

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Provozně ekonomická fakulta**

**Katedra informačních technologií**



**Diplomová práce**

**Širokopásmové sítě s nízkou spotřebou – LPWAN**

**Tomáš Bárta**

© 2020 ČZU v Praze

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Tomáš Bárta

Systémové inženýrství a informatika  
Informatika

Název práce

**Širokopásmové sítě s nízkou spotřebou – LPWAN**

Název anglicky

**Low power wide area networks – LPWAN**

---

### Cíle práce

Diplomová práce je tematicky zaměřena na problematiku širokopásmových sítí s nízkou spotřebou. Hlavním cílem práce je analyzovat a zhodnotit dostupné a budované sítě pro internet věcí.

Dílní cíle práce jsou:

- charakterizovat bezdrátové sítě pro internet věcí,
- zhodnotit klíčové vlastnosti sítí pro internet věcí
- formulovat návrh prototypu senzoru využívajícího širokopásmové sítě typu LPWAN
- diskuse a závěry

### Metodika

Teoretická část diplomové práce se bude zakládat na analýze a rešerši odborných informačních zdrojů.

Na základě syntézy teoretických poznatků bude v praktické části vytvořen a sestaven prototyp senzoru jako základní prvek modelového IoT systému, který pro komunikaci využívá prostředí širokopásmové sítě s nízkou spotřebou. V závěrečné části práce bude provedena diskuze nad získanými poznatky a výsledky.

## Doporučený rozsah práce

60–80 stran

## Klíčová slova

LPWAN, sítě, IoT, telemetrie, Arduino, Sigfox, LoRa, NB-IoT, senzor

---

## Doporučené zdroje informací

- BURIAN, P. *Internet inteligentních aktivit*. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-5137-5.
- DOBEŠ, J a ŽALUD, V. *Moderní radiotechnika*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-132-2.
- FLÜGGE, B. *Smart mobility: Connecting Everyone – Trends, concepts and best practices*. Berlin: Springer, 2017. ISBN 978-3-658-15621-3.
- OTIS, B a RABAEY, J. *Ultra-Low Power Wireless Technologies for Sensor Networks*. New York: Springer, 2007. ISBN 978-0-387-30930-9.
- PECHAČ, P. a ZVÁNOVEC, S. *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*. Praha: BEN – technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-223-7.
- RAJ, P a RAMAN, A, C. *Intelligent Cities Enabling Tools and Technology*. Florida: CRC Press, 2015. ISBN 978-1-4822-9998-4.
- SOHRABY, K. a MINOLI, D. a ZNATI, T. *Wireless Sensor Networks – Technology, Protocols, and Applications*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007. ISBN 978-0471743002.

---

## Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – PEF

## Vedoucí práce

Ing. Michal Stočes, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra informačních technologií

Elektronicky schváleno dne 11. 10. 2019

**Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 14. 10. 2019

**Ing. Martin Pelikán, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 05. 04. 2020

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Širokopásmové sítě s nízkou spotřebou – LPWAN" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 5.4.2020

---

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Michalu Stočesovi, Ph.D, z katedry informačních technologií ČZU v Praze, za jeho odborné metodické a svědomité vedení při psaní této práce, za jeho cenné rady doporučení a vždy vřelí přístup.

# Širokopásmové sítě s nízkou spotřebou – LPWAN

## Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na analýzu, srovnání a vyhodnocení vybraných technologií širokopásmových sítí s nízkou spotřebou, které umožňují bezdrátovou komunikaci v prostředí internetu věcí. Práce zahrnuje několik dílčích cílů v podobě charakterizování jednotlivých LPWAN sítí, zhodnocení jejich klíčových vlastností a sestavení prototypu senzoru jako základního prvku modelového IoT systému. Teoretická část obsahuje poznatky z oblasti internetu věcí, bezdrátového přenosu dat, charakteristiku jednotlivých technologií, informace týkající se jejich využití, bezpečnosti a hardwarových prostředků. Ve druhé části práce jsou teoretické poznatky převedeny do praxe, kdy jsou vybrané síťové technologie porovnány a následně je vytvořen prototyp senzoru fungující v širokopásmové síti. Na závěr práce nechybí ekonomické zhodnocení stavby prototypu, jeho porovnání s komerčním řešením, případné možnosti modifikace a je provedena závěrečná diskuze nad získanými výsledky.

**Klíčová slova:** LPWAN, sítě, IoT, telemetrie, Arduino, Sigfox, LoRa, NB-IoT, senzor

# Low power wide area networks – LPWAN

## Abstract

This diploma thesis is focused on analysis, comparison and evaluation of selected technologies of low power wide area networks, which enabling wireless communication in the Internet of Things environment. The work includes several partial goals in the form of characterizing individual LPWAN networks, evaluating their key features and building a prototype sensor as a basic element of the model IoT system. The theoretical part contains knowledge of the Internet of Things, wireless data transmission, characteristics of individual technologies, information concerning their use, security and hardware resources. In the second part of the thesis, the theoretical knowledge is put into practice, when selected network technologies are compared and a prototype of a sensor operating in a broadband network is created. At the end of the thesis there is an economical evaluation of the prototype construction, its comparison with the commercial solution, modification possibilities and a final discussion about the obtained results is made.

**Keywords:** LPWAN, networks, IoT, telemetry, Arduino, Sigfox, LoRa, NB-IoT, sensor

# Obsah

<b>1 Úvod.....</b>	<b>12</b>
<b>2 Cíl práce a metodika .....</b>	<b>13</b>
2.1 Cíl práce .....	13
2.2 Metodika .....	13
<b>3 Teoretická východiska .....</b>	<b>14</b>
3.1 Internet věcí.....	14
3.1.1 Pojem IoT .....	14
3.1.2 Historie a rozvoj IoT .....	15
3.1.3 IoT v současnosti .....	16
3.2 Bezdrátový signál a jeho přenos .....	18
3.2.1 Licenční a bezlicenční pásma .....	21
3.2.2 Vnější vlivy působící na bezdrátové sítě .....	22
3.2.3 Parametry signálu .....	23
3.3 Širokopásmové sítě s nízkou spotřebou .....	24
3.3.1 Pojem LPWAN .....	24
3.3.2 Vlastnosti zařízení v LPWAN .....	26
3.3.3 Výhody a nevýhody LPWAN.....	28
3.4 Technologie širokopásmových sítí s nízkou spotřebou .....	29
3.4.1 Sigfox.....	29
3.4.2 LoRa.....	31
3.4.3 Weightless.....	33
3.4.4 RPMA .....	34
3.4.5 WAVIoT .....	34
3.4.6 Helium .....	35
3.4.7 MIOTY .....	36
3.4.8 Hiber .....	37
3.4.9 NB-IoT.....	38
3.4.10 LTE – M.....	39
3.4.11 EC-GMS-IoT .....	40
3.5 Využití širokopásmových sítí s nízkou spotřebou .....	41
3.6 Bezpečnost LPWAN .....	51
3.7 Arduino a komunikační rozhraní .....	56
3.7.1 SPI.....	58
3.7.2 UART.....	60
3.7.3 I2C .....	61
3.8 Příklady rozšiřujících modulů pro Arduino .....	62



<b>4</b>	<b>Vlastní práce .....</b>	<b>68</b>
4.1	Zhodnocení technologií širokopásmových sítí.....	68
4.1.1	Popis bodovací metody vícekritériální analýzy variant.....	68
4.1.2	Metodika výpočtu váhových kritérií.....	69
4.1.3	Vybrané LPWAN technologie pro zhodnocení pomocí VAV .....	70
4.1.4	Kritéria, pod-kritéria a jejich zhodnocení .....	72
4.1.5	Závěrečné vyhodnocení variant LPWAN.....	82
4.2	Návrh a vytvoření prototypu senzoru.....	85
4.2.1	Kombinovaný senzor teploty, tlaku a vlhkosti BME280.....	86
4.2.2	Snímač intenzity svitu BH1750 .....	86
4.2.3	Bateriový modul 18650 Wemos V3 .....	87
4.2.4	Komunikační modul Wisol SFM10R1 .....	88
4.2.5	Vývojová deska Arduino Pro mini .....	89
4.2.6	Propojovací vodiče, nepájivé pole a krabice .....	90
4.2.7	Zapojení prototypu senzoru .....	91
4.2.8	Vývojové prostředí Arduino IDE .....	92
4.2.9	Vytvořený program řídicí funkce senzoru .....	93
4.2.10	Nastavení serverového rozhraní Sigfox infrastruktury .....	97
4.2.11	Prostředí cloudové platformy Beebotte .....	101
<b>5</b>	<b>Výsledky a diskuse .....</b>	<b>104</b>
5.1	Ekonomické zhodnocení prototypu.....	104
5.1.1	Porovnání s komerčním řešením.....	106
5.2	Možnosti modifikace.....	109
5.3	Diskuze nad výsledkem závěrečné VAV .....	111
<b>6</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>113</b>
<b>7</b>	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>115</b>
<b>8</b>	<b>Přílohy .....</b>	<b>123</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Graf vývoje počtu aktivních zařízení (56) upraveno autorem .....	18
Obrázek 2 - Využití frekvenčního pásma (81).....	20
Obrázek 3 - síťová smíšená a hvězdicová topologie (vlastní zpracování).....	26
Obrázek 4 - Graf vývoje LPWAN v závislosti na počtu zařízení (56) upraveno autorem ..	28
Obrázek 5 - Časové schéma odeslání a příjmu dat (vlastní zpracování) .....	32
Obrázek 6 - Operační módy NB-IoT (vlastní zpracování) .....	39
Obrázek 7 - Webové prostředí ZOOCO (83).....	44
Obrázek 8 - Schéma zapojení UART komunikace (vlastní zpracování) .....	60
Obrázek 9 - Teplotní senzor DS18B20 (37) .....	63
Obrázek 10 - Kombinovaný senzor DHT22 (vlastní zpracování) .....	64
Obrázek 11 - Světelný senzor TSL2561 (74) .....	65
Obrázek 12 - Schéma elektronické relé (19) .....	66
Obrázek 13 - Saatyho matice (vlastní zpracování) .....	70
Obrázek 14 - Kombinovaný senzor BME280 (vlastní zpracování).....	86
Obrázek 15 - Světelný senzor BH1750 (vlastní zpracování).....	87
Obrázek 16 - Bateriový modul Wemos V3 (vlastní zpracování).....	88
Obrázek 17 - Komunikační modul Wisol pro síť Sigfox (vlastní zpracování).....	89
Obrázek 18 - Arduino Pro mini (vlastní zpracování) .....	90
Obrázek 19 - Testovací zapojení prototypu (vlastní zpracování) .....	91
Obrázek 20 - Schéma zapojení prototypu (vlastní zpracování) .....	92
Obrázek 21 - Finální uložení prototypu (vlastní zpracování) .....	92
Obrázek 22 - Knihovny a definice proměnných (vlastní zpracování) .....	93
Obrázek 23 - Základní inicializace (vlastní zpracování) .....	94
Obrázek 24 - Měření vybraných veličin (vlastní zpracování) .....	94
Obrázek 25 - Optimalizace dat pro odeslání (vlastní zpracování).....	95
Obrázek 26 - Testovací výpis hodnot do sériové linky (vlastní zpracování).....	95
Obrázek 27 - Rozhodovací část pro tři nezávislá měření (vlastní zpracování) .....	96
Obrázek 28 - Hlavní část funkce pro odeslání dat (vlastní zpracování) .....	97
Obrázek 29 - Informace o zařízení v prostředí Sigfox (vlastní zpracování).....	98
Obrázek 30 - Lokalizační mapa Sigfox (vlastní zpracování) .....	98
Obrázek 31 – Ukázka statistiky o přijatých zprávách (vlastní zpracování).....	99

