zakoupen obvod zapájený již na testovací desce s vytaženými piny pro napájení a komunikační sběrnice. Základní měření probíhalo s použitím Arduina a celkové zapojení bylo použito pouze pro ověření funkce a změření spotřeby, které nepřesáhlo v průměru hodnotu 4 μA při obnovovací frekvenci 1 Hz. Naměřené hodnoty senzorem BME280 jsou zobrazeny na Obr. 19.

Obr. 19 Naměřené údaje BME280 [vlastní]



```
COM4
Teplota: 21.21 stupnu Celsia.
Relativni vlhkost: 29.02 %
Tlak: 989.36 hPa.

Teplota: 21.22 stupnu Celsia.
Relativni vlhkost: 28.92 %
Tlak: 989.36 hPa.

Teplota: 21.25 stupnu Celsia.
Relativni vlhkost: 29.54 %
Tlak: 989.37 hPa.

Teplota: 22.06 stupnu Celsia.
Relativni vlhkost: 38.55 %
Tlak: 989.29 hPa.

Teplota: 23.21 stupnu Celsia.
Relativni vlhkost: 46.25 %
Tlak: 989.27 hPa.
```

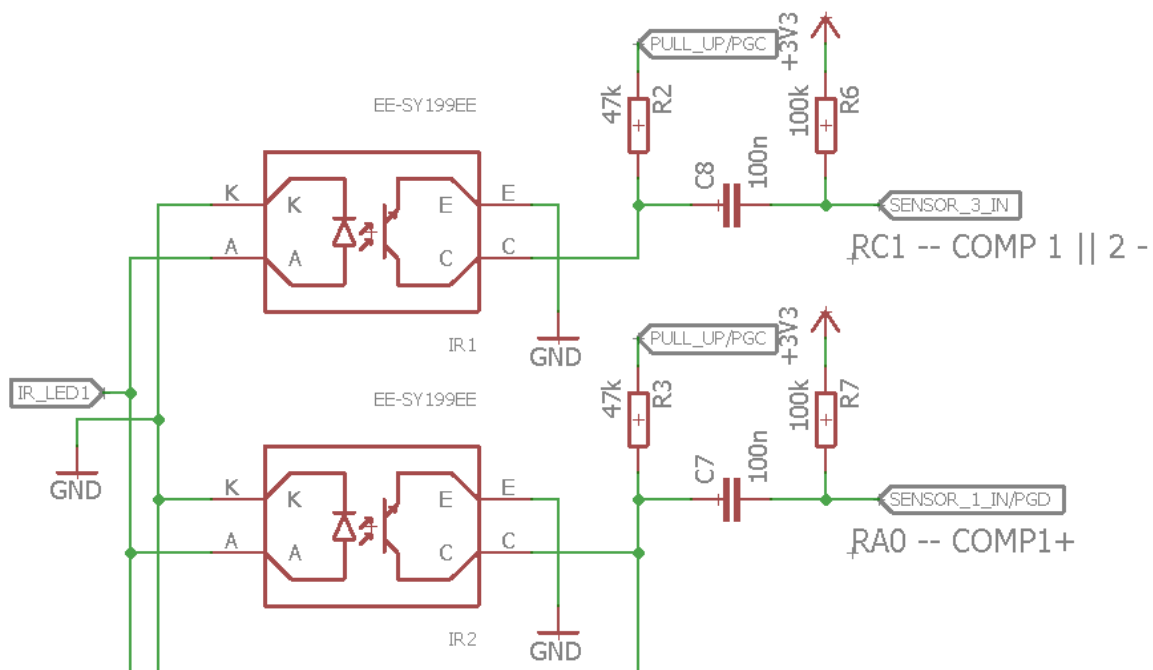
5.1.2 Indikace směru větru

Indikace směru větru je řešena pomocí stávajících možností meteostanice. Měření je provedeno optickou metodou pomocí 8 IR LED diod a 4 fototranzistorů a mechanické zábrany, která je upevněna na hřídeli „korouhvičky“. Výsledná přesnost je rozeznání 8 stavů natočení. Stávající mechanismus je z hlediska spotřeby nevhodný a do budoucna bude nahrazen jiným způsobem měření.

V rámci optického odečítání vznikl pokusný přípravek, na kterém je testována proudová spotřeba. Elektrické zapojení je na Obr. 20, kde je zobrazen výřez z celkového schéma. Kondenzátory C8 a C7 nejsou osazeny a místo nich se nachází nulový rezistor. Dále nejsou osazeny rezistory R6 a R7. Zapojení je tedy jako dělič napětí, které jsou připojeny na piny procesoru, kde je namapován komparátor.

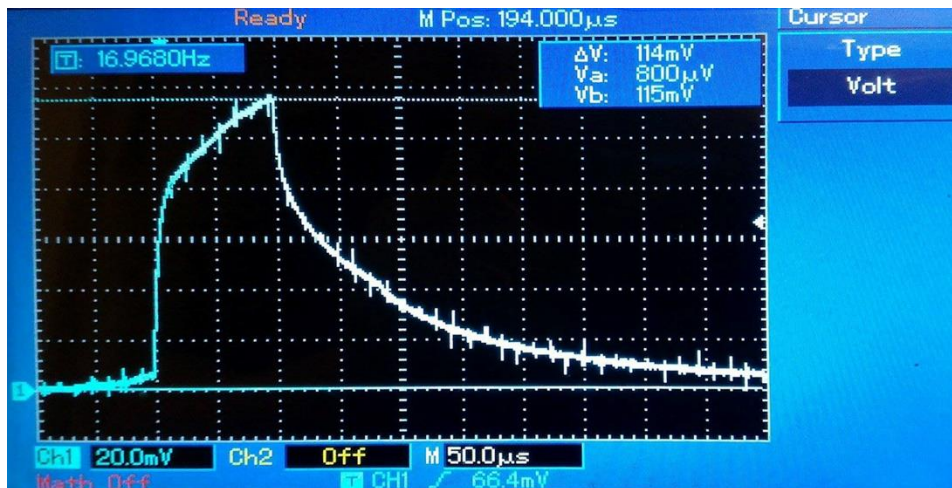
Při prvotním měření byla spotřeba 3,2 μA . Nebyl využíván režim spánku a komparátory byly neustále zapnuty a procesor taktován na frekvenci 32 MHz. V druhém měření byl použit režim spánku a spotřeba klesla na 370 μA , komparátory byly zapnuty po celou dobu. V třetím měření byl použit režim spánku, komparátory se zapínaly jen na nezbytně dlouhou dobu v čase měření dané veličiny a spotřeba klesla na průměrnou hodnotu 26 μA při měření s frekvencí 8 Hz a celkem 4 IR LED diody.