Obrázek 32 – Vytvořený callback pro odeslání zpráv (vlastní zpracování) .....	100
Obrázek 33 - Vytvořený kanál pro ukládání přijatých dat (vlastní zpracování).....	101
Obrázek 34 – Pravidla pro zpětný převod hodnot (vlastní zpracování) .....	102
Obrázek 35 - Ukázka grafického výstupu platformy Beebotte (vlastní zpracování).....	102

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Rozdělení elektromagnetických vln (vlastní zpracování) .....	19
Tabulka 2 - Využívané frekvence LPWAN v jednotlivých oblastech (vlastní zpracování) .....	25
Tabulka 3 - Charakteristika vývojových desek Arduino (vlastní zpracování) .....	58
Tabulka 4 - Váhové kritérium komunikace (vlastní zpracování) .....	73
Tabulka 5 – Vyhodnocení kritéria komunikace (vlastní zpracování).....	75
Tabulka 6 - Váhové kritérium nasazení (vlastní zpracování) .....	76
Tabulka 7 - Vyhodnocení kritéria nasazení (vlastní zpracování) .....	77
Tabulka 8 - Váhové kritérium dokumentace (vlastní zpracování) .....	77
Tabulka 9 - Vyhodnocení kritéria dokumentace (vlastní zpracování).....	78
Tabulka 10 - Váhové kritérium podpora platforem třetích stran (vlastní zpracování) .....	79
Tabulka 11 - Vyhodnocení kritéria podpora platforem třetích stran (vlastní zpracování) ..	80
Tabulka 12 - Váhové kritérium konfigurace systému (vlastní zpracování).....	81
Tabulka 13 - Vyhodnocení kritéria konfigurace systému (vlastní zpracování).....	82
Tabulka 14 - Váhové kritérium závěrečné zhodnocení (vlastní zpracování) .....	83
Tabulka 15 - Závěrečné vyhodnocení vybraných technologií (vlastní zpracování).....	84
Tabulka 16 - Závěrečné vyhodnocení vybraných technologií v upravené podobě (vlastní zpracování).....	85
Tabulka 17 - Vyčíslení nákladů hlavních komponent prototypu senzoru (vlastní zpracování).....	106
Tabulka 18 - Vyčíslení nákladů přidružených komponent (vlastní zpracování) .....	106
Tabulka 19 - Základní charakteristiky prototypu senzoru a komerčního řešení (vlastní zpracování).....	107

# 1 Úvod

Diplomová práce se zabývá specifickou částí bezdrátové komunikace v prostředí internetu věcí, která je zajišťována širokopásmovými sítěmi s nízkou spotřebou. Tyto sítě slouží ve většině případů pro komunikaci mezi koncovými zařízeními a hlavní stanicí. Jejich základní využití jsou senzorické sítě aplikované především v průmyslu a přidružených oborech, kde zajišťují přenos potřebných dat z různých typů procesů a napomáhají tak tyto procesy usnadňovat a optimalizovat. Popularita širokopásmových sítí vzrůstá společně s postupným rozšiřováním a prostupováním internetu věcí do všech odvětví komerční sféry i každodenního života. V diplomové práci jsou shromážděny základní teoretické poznatky v oblastech internetu věcí, širokopásmových sítí, jejich využití, nechybí ani kapitola o zajištění bezpečnosti síťového přenosu a šíření dat pomocí bezdrátové komunikace zajišťované radiovými vlnami. Závěr teoretické části je zaměřen na vývojovou desku Arduino a rozšiřující hardwarové prvky související s vytvořením prototypu senzoru.

Praktická část obsahuje dvě hlavní kapitoly, přičemž první se zaměřuje na srovnání a zhodnocení vybraných technologií širokopásmových sítí s nízkou spotřebou pomocí bodovací metody vícekritériální analýzy variant. Pro srovnání bylo vybráno pět hlavních kritérií v podobě komunikace, nasazení, dokumentace, podpory platform třetích stran a konfigurace systému. Druhá kapitola praktické části je zaměřena na stavbu prototypu senzoru, který je schopen měřit čtyři veličiny v podobě vlhkosti vzduchu, teploty, svítivosti a atmosférického tlaku. Senzor je založen na vývojové desce Arduino Pro mini a příslušných rozšiřujících modulech, včetně Sigfox komunikačního modulu Wisol, vybraného na základě provedeného zhodnocení technologií, který obstarává přenos dat do síťové infrastruktury. Pro přehledné zobrazení naměřených veličin byla použita cloudová platforma Beebotte, do které jsou data posílána za pomoci vytvořeného callbacku na serverové straně Sigfoxu. V závěru práce je provedena diskuze na získanými výsledky, srovnání prototypu s komerčním řešením, jeho ekonomické zhodnocení a případné návrhy modifikace.

## **2 Cíl práce a metodika**

### **2.1 Cíl práce**

Diplomová práce je tematicky zaměřena na problematiku širokopásmových sítí s nízkou spotřebou. Hlavním cílem práce je analyzovat a zhodnotit dostupné a budované širokopásmové sítě v prostředí internetu věcí. Dílčí cíle práce jsou charakterizování bezdrátových sítí v oblasti internetu věcí, zhodnocení klíčových vlastností těchto sítí a díky získaným znalostem z teoretické části práce navrhnout a vytvořit prototyp senzoru operujícího v síti LPWAN. V závěru práce bude provedena diskuze nad získanými výsledky a z nich vytvořen závěr.

### **2.2 Metodika**

Metodika řešené problematiky diplomové práce se bude zakládat na studiu, analýze a rešerši odborných informačních zdrojů. V teoretické části práce bude specifikováno prostředí internetu věcí, signál pro bezdrátový přenos dat, technologie širokopásmových sítí, jejich možnosti využití, bezpečnost a hardwarové prvky související se stavbou prototypu senzoru. Na základě syntézy teoretických poznatků bude v praktické části vytvořeno zhodnocení vybraných technologií širokopásmových sítí, prostřednictvím vícekritériální analýzy variant a vytvořen prototyp senzoru jako základní prvek modelového IoT systému, který pro komunikaci využívá prostředí širokopásmových sítí s nízkou spotřebou. Za pomoci získaných informací bude v závěrečné části práce provedena diskuze nad ekonomickou stránkou senzoru, jeho případných modifikacích a shrnuty výsledky získané v průběhu práce.

## **3 Teoretická východiska**

Následující kapitola zahrnuje teoretická východiska z oblasti internetu věcí, bezdrátového přenosu dat, charakteristiku jednotlivých technologií, informace týkající se jejich využití, bezpečnosti a hardwarových prostředků. Na základě těchto získaných informací bude možné v praktické části provést zhodnocení vybraných síťových technologií a následně vytvořit prototyp senzoru využívající pro přenos dat širokopásmovou síť.

### **3.1 Internet věcí**

Část práce internet věcí shromažďuje a poskytuje základní informace z dané oblasti. Vysvětluje samotný pojem internet věcí, který vytváří prostředí pro interakci mezi virtuálními a fyzickými prvky, kdy komunikaci představuje bezdrátový přenos dat. Zmiňuje se o vzniku a historickém vývoji, kde můžeme vidět, že teoretické principy základů internetu věcí byly známy mnohem dříve, než došlo k jejich hromadnému nasazení v praxi, které bylo umožněno až velmi rychlým technologickým rozvojem. Poslední podkapitola přináší pohled na technologickou úroveň IoT v současnosti, jeho strukturu, rozšíření do komerčního i spotřebitelského sektoru a rozmanitost hardwarových prvků a softwarového vybavení využitých pro chod síťových infrastruktur.

#### **3.1.1 Pojem IoT**

V průběhu posledních let dochází k nárůstu rychlosti rozvoje v oblasti elektroniky, díky tomu je rozšiřování nových technologií přístupnější a pojmy jako internet věcí, se čím dál více dostávají do povědomí všech lidí i mimo technologické obory. Internet věcí je prostředí, kde se setkávají fyzické a virtuální objekty, které společně tvoří ekosystém většinou zaměřený na specifické území působení a poskytují uživateli potřebné informace. V mnoha případech dokážou tyto systémy fungovat autonomně a usnadňovat dílčí činnosti v rámci vybraných úkonů. Pojem internet věcí z anglického „internet of things“ (IoT) má mnoho definic, které ovšem sdílejí společnou myšlenku, pojednávající o tom, že internet věcí je komplexní síť inteligentních objektů, které jsou mezi sebou schopny komunikovat a předávat tak potřebné informace určené k vyřešení různorodých činností. Pohyb dat v síti

může být v reálném čase nebo může být odeslán v určitých časových intervalech dle potřeby využití. (62)

Obecně řečeno prvkem sítě internetu věcí může být jakékoliv zařízení, které lze monitorovat pomocí vzdáleného přístupu. Je třeba upřesnit, že se jedná zejména o jednodeskovou počítače, vývojové desky, senzory a různorodá čidla, naopak zařízení jako jsou mobilní telefony, tablety, popřípadě počítače nejsou považovány za objekty sítě internetu věcí. Výhodou zařízení IoT je velikost, energetická úspornost a prakticky nekonečná možnost uzpůsobení na všechny potřebné úlohy. Ve velké míře se tato zařízení využívají pro záznam různorodých fyzikálních veličin jako je například teplota, vlhkost, tlak, napětí a mnoho dalších. Důležitým aspektem celého konceptu IoT je sběr dat, s tím související komunikace zajišťující přenos dat mezi jednotlivými prvky sítě. Celý proces je kompletován měřením neboli sběrem dat pomocí jednotlivých zařízení, následně jsou data sítě odeslána a sdružena v datové sety. V případě potřeby jsou posléze data zpracována, nad datovým balíčkem je provedena analýza a výsledné hodnoty jsou použity v řídicích procesech. Jednotlivé kroky mohou být prováděny přímo v zařízení, které se tak stará o vše nebo může být využívána celá struktura zařízení vykonávající specifické úkony. Z velké části se jedná o autonomní proces bez jakéhokoliv zásahu uživatele, či administrátora.

Jednotlivá zařízení sítě internetu věcí jsou často nazývána jako chytrá (smart), a to právě díky jejich vlastnosti informace odesílat, přijímat nebo oba procesy provádět zároveň a data dále zpracovávat. Koncept chytrého zařízení je důvodem, proč jsou sítě internetu věcí stále významnější, a rychle se rozšiřují. Jednotlivé prvky nemusejí mít vysoký výpočetní výkon nebo obrovské paměti, a i přesto dokážou plnit relativně složité úlohy, což umožňuje jejich zapojení v komplexní síti s přístupem na internet. (7) (16)

### **3.1.2 Historie a rozvoj IoT**

Termín internet věcí byl poprvé uveden do povědomí Kevinem Ashtonem v roce 1999. Ashton pracoval na optimalizaci dodavatelského řetězce a chtěl své nadřízené upozornit na novou technologii RFID (radio-frequency identification), která by pomohla usnadnit některé procesy logistiky. Protože v té době byl internet novou technologií na vzestupu, nazval svou pracovní prezentaci „Internet of Things“. Ovšem koncept IoT jako takový je znám již přibližně od 70. let 20. století, kdy byl označován jako vestavěný internet (embedded internet) nebo všudypřítomný výpočet (pervasive computing).

Významným mezníkem pro internet věcí se stal rok 2010, kdy se začal implementovat v souvislosti se sběrem dat v americké internetové společnosti Google LLC. V následujícím roce se toto spojení dostalo na vrchol jako nový technologický fenomén. Ještě větší pozornost získalo IoT v lednu roku 2014, kdy Google oznámil nákup společnosti Nest Labs, zabývající se výrobou chytrých zařízení jako jsou termostaty a bezpečnostní kamery, za 3,2 miliardy amerických dolarů. Téhož roku se také uskutečnila největší výstava spotřební elektroniky CES (Consumer Electronics Show) v Las Vegas jejíž název a hlavní téma bylo právě Internet of Things. (43) (49)

Možnost pro růstu internetu věcí bylo zpřístupnění nejen většího zájmu ze strany různých technologických skupin, ale zejména vývoj technologií a miniaturizace v oblasti hardwaru. Jednou z hlavních novinek, která umožnila ještě větší nástup a samotný provoz IoT zařízení bylo představení a nasazení internetového komunikačního protokolu IPv6. Samotný vznik tohoto odvětví umožnil veliký pokrok v oblastech přímo navazujících. Za zmínku stojí vývoj autonomních vozidel, který v posledních letech nabírá na vysokých obrátkách. (13)

### **3.1.3 IoT v současnosti**

V současné době je možné technologii internetu věcí rozdělit do čtyř hlavních vrstev, které společně tvoří jeden funkční celek. Jedná se o vrstvu hardwarových zařízení, softwarových aplikací, komunikační vrstvu a v neposlední řadě vrstvu platformní. Každá z vrstev funguje za pomoci přispění ostatních, doplňující se navzájem a jsou tak neoddělitelné.

Hardwarová vrstva představuje jednotlivá zařízení, která tvoří interface neboli rozhraní mezi fyzickým a digitálním světem. Mohou to být zařízení od malých sensorických modulů až po mohutné průmyslové stroje, jako jsou například stroje využívané v zemědělském průmyslu. Jejich charakteristika je vázána na druh použití a zaměření. Od toho se odvíjí jejich složitost nebo vlastnosti, jako jsou velikost, tvar či výpočetní výkon. Obecně platí, že je možné proměnit prakticky jakýkoliv fyzický objekt na chytré zařízení za pomoci senzorů, akčních členů, elektronických relé a příslušného softwaru pro správu zařízení, sběr dat a jejich měření. Jednotlivé senzory, akční členy a relé mohou sami o sobě působit jako prvky v sítích internetu věcí.



Druhá vrstva představuje vrstvu softwarovou, která umožňuje zařízením plnit jednotlivé funkce. Představuje řídicí prvek celého systému určující co, kdy a jak se bude provádět. Přesně specifikuje, jak mají zařízení měřit, komunikovat a reagovat na jednotlivé definované situace. Softwarovou vrstvu je možné rozdělit do dvou skupin. Jedná se o software starající se o ovládání, řízení a manipulaci se zařízeními, dále software starající se o analýzu získaných dat a jejich prezentaci a vizualizaci.

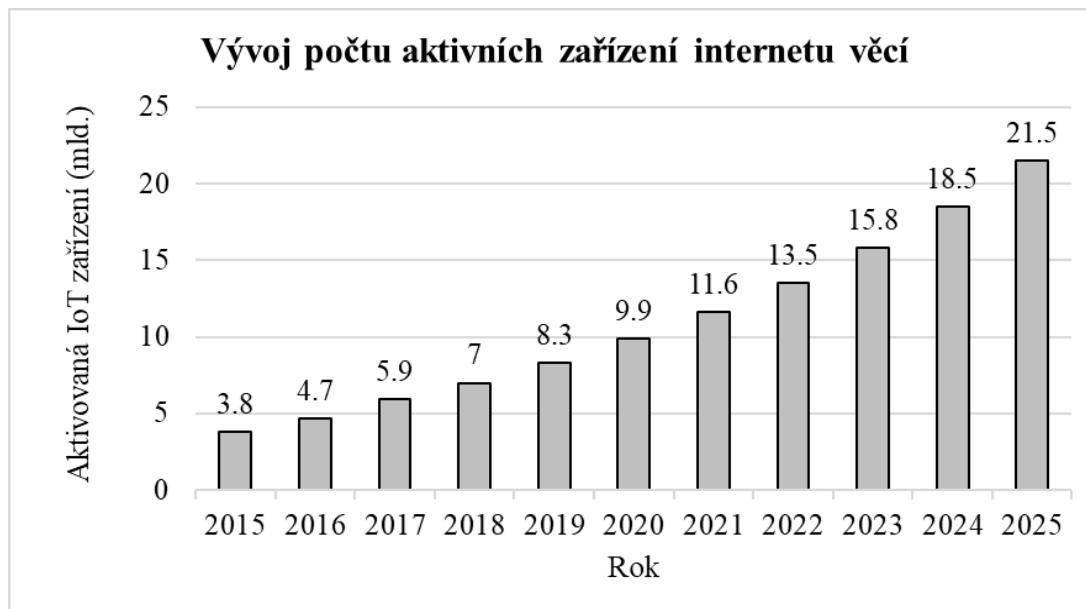
Komunikační vrstva, jak už z jejího názvu vyplývá, zajišťuje samotnou komunikaci a přenos dat mezi jednotlivými zařízeními v síti. Blíže spolupracuje se softwarovou vrstvou a je tvořena, jak fyzickými objekty jako jsou vysílače, satelity, tak jednotlivými síťovými protokoly pro prostředí IoT (ZigBee, ZWave, LoRa, Bluetooth, MQTT, LwM2M a další). Vybrané technologie poté utváří pravidla pro odesílání a zároveň příjem dat jednotlivými prvky sítě nebo jak komunikují jednotlivé prvky se zařízeními třetích stran.

Neméně důležitou je platformní vrstva představující místo, na kterém jsou jednotlivá senzorická data shromažďována, spravována a analyzována pro účely dalšího využití nebo případné vizualizace. Na trhu existuje velké množství IoT platform, které se liší podle typu využití a jaké od nich uživatel očekává funkce.