Obr. 20 Schéma zapojení IR senzoru [vlastní]



Pro měření spotřeby byl použit osciloskop s proudovým bočníkem o hodnotě 10 Ω . Výsledek měření je na Obr. 21, kde je zaznamenána proudová špička při krátkém záblesku IR LED diody. Po odečtení hodnot na osciloskopu vyšla maximální proudová špička na 11,5 mA.

Obr. 21 Měření spotřeby [vlastní]

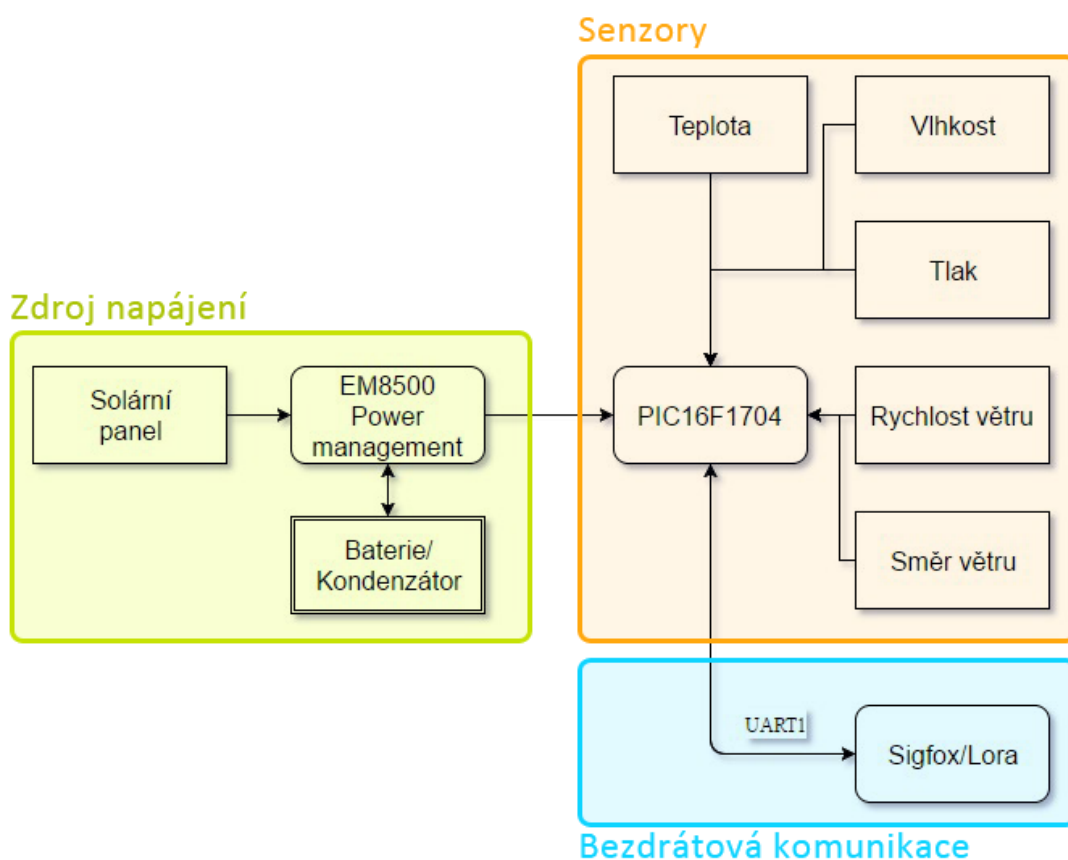


5.1.3 Rychlost větru

Rychlost větru je ve stávající meteostanici řešena pomocí mechanického lopatkového anemometru. Ačkoliv existují přesnější metody snímání rychlosti větru v podobě aktivních prvků, které pracují obvykle na principu akustickém. Na lopatkovém anemometru je umístěn magnet, který v určité pozici sepne kontakt jazýčkového relé umístěné v těle meteostanice. Výstupem je tedy jeden impulz na otočení anemometru o 360°. Po elektrické stránce je zapojení provedeno jako dělič napětí s jazýčkovým relé. Spotřebu nejvíce ovlivňuje právě rezistor, kterým v momentě sepnutí jazýčkového relé protéká proud o velikosti napájecího napětí vydělené hodnotou rezistoru. V případě 100 k Ω rezistoru se jedná o proud 33 μA .

5.2 Blokové schéma zapojení

Obr. 22 Blokové schéma zapojení [vlastní]



Na Obr. 22 je znázorněno blokové schéma zapojení meteostanice. Hlavním bodem napájení je integrovaný obvod EM8500, který umožňuje připojení solárního panelu a tím prodloužit životnost celého zařízení. Při jednotlivých pokusných měření na prototypních senzorech se však ukázalo, že odhadovaná spotřeba celkového zařízení bude dostatečně nízká na to, aby zařízení i bez solárního panelu vydrželo na akumulátor spolehlivě fungovat několik let bez potřeby akumulátor dobít. Vzhledem k rozsahu práce a časovým důvodům již nedošlo k realizaci celkové meteostanice a možnosti ověření spotřeby celkového zařízení, a proto zde zůstala možnost připojení solárního panelu jako alternativní zdroj ostrovní meteostanice. [16]

Mikroprocesor, který byl použit je od společnosti Microchip z rodiny 16F s označením low power a nabízí opravdu širokou škálu nástrojů pro řízení napájení v rámci samotného obvodu.


Jednotlivé senzory jsou připojeny pomocí sběrnice i2c, popřípadě analogové snímače jsou napřímo připojeny k jednotlivým pinům mikroprocesoru.

5.2.1 Sigfox

Komunikační bezdrátový modul Sigfox nebo Lora jsou připojeny prostřednictvím sběrnice UART. Bohužel jednotlivé moduly nemají jednotný komunikační protokol, a tak je potřeba přizpůsobit software podle toho, zda se komunikuje skrze Sigfox či LoRu.