Z dnešního pohledu lze využití IoT dále rozdělit na dvě primární pole působnosti. Jedná se o průmyslové neboli komerční využití a využití nekomerční, zaměřené na běžné spotřebitele. Z pohledu průmyslu se jedná zejména o odvětví jako je logistika, energetika, zdravotnictví, průmyslová výroba a obecně provozní automatizace. V tomto sektoru je zavádění IoT hlavně otázkou možného snížení výdajů, zkrácení doby návratnosti investic, snaha o zrychlení a zpřesnění výrobních postupů a v neposlední řadě také úspory v oblasti financí spojené s lidskými zdroji. Co se týká nekomerčního využití, zde IoT působí jako prvek usnadňující některé základní činnosti běžného života. Jedná se zejména o automatizaci domácnosti, chytrou elektroniku a zabezpečovací systémy. (12) (76)

Internet věcí proniká čím dál tím více, jak do prostředí běžného života, tak do odlišných komerčních oborů a zároveň pomáhá formovat nová odvětví, která by bez těchto technologií nemohla vzniknout natož fungovat. To umožňuje rozsáhlá zásoba různorodých technologií se specifickými možnostmi zaměření, různé typy sítí, protokolů a zařízení. Jednou z významných otázek současnosti a vzhledem k celkovému vývoji i budoucnosti je spotřeba elektrické energie. Toto téma se neméně dotýká i internetu věcí, jeho jednotlivých procesů a technologií. Právě díky zaměření na nízkoenergetickou náročnost se do popředí

dostávají síť řešící tuto otázku, označované jako širokopásmové sítě s nízkou spotřebou (LPWAN). V následujících kapitolách bude popsána problematika týkající se těchto sítí, jednotlivé typy, jejich vlastnosti a podrobněji rozebrána možnost využití v reálném světě.



Obrázek 1 - Graf vývoje počtu aktivních zařízení (56) upraveno autorem

### 3.2 Bezdrátový signál a jeho přenos

Pro přenášení dat a informací v bezdrátové komunikaci se využívá radiových vln, specificky se jedná o proces šíření elektromagnetických vln mezi jednotlivými body tohoto přenosu. Signál je v reálném světě ovlivňován různými fyzikálními zákony v podobě odrazu, pohlcení, ohybu, lomu, polarizace a rozptylu. Samotné fyzikální vlastnosti jsou dále ovlivňovány různorodým vývojem klimatických podmínek a reakcemi v atmosféře. Nejvíce invazivními je déšť a případné vodní páry, sněhové přeháňky nebo ionizace atmosféry způsobená sluncem. Samotný tvar zemského povrchu a jeho narušování uměle vytvořenou zástavbou hraje také obrovskou roli v procesu šíření signálu. (57)

Samotnou komunikaci posléze tedy přenos dat je možné rozdělit do několika menších podprocesů, které musejí proběhnout, aby byla komunikace úspěšná. Prvním krokem je nejprve úprava dat do podoby, která je vhodná pro přenos přes vybranou infrastrukturu. Tento proces je nazýván kódování a v hardwarové podobě je zajištěn příslušným kódérem na koncovém zařízení. Výstupem kódéru je samotný signál, který je

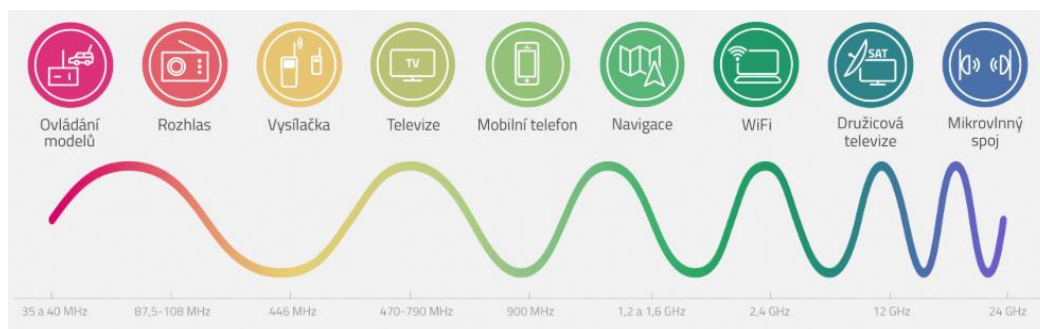
následně nutné přenést pomocí elektromagnetických vln na cílové zařízení, proto je na zařízení vytvořeno vlnění prostřednictvím vysokofrekvenčního generátoru a následně je procesem modulace signál vložen neboli umístěn do samotných radiových vln za použití modulátoru. Upravený signál v podobě vln je vyslán přes anténu koncového zařízení do vysílacího prostoru a v ideálním případě zachycen anténou přijímacího zařízení. Po přijetí je následně signál zesílen a prostřednictvím demodulátoru získán požadovaný signál, který je následně dekodérem převeden ze signálu na data, přenášející příslušnou informaci. (29)

Elektromagnetické vlny dělíme na několik typů, například podle příslušné vlnové délky. Pro každou vlnovou délku je využíváno jiného frekvenčního pásma, které umožňuje výběr vhodné varianty pro různá praktická řešení. V praxi se jedná o rozmezí od milimetrových vln až po vlny velmi dlouhé umožňující například navigaci lodí a letadel.

Název pásma	Zkratka	Frekvence	Vlnová délka
Extrémně krátké vlny	EKV	30–300 GHz	10 mm - 1 mm
Super krátké vlny	SKV	3–30 GHz	100 mm - 10 mm
Ultra krátké vlny	UKV	0,3 - 3 GHz	1 m–100 mm
Velmi krátké vlny	VKV	30–300 MHz	10 m–1 m
Krátké vlny	KV	3–30 MHz	100 m–10 m
Střední vlny	SV	0,3 - 3 MHz	1 km - 100 m
Dlouhé vlny	DV	30–300 kHz	10 km - 1 km
Velmi dlouhé vlny	VDV	3–30 kHz	100 km - 10 km
Extrémně dlouhé vlny	EDV	0,3 - 3 kHz	1000 km - 100 km

**Tabulka 1 - Rozdělení elektromagnetických vln (vlastní zpracování)**

Pro Českou republiku tuto oblast spravuje český telekomunikační úřad (ČTÚ) a na globálním měřítku se tímto tématem zabývá a případné problémy řeší Mezinárodní telekomunikační unie (ITU).



**Obrázek 2 - Využití frekvenčního pásma (81)**

Dále je možné elektromagnetické vlny rozdělit podle způsobu jejich šíření po zemském povrchu:

- povrchová vlna
- přímá vlna
- troposférická vlna
- ionosférická vlna

Povrchová vlna, jak již název napovídá využívá odrazu zemského povrchu, což umožňuje šíření signálu do míst, které nejsou přímo viditelné nebo se nacházejí za horizontem. Tento typ vlny se však potýká se značnou mírou útlumu, kdy je část signálu rušena nebo pohlcována rozličnými objekty. Právě pro svoji vlastnost doručování signálu do míst z dosahu, je využíváno tohoto typu zejména ve vojenských a vědeckých aplikacích. Přímá vlna představuje šíření signálu pomocí přímo viditelného vysílače a přijímače, které musejí udržovat přímou viditelnost. Právě tento typ je v dnešní době nejčastěji využíván v prostředí internetových poskytovatelů, kteří pomocí této technologie zprostředkovávají Wi-Fi komunikaci. Ionosférické vlny využívají pro šíření lom, odraz a ohyb vrstev ionosféry a vln s vysokou frekvencí. Vlny troposférické naopak využívají ke svému přenosu vrstvy troposféry, kde dochází k jinému indexu lomu. V případě troposférických vln je velmi důležité zmínit jejich značnou závislost na vývoji klimatických podmínek, které přenos v troposféře ovlivňují. (57)

### 3.2.1 Licenční a bezlicenční pásma

V prostředí bezdrátové komunikace figurují dvě hlavní pásma, ve kterých je příslušným zařízením umožněno vysílat. Jedná se o pásma bez nutnosti licence tedy bezlicenční pásma, jako je například ISM pásmo, které využívá valná většina širokopásmových technologií. Licenční pásma pro vysílání vyžadují příslušnou licenci, jako jsou mobilní sítě GSM a LTE. I tato pásma jsou v některých případech využívána širokopásmovými sítěmi, konkrétně jde o NB-IoT, LTE-M a EC-GSM-IoT. V každé zemi jednotlivá pásma spravuje příslušná organizace a v České republice poskytuje licence Český telekomunikační úřad. Základní vlastností a hlavní výhodou vysílání v licenčních pásmech je dodržování licenčních podmínek a každý účastník je tak chráněn před možným rušením jiných subjektů. V pásmu bezlicenčním tato ochrana prakticky neexistuje a jednotliví výrobci spoléhají na to, že budou dodržovány všeobecné podmínky provozu v těchto pásmech. Bezlicenční pásma využívají takzvaná SRD zařízení (Short Range Devices), která představují radiofrekvenční vysílače pro komunikaci, která používají k přenosu dat nízkého příkonu, typicky v rozmezí 25–100 mW. Do jisté míry volnost v bezlicenčním pásmu je limitována omezením v rámci vysílacího výkonu (ERP) a střídáním signálu během vysílání (duty cycle). Střídání signálu představuje poměr času, v jakém zařízení stráví vysíláním k celkovému času běhu zařízení. Tyto limity slouží k udržení nízkého výskytu rušení a snížení záporných dopadů na funkcionalitu celé infrastruktury. Do této skupiny spadají zařízení využívající komunikační technologie jako je Bluetooth, Wi-Fi, NFC, ale také širokopásmové technologie jako jsou LPWAN. Pro širokopásmové technologie s nízkou spotřebou se často využívá frekvenční pásmo 433, 868 a 915 MHz dle specifikace jednotlivých států. Pásmo ISM bylo ještě do nedávna zřídka využíváným. V posledních letech se ovšem toto pásmo stalo jedním z nejpoužívanějších v oblasti bezdrátové komunikace, zejména díky velkému rozvoji LPWA sítí a technologií jako LoRa nebo Sigfox. Vzhledem k základnímu ustanovení o omezení v bezlicenčních pásmech mohou tyto služby zajišťovat důležitou bezztrátovost dat neboli úspěšný přenos dat v určitém časovém intervalu. V souvislosti se vzrůstajícím počtem zařízení je kladen veliký důraz na zabezpečení celé infrastruktury proti jakémukoliv způsobu rušení, které je preventivně zajišťováno v podobě QoS (Quality of Service) a v případě LPWAN systémů se jedná o potvrzení doručení jednotlivých vysílaných zpráv. (8) (18) (28)

### 3.2.2 Vnější vlivy působící na bezdrátové síť

Na proces přenosu dat v bezdrátovém prostředí mají vliv nejen hardwarové a softwarové předpoklady samotných koncových zařízení či stanic, ale také velká řada vnějších vlivů související s prostředím, ve kterém tato zařízení operují. Jedním z hlavních jevů způsobující potíže při bezdrátovém přenosu dat je útlum signálu. Tento jev je způsoben stejně jako v případě zvukových vln objekty, které se nacházejí v dráze signálu, což může představovat například různé stavby nebo přírodní překážky. Každý s těchto objektů má různou hustotu a jinou úroveň pohlcování daného signálu. Právě tento faktor tvoří základní rozdíl v podobě různých hodnot pokrytí jednotlivými LPWA sítěmi v zastavěných a otevřených oblastech. Na pohlcování přímo navazuje odraz signálu, který může být v některých případech jak kladný, tak záporný. Odraz je definován jako situace, kdy při nárazu signálu na daný objekt signál změní směr. Tento jev je určován především frekvenční délkou a vlastnostmi objektu, do kterého signál naráží. Stejně jako v případě světelného záření může při odrazu dojít k takzvanému rozptylu, kdy je signál odražen do více směrů zároveň, což může mít opět kladný i záporný efekt. Velice důležitými kritérii při bezdrátové komunikaci je vzdálenost jednotlivých komunikačních bodů od sebe a jejich přímá viditelnost. V případě, že jsou od sebe vysílací a přijímací zařízení moc daleko, dochází k deformaci signálu, který se dostává pod úroveň šumu a je tedy zamezeno funkčnímu spojení. Tento jev je možno vyjádřit pomocí radiokomunikační rovnice:

$$P_{dB2} = P_{dB1} - L + G_1 + G_2 - R$$

Kde:

$P_{dB2}$  – výkon signálu na vstupu do přijímače

$P_{dB1}$  – vysílací výkon zařízení

$L$  – útlum neboli ztráty šířením elektromagnetických vln v daném prostředí

$G_1$  – zisk přijímací antény

$G_2$  – zisk vysílací antény

$R$  – rezerva spojení představujícího vlivy jako je počasí

Radiokomunikační rovnice se používá při dimenzování bezdrátových síťových infrastruktur pro určení počtu zařízení na plochu, kterou je třeba pokrýt signálem. Na

hodnoty signálu má samozřejmě veliký vliv také použití frekvenčního pásma a výkyvy klimatických podmínek. (57)

### 3.2.3 Parametry signálu

Základní jednotkou vyskytující se v oblasti bezdrátového přenosu dat je decibel (dB). Nepředstavuje fyzikální veličinu jako takovou, ale jedná se o logaritmické vyjádření v podobě poměru o kolik je daná hodnota větší než jiná hodnota a je bezrozměrná. Decibel je používán nejen pro vyjádření síly signálu, ale také v oblasti úrovně zvuku a signálových ztrát tedy útlumu. Pomocí decibelu je možné vyjádřit signálový zisk nebo ztrátu, kdy použijeme vzorec:

$$G_{dB} = 10 * \log \left( \frac{P_1}{P_2} \right)$$

Platí, že při poměru  $P_1 > P_2$  se jedná o zisk a v opačném případě při  $P_1 < P_2$  jde o ztrátu signálu neboli dochází k jeho útlumu. V praxi se hodnota vztahuje k 1 mW a je tedy užíváno dBm. V případě kvality signálu je užíváno dvou ukazatelů RSSI (Received Signal Strength Indicator) a SNR (Signal to Noise Ratio). RSSI je hodnota, která určuje úroveň síly přijatého signálu a opět se vztahuje na 1 mW, proto je udávána v dBm. Interpretace je taková, že čím více se hodnota z intervalu záporných čísel blíží nule, tím je signál silnější a nula reprezentuje plnou sílu signálu rovnou právě 1 mW. Vzorec je následující:

$$RSSI_{dBm} = 10 * \log \left( \frac{P_1}{1 mW} \right)$$

Hodnota SNR představuje o kolikrát je možné signál snížit, než se dostane na úroveň šumu. Je charakterizován jako vztah mezi středním výkonem signálu  $P_s$  a středním výkonem šumu  $P_n$ . Vzorec je v následujícím tvaru:

$$SNR_{dB} = 10 * \log \left( \frac{P_s}{P_n} \right)$$

Hodnota SNR je brána v úvahu na straně přijímače a dále ji ovlivňuje propustnost komunikačního kanálu, chybovost při přenosu neboli úroveň ztrátovosti dat. Jednotkou je opět decibel a vyšší hodnota v tomto případě znamená větší kvalitu přenášeného signálu. V případě hodnot nižších, než je 0 dB je síla šumu větší než samotná síla signálu. (17)

### 3.3 Širokopásmové sítě s nízkou spotřebou

Kapitola se věnuje problematice širokopásmových sítí s nízkou spotřebou. Jsou zde vysvětleny základní pojmy vztahující se k těmto sítím. Dále je popsáno, jaké mají vlastnosti, jak jsou navrhována zařízení operující v této komunikační oblasti, a co taková zařízení musejí splňovat. Nechybí ani část, která se věnuje výhodám a nevýhodám sítí samotných.

#### 3.3.1 Pojem LPWAN

Nízko energetické širokopásmé bezdrátové sítě zkráceně označované jako LPWAN (Low Power Wide Area Networks) nebo LPN (Low Power Networks), je skupina technologií navržená pro komunikaci mezi zařízeními v rozlehlých oblastech, při hlavním zaměření na nízkou spotřebu elektrické energie a minimalizaci provozních nákladů. Jedná se o technologie, které se od roku 2013 začali značně rozvíjet a tvořit na základě rozšíření nově vznikajících odvětví, formování trhu a potřebě specifických požadavků na přenosy malých objemů dat v jednotlivých implementacích. Hlavním rozdílem oproti běžně používaným komunikačním technologiím je malá přenosová rychlost, pohybující se od několika bitů až k hranici 250 kilobitů za sekundu, v mnoha případech ještě omezena podmínkou zasilání dat pouze několikrát v daném časovém intervalu.

LPWA sítě vznikly jako privátní bezdrátové senzorické sítě, ale postupem času se z nich stala služba, či infrastruktura poskytovaná v mnoha případech třetími stranami, umožňující vlastníkům nebo vývojářům senzorických zařízení využívat tuto technologii bez nutnosti investic do drahých zařízení a budování vlastních infrastruktur. Snížení nákladů prvků komunikační infrastruktury se projeví například u vysílačů nebo vstupních bran řídících provoz v síti. Jak již z názvu vyplývá, LPWA sítě se zaměřují na dva hlavní faktory: nízkou spotřebu a komunikaci na velkou vzdálenost. Přidanou hodnotou využití tohoto typu sítí je důraz na nízké pořizovací náklady a jednoduchou implementaci infrastruktury. (55) (58)

Právě nízká energetická náročnost je klíčovou vlastností těchto sítí, která umožňuje vytvoření senzorů a dalších komponent fungujících i několik let na malou baterii bez potřeby výměny. V reálných případech se jedná například o délku dosahující až 20 let. Druhým faktorem, jak již bylo výše zmíněno je možnost komunikace na velké vzdálenosti,



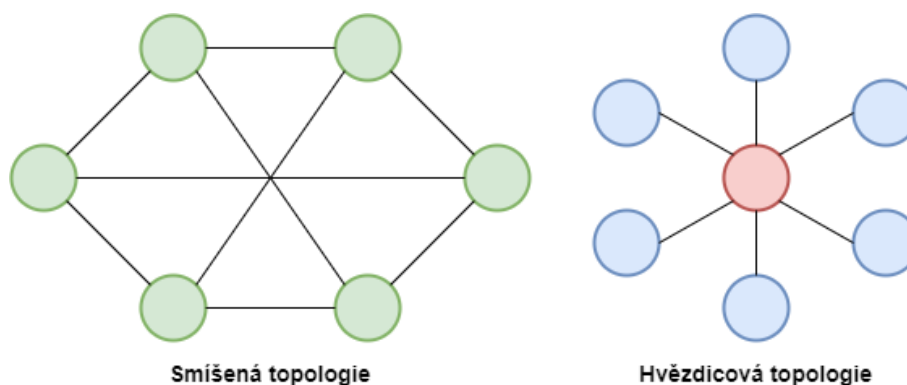
což je i hlavním rozdílem od ostatních technologií používaných v IoT komunikaci, jako je Bluetooth nebo Wi-Fi, které mají dosah od několika málo metrů až do stovek metrů. Ovšem použití LPWAN umožňuje komunikaci až na vzdálenost desítek kilometrů lišících se podle prostředí, ve kterém je síť použita s ohledem na jednotlivé technologie poskytovatelů. Neméně důležité je dodržení nízkých nákladů zajištěné zejména použitím jednoduchých a lehkých síťových protokolů, dále sníženou komplexností hardwaru umožňující pokles výsledné ceny zařízení. Samotný dlouhý dosah jednotlivých prvků sítě a využívání v mnoha případech bezlicenčního pásma snižuje zásadně i cenu celkové infrastruktury. Po celém světě se pro LPWAN používají různé frekvence odvíjející se od regionu, kde se technologie využívá. Následující tabulka představuje hodnoty pro Evropu, Spojené státy a Asie.