Komunikační modul Sigfox používá standardizované AT příkazy, které se běžně používají například z GSM modulu. Komunikace s modulem vypadá následovně:

Obr. 23 Komunikace s modulem Sigfox [17]



```
AT: OK
AT&I?: 0215          0215 = 21.5 °C
AT&V?: 3270          3270 = 3.27 V
AT&IF?: 2375)0868130000  Frekvence vysílače/přijímače
AT&DR?: 0869525000    Frekvence vysílače/přijímače
AT&I=0: AX-Sigfox 1.1.0-ETSI  Firmware modemu
AT&I=1: support@axsem.com   Kontakt na výrobce
AT&I=2: 8F                HW verze
AT&I=3: 51                HW verze
AT&I=4: 1                 HW verze
AT&I=5: 1                 HW verze
AT&I=6: ATCMD_NOT_SUPPORTED
AT&I=7: ETSI              Varianta firmwaru (ETSI = region Evropy)
AT&I=8: 0                 Verze firmwaru
AT&I=9: UDL1-1.8.7       Verze knihovny SIGFOX
AT&I=10: 0021            ID modemu
AT&I=11: 0305           PAC modemu
```

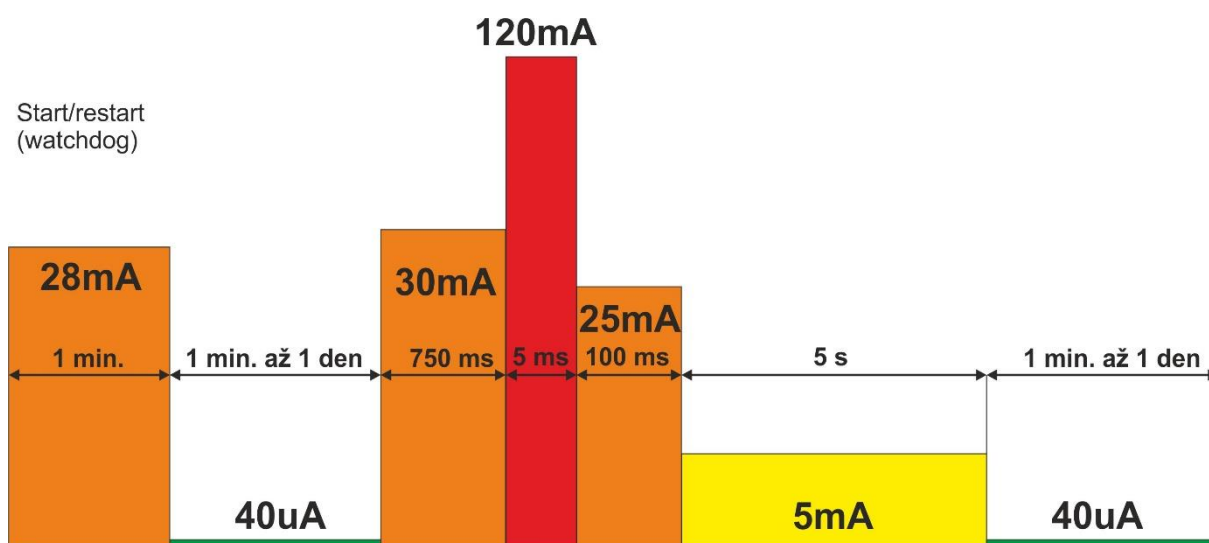
Na Obr. 23 je reakce modulu na příkaz „AT: OK“. Bezdrátový modul na tento příkaz reaguje výpisem veškerých informací, které umí o sobě poskytnout. Výhodou použití Sigfox je, že uživatel nemusí téměř nic konfigurovat a implementace je velmi jednoduchá.

5.2.2 LoRa

Bezdrátový modul LoRa nepodporuje AT příkazy. Namísto toho využívá vlastní komunikační protokol. Veškeré příkazy s modulem musí začínat příkazem MAC a parametr. Proudová spotřeba v průběhu vysílání je zobrazena na Obr. 24, kde je vidět proudové zatížení v průběhu odesílání jedné zprávy. Důležité je, aby akumulátor byl schopný dodat proudový impulz o velikosti 120 mA. Pokud by akumulátor měl vysoký vnitřní odpor, došlo by k poklesu

napětí a pravděpodobnému restartu celého zařízení a k odeslání dat by tak nedošlo. Nárazový proud se dá řešit blokovacími kondenzátory.

Obr. 24 LoRa proudová spotřeba [18]



5.3 Struktura přenášených dat

Struktura přenášených dat je zásadním způsobem omezena možnostmi LPWAN sítí. Především sítí Sigfox, kde jsme omezeni na přibližné množství 140 zpráv za den a v jednom paketu je možnost poslat 12 bytů dat. Vzhledem k situaci, kde jiné technologie jsou na tom lépe, budeme brát Sigfox jako největší omezení, a proto pro tuto síť bude paket vytvořen.

Naše meteostanice obsahuje několik základních senzorů:

Měřená veličina	Typ senzoru	Rozsah měřené veličiny
Teplotní senzor	BME280	-4085 °C
Vlhkostní senzor	BME280	0–100 % relativní
Barometrický senzor	BMW280	3001100 hPa
Rychlost větru	Jazyčkové relé	030 m×s ⁻¹
Směr větru	optické odečítání	8 poloh

Ostatní údaje, jako jsou rosný bod, se dopočítají na straně serveru, jelikož je náš možný počet dat v jednom paketu velmi omezený. Přenášíme tedy pouze základní naměřené údaje, které jsou zprůměrované. Odesílání vychází přibližně jednou za 15 min.

Při pohledu na rozsah jednotlivých veličin zjistíme, že se nám určitě nepovede jednotlivé veličiny vměstnat do jednoho bytu. Data se posílají složené většinou ze 2 byte, a protože se obvykle druhý byte nevyužije celý, použijí se nevyužitá bity k přenosu stavových informací o baterii, či jako vyšší bite dalších přenášených hodnot.

5.3.1 Teplota

Rozsah hodnot -40 – 85°C . Data odesíláme s přesností na jedno desetinné číslo. Z toho nám plyne, že celkem musíme odlišit 1250 hodnot. Je to příliš mnoho stavů, jelikož takto velký rozsah můžeme vyjádřit 11–ti bity. Pokud bychom ale udělali změnu a posílali s přesností jedné desetiny rozsah teplot -40 – 60°C , bude nám již stačit přenos pomocí 10–ti bitů. Výsledný přenos pro teplotu vypadá následovně (viz Obr. 25):

Obr. 25 Přenos teplota [vlastní]

15.	14.	13.	12.	11.	10.	9.	8.	7.	6.	5.	4.	3.	2.	1.	0.
X	X	X	X	X	X										

Teplota je uložena jako 10–ti bitové číslo (0-1023), kde hodnota 0 znamená -40°C a hodnota 1000 znamená $+60^{\circ}\text{C}$. Hodnoty jsou v násobku deseti z důvodu přidání desetinného čísla. Příklad:

627 dekadicky

Při použití Modulo (výsledek po dělení) 10 získáme desetinnou část čísla $\rightarrow 7$

Zbývá 62, odečtením 40 dostaneme skutečnou teplotu $\rightarrow 22$

Výsledkem tedy je teplota $22,7^{\circ}\text{C}$

5.3.2 Relativní vlhkost

Rozsah hodnot je 0–100 %. Data se opět odesílají s přesností jednoho desetinného čísla. Celkem tedy máme možnost 1000 různých stavů. Znamená to tedy přenášet informaci o 10–ti bitové délce. Výsledný přenos pro vlhkost vypadá následovně (viz Obr. 26):

Obr. 26 Přenos vlhkost [vlastní]

15.	14.	13.	12.	11.	10.	9.	8.	7.	6.	5.	4.	3.	2.	1.	0.
X	X	X	X	X	X										

Vlhkost je uložena jako 10–ti bitové číslo (0-1023), kde hodnota 0 znamená 0 % relativní vlhkost a hodnota 1000 znamená 100 % relativní vlhkost. Hodnoty jsou v násobku deseti z důvodu přidání desetinného čísla.

Příklad:

376 dekadicky

Při použití modulu 10 získáme desetinnou část čísla → 6

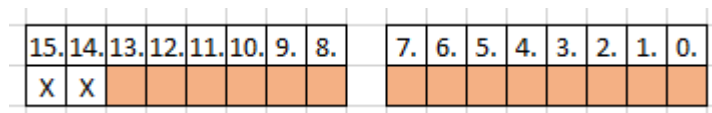
Zbývá 37, které reprezentuje hodnotu 37 % relativní vlhkosti.

Výsledkem je tedy vlhkost 37,6 % relativní vlhkosti.

5.3.3 Tlak

Rozsah hodnot je 300–1100 hPa, což znamená měření v nadmořské výšce +7000–500 m od hladiny moře. Tento rozsah se dá vyjádřit pomocí 14–ti bitů (8196) hodnot (viz Obr. 27).

Obr. 27 Přenos tlak [vlastní]



Tlak je uložen jako 14–ti bitové číslo, kde hodnota 0 znamená 300 hPa a hodnota 8000 znamená 1100 hPa. Hodnoty jsou opět v násobku deseti z důvodu přidání desetinného čísla.

Příklad:

7359 dekadicky

Při použití modulo 10 získáme desetinnou část čísla → 9

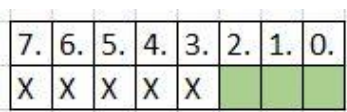
Zbývá 735 ke kterým přičteme 300. Dostaneme hodnotu 1035 hPa

Výsledkem je tedy tlak 1035,9 hPa

5.3.4 Směr větru

Směr větru je díky stávajícímu řešení optického odečítání nepřesný, jelikož umožňuje do 360° určit pouze 8 hodnot a ty se dají zapsat pomocí 3 bitů (viz Obr. 28).

Obr. 28 Přenos směr větru [vlastní]



Směr větru je pomocí 3 bitů určen následovně. Hodnota 0 znamená natočení o 0°. hodnota 7 znamená natočení o 315°. Jednotlivé kroky jsou po 45°

Příklad:

5 dekadicky

Vynásobíme hodnotu 5 a 45 a získáme výslednou hodnotu natočení o 225°

5.3.5 Rychlost větru

Rychlost větru je limitována aktuální konstrukcí a v návodu k meteostanici jsou uvedeny maximální hodnoty jako $30 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$. Při měření na jedno desetinné místo máme rozsah hodnot 300, který se dá vyjádřit pomocí 9 bitů (viz Obr. 29).

Obr. 29 Přenos rychlost větru [vlastn]

15.	14.	13.	12.	11.	10.	9.	8.	7.	6.	5.	4.	3.	2.	1.	0.
X	X	X	X	X	X	X	X								

Rychlost větru je vyjádřena následovně. Hodnota 0 znamená $0 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$ a hodnota maximální 500 znamená $50 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$.

Příklad:

127 dekadicky

Při použití modulu 10 získáme desetinnou část čísla $\rightarrow 7$

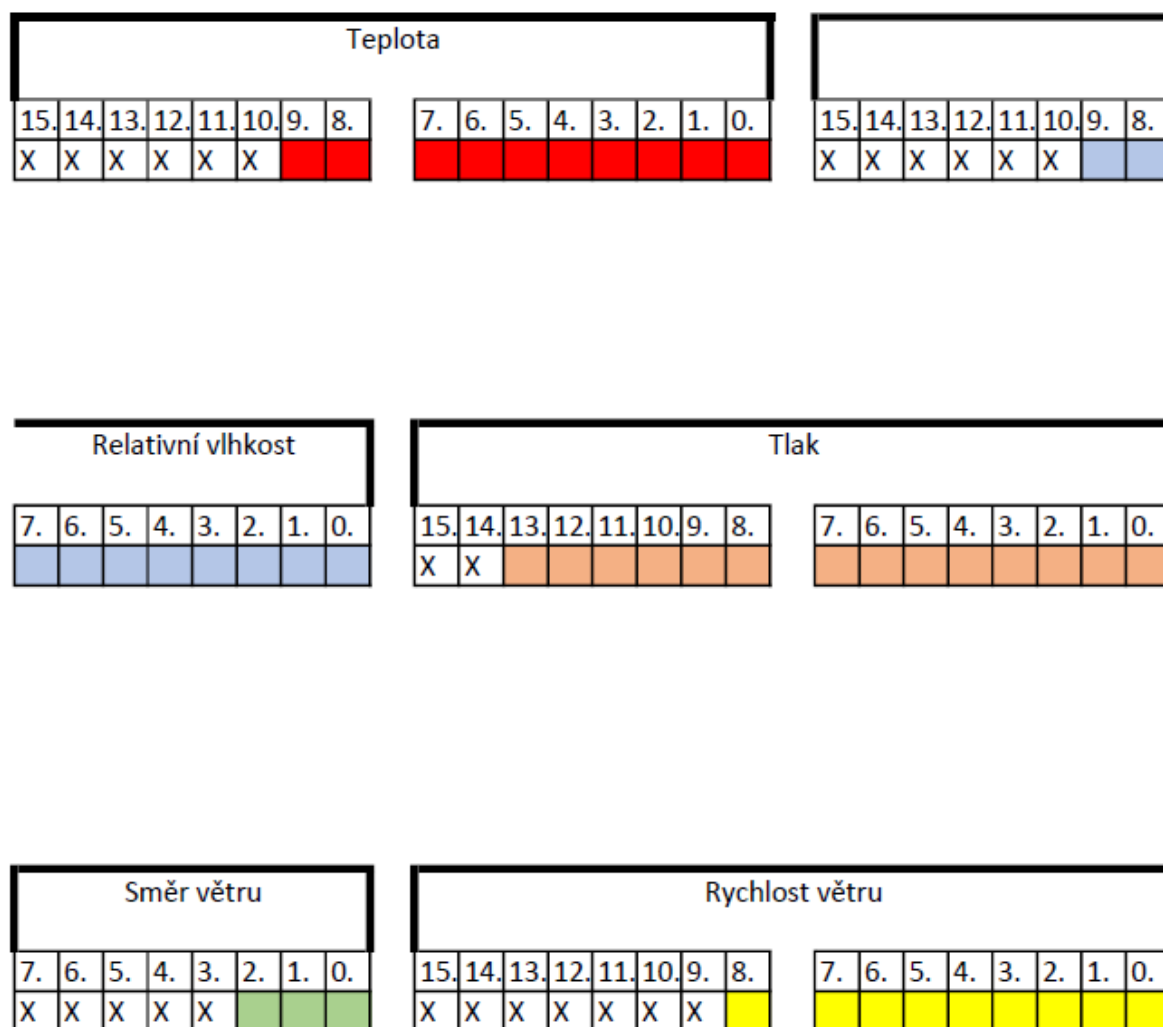
Zbývá hodnota 12, která prezentuje celé číslo.