<b>Frekvence MHz</b>	<b>Region</b>	<b>Základní frekvence MHz</b>
433–434	Evropa	433.175, 433.375, 433.575
863–870	Evropa	868.1, 868.3, 868.5
902–928	Spojené státy americké	Není specifikováno
470–510	Čína	Není specifikováno
779–787	Čína	779.5, 779.7, 779.9
915–928	Austrálie	Není specifikováno
915–928	Nový Zéland	923.2, 923.4
865–867	Indie	865.0625, 865.4025, 865.985
920–928	Asie	923.2, 923.4

**Tabulka 2 - Využívané frekvence LPWAN v jednotlivých oblastech (vlastní zpracování)**

Velká většina poskytovatelů LPWAN zařízení s tímto frekvenčním nesouladem počítá a zařízení jsou připravena buď pro jednotlivé oblasti zvlášť nebo je jednotlivé prvky možné modifikovat pomocí softwarových nástrojů a přizpůsobit je tak oblasti, ve které mají být využity. Základní síťovou strukturou je v LPWA síti ve velké většině případů hvězdicová topologie, která funguje na principu koncových zařízení komunikujících se základní stanicí neboli gateway, která data zasílá dalším stanicím, popřípadě pomocí běžných technologií internetového spojení předává data přímo příslušnému serveru. V některých případech se využívá struktury zvané mesh (smíšená). Tato topologie tvoří síť jednotlivých zařízení plnících nejen svoji základní funkci, což je komunikace koncového

zařízení přímo se základní stanicí, ale zároveň pomáhají s přesunem dat po síti jejich dalším preposíláním za pomoci nejbližšího aktivního prvku a předávají si data, dokud se nedostanou k centrálnímu přijímači, který získaná data předá serveru. Taková to struktura umožňuje dosahování větších vzdáleností a pokrývání rozsáhlých ploch s technologiemi, které nemají v praxi tak velký dosah. (45) (73)



Obrázek 3 - síťová smíšená a hvězdicová topologie (vlastní zpracování)

### 3.3.2 Vlastnosti zařízení v LPWAN

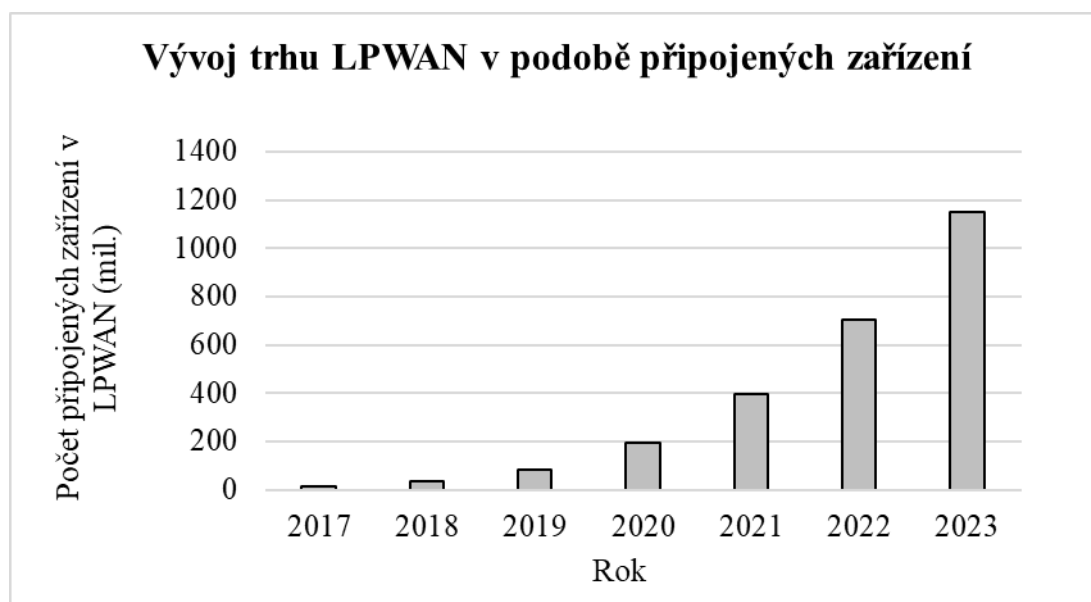
Protože v případě použití LPWAN se nejčastěji jedná o senzorní sítě obsahující velký počet jednotlivých prvků je třeba zmínit, jak by mělo zařízení pracující právě v širokopásmových sítích s nízkou spotřebou vypadat. Samotné zařízení jako celek, a hlavně jeho jednotlivé moduly zajišťující různé procesy musí být navrženy s ohledem na nízkou spotřebu a minimální výrobní náklady. V případě modulů zařízení se jedná o vysílač a přijímač společně s anténou, digitální procesor, senzory a modul napájení.

Největší část spotřeby energie zařízení představuje samotná bezdrátová komunikace následovaná procesy snímání veličin a zpracování dat. V porovnání s komunikací se jedná o velice malý podíl na celkové spotřebě. Proto se využívá funkcí vylepšeného spánku a vypínání, což znatelně redukuje výslednou průměrnou hodnotu spotřebované energie a umožňuje tak dlouhodobý provoz i přesto, že probouzením zařízení vznikají výkyvy ve spotřebě. Existuje několik alternativních řešení například optická komunikace, která umožňuje velice nízkou spotřebu při zachování malých rozměrů, ale zásadní nevýhodu představuje nutnost dohlednosti komunikujících zařízení a s tím související směrovost.

Zásadním rozdílem je snížený objem dat, který je síť schopna přenášet oproti tradičním bezdrátovým komunikačním technologiím. U tradičních technologiích se používá pro měření spotřeby vázané na odeslaná data vzorec energie/bit, ovšem pro měření v LPWA sítích je třeba tento výraz upravit na energii/užitečný bit, kde je v potaz brána významnost jednotlivých dat potřebných k operacím jako synchronizace, ukládání nebo snímání dat. Kapacita datových paketů v těchto sítích je omezena, a navíc dochází k nepředvídatelným událostem, které mohou souviset s oscilací ve spotřebě zařízení. Samotné datové přenosy mezi zařízeními a jejich rychlost je jedním z nejdůležitějších faktorů návrhu. Jednou z hlavních vlastností LPWA sítí je vzdálenost, na kterou mohou zařízení komunikovat, a i tento faktor blíže souvisí se spotřebou koncového zařízení. Při růstu vzdálenosti vysílání stejně tak roste spotřeba, která je potřebná pro odvysílání zprávy do sítě. Možnost, jak tuto spotřebu ovlivnit je hustota použitých zařízení z geografického pohledu. To znamená, že jedno zařízení umístěné ve větší vzdálenosti od přijímací stanice zvyšuje zásadně celkový průměr spotřeby sítě. Efektivní energetická úroveň přenosu se udává v rozmezí od -10 do +3 dBm. Se vzdáleností vysílání dále souvisí i sensitivita jednotlivých zařízení, která je ovlivněna zejména prostředím, v které je systém implementován. Teoretická vzdálenost v prázdném radiovém prostředí je přibližně 37 metrů při vysílacím výkonu 0 dBm a v případě prostředí simulujícího zastavěné industriální oblasti je vzdálenost pouze 10 metrů při stejném vysílacím výkonu. V prostředí, kde jsou většinu času zařízení v režimu spánku nebo v jiné podobě úsporného režimu je důležité zmínit časový interval potřebný k zavedení zařízení do stavu připravenosti komunikovat. Samotný proces probouzení nezpůsobuje zásadně velký nárůst spotřeby energie ovšem přidružený proces související právě s připraveností komunikovat již ano. Jedná se o vybrání a připojení na specifikovaný komunikační kanál. V síťové architektuře se při rychlém probuzení, efektivním získání kanálu a synchronizaci může vytvořit úspora ve spotřebě energie, která je v těchto sítích tak významná. Komplexní řešení pro tyto účely používají speciálně vyvinuté algoritmy, které zefektivňují synchronizaci a rychlost přijímání komunikačních kanálů.

Vývoj senzorických zařízení je spjat s kompromisem týkající se energetické úspornosti versus ceny za implementaci. Jedná se o vytvoření nízkoenergetického zařízení, ale při zachování co nejmenší ceny a nákladů na budování sítě. Při výrobě můžeme totiž snižovat spotřebu energie použitím novějších a kvalitnějších komponent, ale za cenu

zvýšení celkových nákladů na zařízení. Proto je potřeba docílit kompromisu mezi těmito dvěma složkami, který se v anglické jazyce nazývá „power / integration trade-off“. V zásadě se jedná o rozhodnutí, co z ekonomického hlediska má smysl integrovat do zařízení. (36) (61)



Obrázek 4 - Graf vývoje LPWAN v závislosti na počtu zařízení (56) upraveno autorem

### 3.3.3 Výhody a nevýhody LPWAN

V případě použití širokopásmových sítí sebou tyto technologie přinášejí několik zásadních výhod, oproti běžně užívaným metodám bezdrátového přenosu. Jak již z výše uvedeného textu vyplývá hlavní dvě výhody jsou nízká spotřeba koncových zařízení, které mohou bez problémů fungovat na baterii i několik desítek let a značně velké oblasti pokrytí signálem umožňující výstavbu senzorických sítí v nedostupných oblastech, kde je problematický přístup nebo nebezpečné prostředí pro lidský personál. Dalším kladem je relativně nízká investice do síťové infrastruktury v poměru k počtu připojených zařízení, kdy v mnoha případech jedna základní stanice dokáže agregovat data až od jednoho milionu zařízení, a navíc jsou v dnešní době velmi často LPWAN poskytovány jako IaaS (Infrastructure as a Service) ve spojení s dalšími službami v modelu PaaS (Platforme as a Service), což umožňuje budování opravdu nízkonákladových řešení v krátkém časovém období. Méně zmiňovanou výhodou je samotná malá velikost zařízení, přičemž hlavně

v posledních letech dochází ke značné miniaturizaci na straně koncových zařízení, která opět umožňuje nové možnosti nasazení těchto širokopásmových řešení v reálném světě.

Přes LPWA sítě ve většině případů nelze zasílat velké objemy dat, jako jsou obrázky nebo videa, což vyřazuje tyto sítě z některých oblastí využití jako jsou zejména zabezpečovací kamerové systémy. Dalším problémem je v mnoha případech horší propustnost signálu v obydlených oblastech a je tedy lepší implementovat tyto sítě v otevřených prostorech. Tento problém je zásadní hlavně v průmyslových nasazeních a nemalá část poskytovatelů LPWAN se zaměřuje na vývoj sítí, která mají lepší úroveň penetrace materiálů. Komunikace mezi zařízeními a jejich aplikací nebo serverem není konstantní a v některých případech je umožňována pouze komunikace jednosměrná. To zcela nebo částečně zamezuje ovládání a snímání veličin v reálném čase. Mnoho LPWA sítí v dnešní době již implementuje komunikaci obousměrnou zejména pro potřeby vzdálené aktualizace koncových zařízení. Někdy je těmto sítím také vyčítána určitá míra nespolehlivosti přenosu, která plyne ze zkracování jednotlivých procesů v zařízení, za cílem ušetření energie. Různé varianty LPWAN implementují různé šifrovací a ověřovací procesy, které mají na starost řešení těchto slabých stránek, ale jen v případech, kdy je to z implementačního hlediska možné. (51) (79)

### **3.4 Technologie širokopásmových sítí s nízkou spotřebou**

Následující část práce představuje základní přehled vybraných aktuálně používaných technologií LPWAN, které se pohybují na trhu nebo v současné době přicházejí v podobě nových síťových technologií. Každý zástupce je zde krátce popsán a charakterizován v závislosti na jeho vlastnostech a parametrech odpovídajícího síťového protokolu.

#### **3.4.1 Sigfox**

Sigfox je technologie stejnojmenné firmy pocházející z Francie, která byla založena v roce 2009. Oboru bezdrátových sítí se začala věnovat hlavně v souvislosti s telemetrií neboli vzdáleným měřením například spotřeby elektrické energie, plynu a vody. Pro poskytování konektivity používá vlastní patentovanou UNB technologii (Ultra-Narrow Band) a v současné době je možné sítě využívat v 70 zemích s pokrytím přibližně 5 milionů čtverečních kilometrů. Odhadované pokrytí obyvatel je asi 1,1 miliardy po celém světě. V České republice a na Slovensku jsou služby poskytovány přes operátora

SimpleCell, který se stará o budování infrastruktury a zajišťuje potřebnou podporu ve spolupráci se společností T-Mobile. V Německu existuje přímé zastoupení Sigfox Germany a stejně tak v Polsku zajišťuje služby Sigfox Poland, který v tuto chvíli síť buduje. V Rakousku stejně jako na území Polska je aktuálně síť ve výstavbě, o kterou se stará operátor HELIOT Group.

Technologie Sigfoxu pracuje v nelicenčních pásmech ISM (Industrial, Scientific, Medical), které je pásmem vyhrazeným pro průmyslové, vědecké a lékařské účely. Firma využívá tohoto pásma zejména z důvodu nízké úrovně signálového šumu, což umožňuje snadnější komunikaci a napomáhá k celkově nižší spotřebě, vysoké sensitivitě příjmu a nízkým nákladům na vývoj. Zařízení jsou vyvíjena specificky pro tři hlavní regiony, a to Evropu s funkční frekvencí 868 MHz, Severní Ameriku pracující na frekvenci 915 MHz a pro Asii, kde je využíváno frekvence 433 MHz. Koncová zařízení jsou připojována k hlavním stanicím pomocí BPSK modulace (Binary Phase Shift Keying) s rychlostí datového přenosu až 100 b/s pro Evropu a až 600 b/s pro síť v USA. Při vzniku umožňoval Sigfox pouze jednosměrnou komunikaci v podobě přijímání dat od koncových zařízení (uplink). V průběhu vývoje však vyšlo najevo, že umožnění komunikace se zařízeními a možnost zasílání dat směrem k zařízeními (downlink) je zásadní a umožňuje vznik mnoha nových a užitečných funkcionalit. Proto je v současné době možné v síti využívat obousměrné komunikace ovšem s podmínkou, že možnost komunikace směrem ke koncovým zařízením nastane vždy v plánovaném čase po odeslání zprávy ze zařízení. Dále je komunikace omezena na maximálně 140 zpráv za den z jednoho zařízení a délka jedné zprávy nesmí překročit 12 bytů. V případě downlinku je omezení ještě více striktní s maximálním počtem 8 zpráv denně a délkou příslušné zprávy pouze 8 bytů. Každé koncové zařízení odesílá zprávu třikrát za sebou, a to vždy na trochu jiném frekvenčním kanálu, což umožňuje dosažení větší spolehlivosti při přenosu dat. Samotné přijímací stanice mohou přijímat zprávy na všech příslušných kanálech zároveň. Tato vlastnost umožňuje koncovým zařízením náhodný výběr kanálů, na kterých budou vysílat. Tím je zajištěna redukce komplexnosti řešení a s tím spojené snížení ceny zařízení. Při postupu dat skrze síť dochází nevyhnutelně k různým typům rušení signálu, zejména způsobeného prostředím, ve kterém se signál šíří. Rušení je různorodé a nevyhnutelné ve všech typech bezdrátových sítí. Signál je vždy při příjmu trochu odlišný od verze, která byla odeslána ze zařízení. Proto jednotlivé stanice využívají metodu DPSK (Differential Phase Shift

Keying) pro čištění přijatého signálů a odeslání takto ošetřených dat do Sigfox cloudu. Postup je takový, že zpráva v podobě bitového souboru je podle předem navržených postupů převedena na odlišný bitový soubor s tím, že při každé změně z 1 (high) na 0 (low) je do signálu implementován fázový posun (phase shift), který vytváří nový časový úsek mezi originální hodnotou a nově vytvořenou. Takto vytvořený nový datový set je posléze pomocí hardwarového obvodu, který se zaměřuje právě na úseky s posunem vyčištěn, a nakonec převeden zpět do původní podoby a odeslán do cloudu.

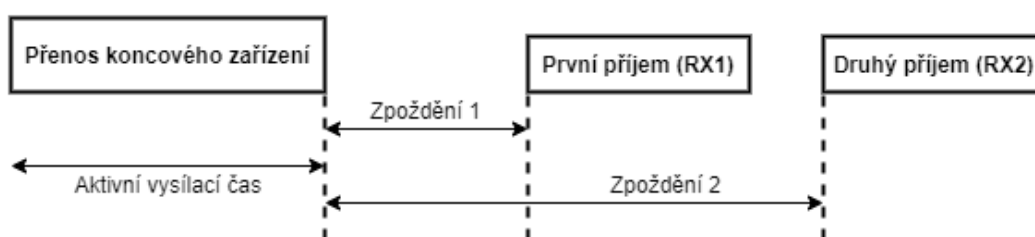
Společnost Sigfox aktuálně nabízí tři hlavní produkty. Jedná se o návrh, stavbu a provoz privátních sítí na míru pro podnikové účely, dále geolokační systém ATLAS, který se zaměřuje na nízkou spotřebu zařízení a může fungovat jako náhradní řešení pro GPS systém. Pro některá použití je možné využít ATLAS jako primární geolokační systém, ale je třeba brát v potaz jeho menší přesnost oproti systému GPS. Nejnovější službou v nabídce společnosti je Admiral LEO, která umožňuje sledování objektů pomocí satelitních technologií. (38) (71) (72)

### **3.4.2 LoRa**

LoRa je síťový protokol využívaný při komunikaci s cílem nízké spotřeby a pokrytí velké oblasti signálem, navržený s hlavním použitím v bezdrátových zařízeních, které jsou napájené pomocí baterií. V současné době se o vývoj stará asociace LoRa Alliance, která sdružuje takové giganty jako jsou společnosti Semtech, ARM, Arduino, Axatel anebo Amazon, či Cisco. Jedná se o technologii, která podporuje obousměrnou komunikaci zařízení se stanicemi, což umožňuje aktualizace softwarového vybavení koncových zařízení pomocí OTA (over-the-air) aktualizací. Dále nabízí možnost využití lokalizačních služeb a end-to-end zabezpečení. LoRa je patentovaná technologie, která využívá bezlicenční pásmo na frekvencích 868 MHz pro Evropu, 915 MHz pro Austrálii i Severní Ameriku a 923 MHz pro Asii. Širokopásmové sítě využívající pro komunikaci LoRaWAN mají síťovou topologii v podobě hvězdy, kdy jednotlivé stanice přijímají zprávy od koncových zařízení a posílají je přímo na centrální server. Pro obousměrnou komunikaci se využívá CSS modulace (chirp spread spectrums), díky které signál vytváří jen malé množství šumu a je velice těžké ho detekovat nebo rušit. Pro vysílání nabízí LoRa šest faktorů šíření (SF7 až SF12), které upravují poměr rychlosti přenosu dat a vzdálenost datového přenosu v prostředí. Čím vyšší je faktor, tím dokáže komunikovat zařízení na

větší vzdálenost, ale s menší přenosovou rychlostí. Dle datové specifikace umožňuje LoRa přenosovou rychlost v rozmezí od 300 b/s do 50 kb/s. Maximální velikost jedné zprávy je 243 bytů a každá zpráva odeslaná z koncového zařízení je přijata všemi stanicemi v příslušném dosahu. Pomocí této redundance je zvýšena úroveň spolehlivosti sítě, která ovšem může vést k vyšším počátečním investicím pro budování infrastruktury. Samotná nadbytečnost stejných zpráv je řešena na straně backendu, který se stará o filtrování pomocí verifikace jednotlivých zpráv a odesílání krátké zprávy o úspěšném přijetí. Systém příjmu na více stanic je zároveň uplatňován pro lokalizační funkce koncových zařízení.