Výsledkem je tedy rychlost větru $12,7 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$

5.4 Celková struktura přenášených dat

Celkový paket přenášených dat pro meteostanici je zobrazen na Obr. 30. Aktuálně jsou naměřené údaje přenášeny pomocí 9 bytů. Vzhledem k tomu, že množství posílaných informací je v tomto případě malý (pouze 4 měřené veličiny), není potřeba data redukovat a mít tak jednotlivé bity, které zůstaly volné a jsou označeny symbolem X, do jednoho byte z více veličin. V případě použití srážkoměru, měření hodnot CO₂ by již bylo potřeba data upravit tak, aby se výsledné veličiny daly poslat v jedné zprávě a vešly se tak do velikosti 12 bytů.

Obr. 30 Celkový přenos dat [vlastní]



5.5 Návrh plošného spoje

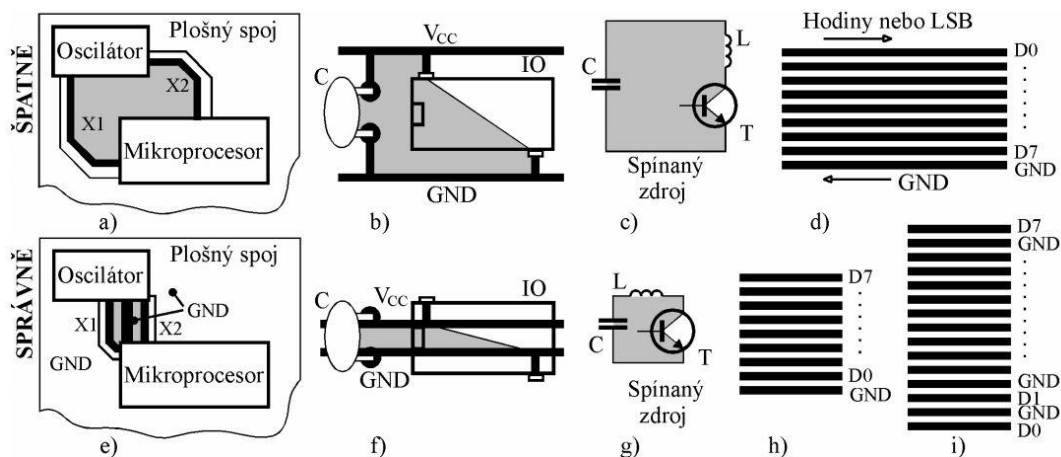
Samotný návrh plošného spoje z hlediska dodržování zásadních pravidel návrhu je na samostatnou bakalářskou práci, a proto uvedu jen nejzákladnější poznatky. Důležité je si

uvědomit, jak probíhá samostatný proces plošného spoje a jaké máme limity z hlediska výrobce. Zásadní parametr, které omezují možnosti návrháře jsou třídy přesnosti, které znamenají údaje o minimální šířce vodiče, minimální velikosti izolační mezery a mnoha dalších parametrech. Dále je důležité vědět, jaký se použije materiál plošného spoje, respektive materiál dielektrika. Obvykle se jedná o sklolaminát, ale objevují se i plošné spoje, kde nosnou částí je tvrzený papír. Takový plošný spoj je velice křehký.

V prvotní fázi se musí navrhnout schématické zapojení, a poté následuje kreslení samotného plošného spoje. Při návrhu zařízení s nízkou spotřebou si musíme velice dobře uvědomovat nejen konkrétní řešení problému s nízkou spotřebou, ale i možnost daný blok vypnout ve chvíli, kdy není potřebný k měření dané veličiny. Tímto přístupem se dá ušetřit velké množství elektrické energie, a to někdy až o několik řádů.

Z elektrického hlediska je velmi důležité si uvědomit, jakým směrem nám na plošném spojit teče proud a kde vznikají proudové smyčky. To je důležité především v napájecí části u blokovacích kondenzátorů.

Obr. 31 Některé chyby při návrhu plošného spoje [19]

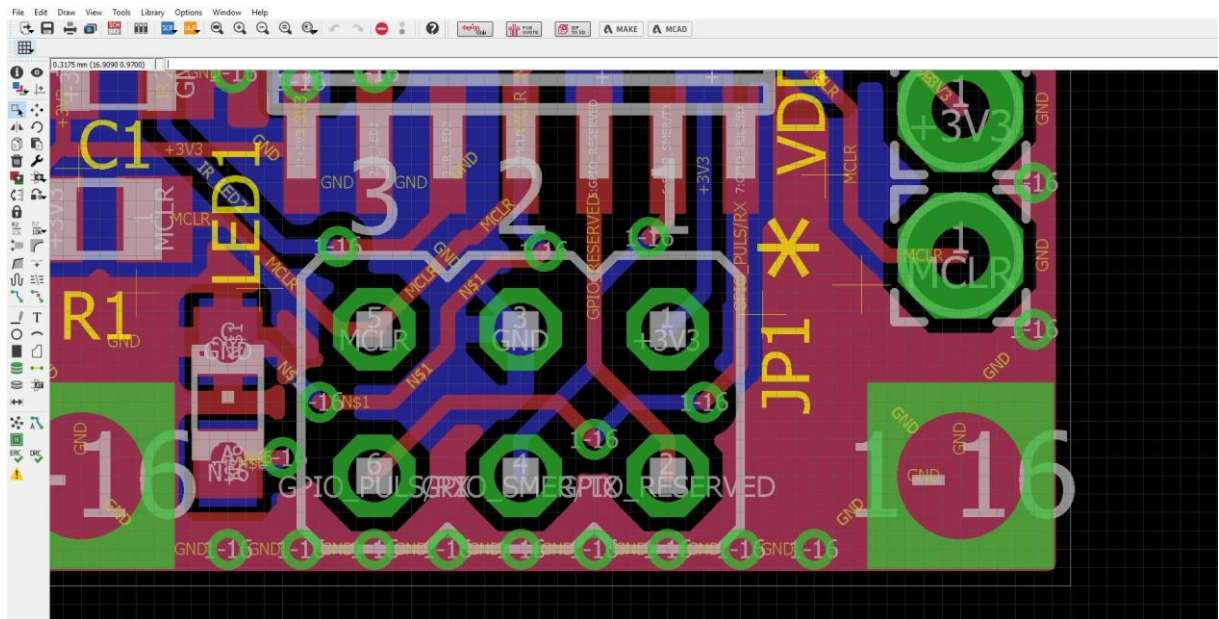


Na Obr. 31 jsou typické ukázky chyb, které vznikají při kreslení plošného spoje. Důležité je si uvědomit, že téměř vše závisí na ploše smyčky, která vzniká a cílem je mít plochu smyčky co nejmenší. [19]

Dále je z hlediska rušení dobré mít na vnějších vrstvách plošného spoje „rozlitou“ zemnicí plochu, která slouží jako stínění. Aby však stínění pracovalo, jak má, musíme po obvodu desky rozmístit prokovy, které zabrání proniknutí rušení z hrany plošného spoje, jak je znázorněno na Obr. 32. Dalším důležitým pravidlem je vyvarovat se pravouhlým napojováním

vodičů. V místě pravého úhlu dochází k vzniku antény, což je věc, kterou rozhodně nechceme, pokud tedy zrovna anténu nenavrhujeme.

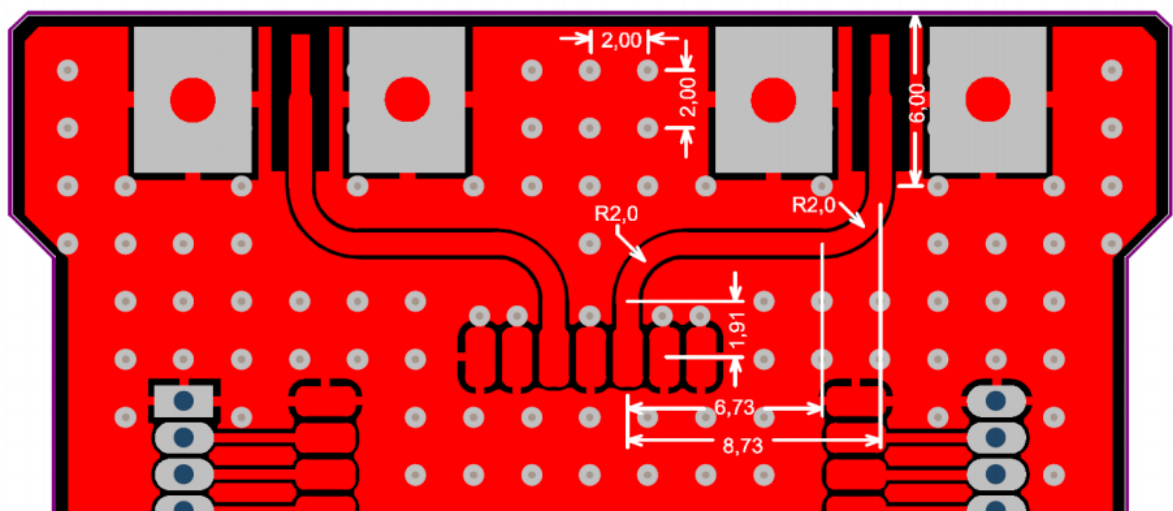
Obr. 32 Návrh prototypu [vlastní]



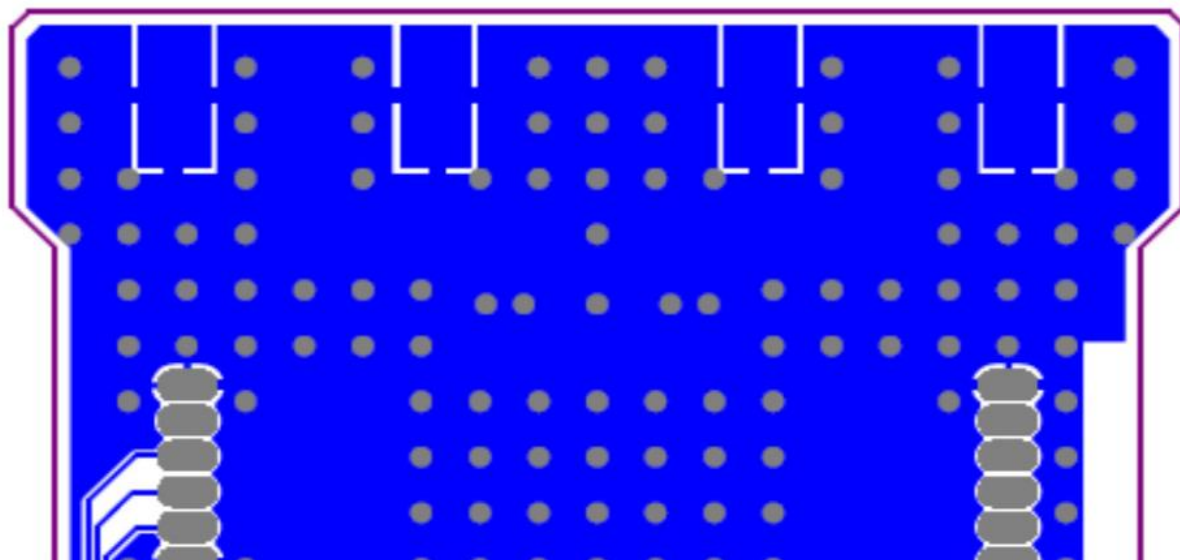
5.5.1 Návrh 50 ohmového spoje

Při návrhu 50 ohmového spoje je důležité zachovat v určitém poměru několik parametrů. Musíme použít minimálně 2vrstvý plošný spoj s rozlitanou zemnicí plochou a umístěnými prokvy v zemnicí ploše. [20]

Obr. 33 Vrchní strana plošného spoje [20]



Obr. 34 Spodní strana plošného spoje [20]



Samotné parametry jsou závislé na materiálu a tloušťce plošného spoje. Parametry samotného vodiče musí splňovat určité parametry a při běžné tloušťce plošného spoje 1,55 mm jsou to šířka vodiče 0,75 mm, šířka izolační mezery mezi vodičem a zemnicí plochou 0,15 mm a tloušťka měděné folie 35 μm . Dále poloměr kružnice v případě změny směru musí být 2 mm. Při zachování těchto parametrů vytvoříme vodič s impedancí 50 Ω . Jak by navržený plošný spoj měl vypadat je zobrazeno na Obr. 33 a Obr. 34. [20]

6 Výsledky a jejich hodnocení

V rámci práce bylo realizováno prototypové zapojení a změřena spotřeba jednotlivých senzorů, které mají velmi nízkou spotřebu elektrické energie. Sensory s nízkou spotřebou je možno provozovat na akumulátory po dobu několika let bez potřeby dobíjení akumulátoru. V případě prodloužení životnosti zařízení se dle okolních podmínek dají využít alternativní zdroje energie jako jsou solární články či Peltierovy články.

Testováním spotřeby bylo zjištěno, že největší vliv na spotřebu moderních senzorů je četnost měření, která v případě odesílání dat jednou za 10 minut znamenají malou četnost měření a podstatné snížení spotřeby.

Bezdrátové sítě Sigfox a LoRa jsou podobné a v některých případech, kdy senzor bude odesílat naměřená data, je výhodnější technologie Sigfox díky velkému pokrytí celé Evropy lepší varianta. Pokud ale bude potřeba odesílat data směrem k senzoru, stojí za zvážení LoRa díky třem možnostem komunikačního režimu. Další faktor je možnost pořídit vlastní gateway, kde nad daty máme vlastní kontrolu a díky tomu levnější provoz. Musíme však počítat s větší počáteční investicí na vybudování základní infrastruktury. Vzhledem k nutnosti dodržování 1 % odvyšlaného času, které se vztahuje i na gateway, bude v případě využívání obousměrné komunikace omezen počet nodů na jednu gateway.

Celkový dojem ovšem kazí poskytovatelé služby, protože finanční politika je v dnešní době nastavena velice nevýhodně. V případě používání senzorů na technologii Sigfox nám dle platného ceníku se všemi poplatky vychází cena na den při komunikaci 100 zpráv na přibližně 2 Kč. Tato cena je velmi vysoká a do budoucna se pravděpodobně bude snižovat. Aktuálně však Sigfox nemá v rámci Evropy konkurenci a vzniká tak monopol, který si může stanovovat ceny. V České Republice je trochu výjimečný stav v podobě konkurence s technologií LoRa. Bohužel České radiokomunikace, které budují celoplošné pokrytí na této technologii stanovily podobné cenové stanovisko jako Sigfox.

Do budoucna určitě stojí za zvážení nasazení technologie IQRF, která je vyvíjena českou společností Microrisc, kde by bylo možné v rámci lokálního měření posbírat data z jednotlivých senzorů a celý balíček dat najednou přenést prostřednictvím sítí Sigfox nebo Lora. V této práci

by se IQRF modul využil například pro člunkový srážkoměr, který nelze přidělat na stožár a je potřeba naměřená data bezdrátově přenést do hlavní jednotky a následně odeslat.

7 Závěr

Možnost použití moderních bezdrátových sítí označované jako LPWAN je zajímavá cesta pro městskou sensoriku, ačkoliv má řadu omezení, ale i přesto se výborně hodí pro mnoho aplikací. Práce byla zaměřena na sítě LoRa a Sigfox, které se ukázaly jako vhodné pro určité aplikace. V některých případech jsou si sítě konkurenční, ale najde se mnoho případů, kdy je daná technologie vhodnější. LoRa se hodí spíše na lokální areálová řešení (možnost nastavení parametrů přenosu) oproti tomu Sigfox se hodí pro globální pokrytí, kde se využívá cíle celosvětového pokrytí jednotnou bezdrátovou sítí. Sigfox má jasně definovanou stejnou politiku po celém světě, zatímco LoRa je otevřená technologie s možností vybudování vlastní sítě, či použití sítě Českých radiokomunikací, které budují pokrytí v rámci České Republiky. Budování celostátního pokrytí technologií LoRa není dle mého názoru vhodné z důvodu problematického dodržování provozních parametrů díky možnostem dané sítě (možnost vlastní gateway, zařízení jiných sítí LoRa, nastavení typu přenosu).

Návrh hardware vyžaduje odlišný přístup a sebemenší změna v návrhu může znamenat prodloužení nebo zkrácení životnosti zařízení o několik let. Nabízí se však otázka, jestli dnešní hardware navržený na dobu životnosti 10 let bude mít i po určité době z hlediska morálního stárnutí význam a nebude spíše nahrazen modernější technologií.

V rámci bakalářské práce se podařilo vyrobit několik prototypů, na kterých byla změřena průměrná spotřeba elektrické energie a výstupem je zjištění, že dnešní hardware s kvalitně napsaným software je možné na akumulátor o kapacitě 4400 mAh provozovat více jak 5 let.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] KRPÁLEK, Josef. *Inteligentní řízení veřejného osvětlení v koncepci IoT*. Praha, 2017. ČVUT.
- [2] *Meshlium Xtreme – 802.15.4/ZigBee Sensor Network Gateway* [online]. b.r. [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <http://www.libelium.com/110730734925/>
- [3] *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/05.2014-3 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu*. [online]. b.r. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: https://www.ctu.cz/cs/download/ooop/rok_2014/vo-r_10-05_2014-03.pdf
- [4] *LoRa Alliance announcement* [online]. b.r. [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <http://www.ineo-sense.com/lora-alliance-announcement/>
- [5] *LoRa-FAQs* [online]. b.r. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.semtech.com/wireless-rf/lora/LoRa-FAQs.pdf>
- [6] *České Radiokomunikace* [online]. b.r. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <https://www.cra.cz/sluzby-iot>
- [7] *Sigfox* [online]. b.r. [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <https://www.sigfox.com/en>
- [8] BELZA, Jaroslav. Akumulátory Li-ion a jejich nabíjení. *Praktická elektronika*. 2001, **2001**(4), 3.
- [9] *Závislost napätia LiPol batérie od množstva zostávajúcej energie* [online]. b.r. [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <http://rcmodely.cevaro.sk/index.php?id=220>
- [10] Lithium-železo-fosfátový akumulátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-03-30].

Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-%C5%BEelezofosf%C3%A1tov%C3%BD_akumul%C3%A1tor

- [11] *LiFePo4 Battery Use* [online]. b.r. [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <https://www.arpoc.org/power/377-lifepo4-battery-2.html>
- [12] SLAVÍK, Petr. EM8500 – Inteligentní správa napájení bez kompromisů. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2016, **2016**(02), 1 [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/soucastky/id:23788/em8500-inteligentni-sprava-napajeni-bez-kompromisu-1->
- [13] *Power Management Controller with Energy Harvester Interface* [online]. b.r. [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <http://www.emmicroelectronic.com/products/power-management/pmu-dc-energy-harvesting-controller/em8500>
- [14] OLEJÁR, Martin. Stručný popis sběrnice I2C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877. *Vyvoj.hw.cz* [online]. b.r., , 1 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbernice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojzeni-externi-eeeprom-24lc256>
- [15] *8-Bit I/O Expander with Serial Interface* [online]. b.r. [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21919e.pdf>
- [16] WU, Fan, Christoph RÜDIGER a Mehmet YUCE. *Real-Time Performance of a Self-Powered Environmental IoT Sensor Network System* [online]. b.r., , 14 [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/2/282>
- [17] *Pojďme programovat elektroniku: Meteostanice, která bude díky Sigfoxu posílat stav počasí třeba z vrcholu Sněžky Více na:* <http://www.zive.cz/clanky/pojdme-programovat-elektroniku-meteostanice-ktera-bude-diky-sigfoxu-posilat-stav-pocasi-treba-z-vrcholu-snezky/sc-3-a-186746/default.aspx> [online]. b.r. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z:

<http://www.zive.cz/clanky/pojdme-programovat-elektroniku-meteostanice-ktera-bude-diky-sigfoxu-posilat-stav-pocasi-treba-z-vrcholu-snezky/sc-3-a-186746/default.aspx>

- [18] FOLTÝN, Petr. *LPWAN - LoRaWAN, Sigfox - vítejte v IoT!* [online]. b.r., , 1 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <https://www.arduinotech.cz/inpage/lpwan-lorawan-sigfox-vitejte-v-iot-107/>
- [19] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010, 123 s. ISBN 9788073002664.
- [20] *Low-Power Long Range LoRa® Technology Transceiver Module* [online]. b.r. [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002346B.pdf>

Seznam obrázků:

OBR. 1 LOKÁLNÍ GATEWAY A SENZORY [2]	4
OBR. 2 LOGO LORA ALLIANCE [4]	6
OBR. 3 POKRYTÍ LOROU ČESKÉ REPUBLIKY 2017 [6]	7
OBR. 4 LOGO SIGFOX [7]	8
OBR. 5 POKRYTÍ TECHNOLOGIÍ SIGFOX 2017 [5]	9
OBR. 6 CHARAKTERISTIKA VYBÍJENÍ LI-ION [8]	11
OBR. 7 ZÁVISLOST NAPĚTÍ NA MNOŽSTVÍ ENERGIE V ČLÁNKU LI-POL [9]	12
OBR. 8 VYBÍJECÍ CHARAKTERISTIKA LiFePO4 [11]	13
OBR. 9 UKÁZKA POUŽITÍ OBVODU EM8500 [12]	15
OBR. 10 BLOKOVÉ SCHÉMA OBVODU [13]	16
OBR. 11 UKÁZKA SBĚRNICE I2C [14]	18
OBR. 12 PORT EXPANDER MCP23008 [15]	18
OBR. 13 MOŽNÉ STAVY NA SBĚRNICI [14]	20
OBR. 14 UKÁZKA NAMĚŘENÝCH HODNOT LOGICKÝM ANALYZÉREM [VLASTNÍ]	20
OBR. 15 PŘENOS NA SBĚRNICI UART [VLASTNÍ]	21
OBR. 16 UKÁZKA CHYBNĚ VYHODNOCENÉ LICHÉ PARITY [VLASTNÍ]	22
OBR. 17 UKÁZKA VYHODNOCENÍ LICHÉ PARITY [VLASTNÍ]	22
OBR. 18 SNÍMAČ SMĚRU VĚTRU [VLASTNÍ]	23
OBR. 19 NAMĚŘENÉ ÚDAJE BME280 [VLASTNÍ]	24
OBR. 20 SCHÉMA ZAPOJENÍ IR SENZORU [VLASTNÍ]	25
OBR. 21 MĚŘENÍ SPOTŘEBY [VLASTNÍ]	26
OBR. 22 BLOKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ [VLASTNÍ]	27
OBR. 23 KOMUNIKACE S MODULEM SIGFOX [17]	28
OBR. 24 LORA PROUDOVÁ SPOTŘEBA [18]	29
OBR. 25 PŘENOS TEPLOTA [VLASTNÍ]	30
OBR. 26 PŘENOS VLHKOST [VLASTNÍ]	31
OBR. 27 PŘENOS TLAK [VLASTNÍ]	32
OBR. 28 PŘENOS SMĚR VĚTRU [VLASTNÍ]	32
OBR. 29 PŘENOS RYCHLOST VĚTRU [VLASTNÍ]	33
OBR. 30 CELKOVÝ PŘENOS DAT [VLASTNÍ]	34
OBR. 31 NĚKTERÉ CHYBY PŘI NÁVRHU PLOŠNÉHO SPOJE [19]	35
OBR. 32 NÁVRH PROTOTYPU [VLASTNÍ]	36
OBR. 33 VRCHNÍ STRANA PLOŠNÉHO SPOJE [20]	36
OBR. 34 SPODNÍ STRANA PLOŠNÉHO SPOJE [20]	37

Seznam zkratek:

G

GFSK

Gaussian Frequency-shift keying 6

I

I2C

Inter-Integrated Circuit 17

IoT

Internet of Things 1

L

LiFePo4

Lithium-železo-fosfátový akumulátor 12

Li-Ion

Lithium-iontová baterie 10

Li-Pol

Lithium-polymerový akumulátor 11

LPWAN

Low-Power Wide-Area Network 3

R

RFID

Radio Frequency Identification 4

U

UART

universal asynchronous receiver/transmitter 21