LoRaWAN definuje několik tříd komunikace pro různé použití v IoT aplikacích. Třída A (class A) umožňuje obousměrnou komunikaci a každé odeslání zprávy je následováno dvěma krátkými mezerami pro obdržení zprávy což znamená, že pro doručení zprávy do zařízení je vždy nutné počkat na období po odeslání dat. Funkce načasování odeslání je řízena na samotném zařízení a je upravována podle jeho potřeb. Tato třída se zaměřuje na nízkou spotřebu energie a je vhodné ji použít v bezdrátových zařízeních fungujících pouze na baterie. (38)



**Obrázek 5 - Časové schéma odeslání a příjmu dat (vlastní zpracování)**

Pro třídu B (class B) platí stejné vlastnosti jako u předchozí třídy. Navíc je však implementováno pevně stanovené okno pro příjem dat a zařízení v tomto časovém úseku očekávají zprávu. Tato funkcionalita ovšem přináší zvýšení spotřeby energie zařízení. Z tohoto důvodu je class B vhodná spíše pro aplikace, při kterých zařízení můžeme častěji dobíjet nebo mohou být připojeny na stálo do elektrické sítě. Poslední třída C (class C) je určena výhradně pro zařízení, které jsou připojeny nepřetržitě ke zdroji elektrické energie. V případě této třídy je totiž okno pro příjem zpráv otevřeno téměř nepřetržitě, kdy koncová zařízení kontrolují síť pro přicházející zprávy. V nedávné době LoRa Alliance ohlásila novinky, kde je možné očekávat úpravy rozdělení tříd. Další verze protokolu by měla



obsahovat implementaci zařízení, které bude moci svévolně přepínat mezi třídou A a C podle svých potřeb a také se mluví o nové klasifikaci pro třídu B. (46) (54)

### 3.4.3 Weightless

Weightless je společné jméno pro technologie a společnost, která stojí za jejím vývojem. Jedná se o LPWAN technologii, která byla specificky navržena pro užití v IoT prostředí a v současné době funguje již v 56 zemích světa. Výhodou je celosvětové otevření toho standardu, které umožňuje rychlejší vývoj za pomoci komunity, nižší cenu na rozvoj infrastruktury případně její implementaci a maximalizace individuálních řešení na míru. Hlavním cíle je vytvoření řešení, které umožňuje komunikaci na relativně velké vzdálenosti, a to s co nejnižší spotřebou energie a náklady, snaha o rychlé celosvětové rozšíření a zavedení této technologie. Užívání není licenčně zpoplatněno, ale je nutné zaplatit členský poplatek pro přístup do vývojové část Weightless. Tento poplatek je zdůvodňován tím, že se jedná o neziskovou společnost a tímto způsobem se snaží shromáždit finanční prostředky na samotnou infrastrukturu, administraci, rozvoj informační technologie a komunikaci. Weightless operuje v bezplatném pásmu specificky na frekvencích 138, 433, 470, 780, 868, 915, 923 MHz. Komunikace umožňuje obousměrný přenos dat a je optimalizovaná pro vysokou úroveň spolehlivosti s maximální délkou zprávy až 48 bytů. Přenosová rychlost se pohybuje v rozmezí od 625 b/s do 100 kb/s. Vysílací výkon koncových zařízení je 14 dBm, pro stanice 27 dBm s dosahem přibližně 2 km v zastavěných oblastech. Weightless využívá topologii leaf node pro koncová zařízení a hvězdicovou topologii pro základní stanice, které jsou zapojeny ve vlastní oddělené síti, která zajišťuje alokaci rádiových zdrojů, časování celé sítě, autentifikaci zařízení, roaming a plánování. V počátku vývoje společnost rozlišovala tři druhy této sítě. Jedná se o Weightless P, N a W, přičemž v současné chvíli se rozdělení nepoužívá a Weightless je brán jako jeden produkt, který vychází z výše popsané specifikace s označením P. Druhá verze označená N byla určena pro použití pouze s funkcí uplink a třetí s označením W byla technologie, která fungovala na nevyužívaných pásmech televizního signálu. (84) (87)

### 3.4.4 RPMA

Random Phase Multiple Access neboli zkráceně RPMA je název pro technologii v oblasti IoT, která byla vytvořena pro komunikaci mezi zařízeními (M2M) v průmyslovém prostředí a v současné chvíli se vývoj zaměřil hlavně na technologie spojené s chytrými městy. Oproti konkurenci nabízí RPMA síť s velkou kapacitou a nemalé možnosti rozšiřitelnosti. Dalším kladem je vysoký faktor penetrace signálu přes betonové konstrukce a do podzemí, což usnadňuje použití v zastavěných oblastech. Prozatím je hlavním trhem USA s tím, že další státy jsou v jednání včetně Austrálie, České republiky, Slovenska, Polska, Maďarska a dalších evropských států. Funkčnost RPMA technologie je prezentována společností na dvou velkých projektech v USA. Prvním je pokrytí ropného pole v Texasu, kde jedna stanice pokrývá plochu s rozlohou 400 čtverečních mil. Druhým příkladem je metropolitní oblast v Dallasu s použitím 17 stanic, je zde pokryto zhruba 2000 čtverečních mil. Z těchto a několika dalších nasazení společnost uvádí průměrnou výdrž zařízení na baterii 23,6 let při odeslání jedné zprávy denně o velikosti 50 kilobitů. RPMA na rozdíl od běžně používaného ISM frekvenčního pásma využívá velmi populární bezlicenční frekvence 2,4 GHz. I přesto, že se může zdát výběr této frekvence zvláštní při dnešním zahlcení tohoto pásma Wi-Fi signálem, z pohledu rozšiřování do dalších zemí je tento krok chytrou volbou. Tuto frekvenci lze využívat ve většině zemích. Přenosová rychlost může dosahovat až 624 kb/s, ale v případě běžného nasazení zařízení posílají a přijímají data rychlostí 31 kb/s pro uplink a 15 kb/s pro downlink. (6)

### 3.4.5 WAVIoT

WAVIoT je infrastruktura internetu věcí poskytovaná jako služba stejnojmennou firmou založenou v Texaském Houstonu. Společnost je zaměřena zejména na vytváření sítí pro chytrá města, kde zajišťují připojení nízko energetických zařízení jako jsou elektroměry, plynoměry a vodoměry, které odesílají malé množství dat o měřených veličinách. Společnost spolupracuje s mnoha partnerskými subjekty na vývoji nejen privátních sítí pro individuální účely, ale zároveň i na vývoji a rozvoji podnikových a státních sítí. Jako u většiny LPWAN technologií provoz je zajišťován v ISM pásmu na frekvenčním rozsahu 430–500 MHz a 860–925 MHz. Síť WAVIoT využívají vlastní protokol ve zkratce NB-Fi z anglického Narrowband Fidelity, který efektivně rozděljuje frekvenční pásma na jednotlivé kanály. Kupříkladu na frekvenci 50 kHz může fungovat až

1024 jednotlivých kanálů a na frekvenci 500 kHz až 10 240 přenosových kanálů. Další výhodou je úplné pokrytí všech vrstev ISO modelu a standard je celosvětově otevřený a přístupný. Použita je hvězdicová topologie a nechybí ani DBPSK modulace ve fyzické vrstvě tohoto protokolu, což umožňuje komunikaci až na vzdálenost 10 kilometrů v městských oblastech a 30 kilometrů v otevřeném prostranství. Stejně jako u technologie Sigfox jsou data z koncových zařízení přijímána stanicemi a poté odesílána do cloudu, kde pomocí API k datům přistupují aplikace třetích stran. Přenosová rychlost se pohybuje v rozmezí od 50 b/s až do 25,6 kb/s podle jednotlivých nasazení je možné odesílat zprávy s maximální délkou 8 bytů s průměrným zpožděním 30 sekund. NB-Fi pracuje v režimu half duplex, který umožňuje komunikaci jak stanice s koncovým zařízením, tak naopak, ovšem pouze jedním směrem v jeden časový moment a není tedy možnost obousměrné komunikace zároveň. V současné době jde o technologii využívanou převážně v Severní Americe, ale v budoucnu WAVIoT plánuje rozšíření do evropských států s hlavním cílem implementace v průmyslu, chytrých městech a chytrých rozvodných sítí. (47) (48) (82)

### **3.4.6 Helium**

Helium je IoT společnost založená v roce 2013 se sídlem v San Francisku, která má za cíl zjednodušení výstavby sítě, samotné správy a následného škálování. I přesto, že se přímo snaží konkurovat již zavedeným hráčům na trhu jako je Sigfox, LoRa nebo RPMA přináší Helium nový prvek v podobě peer to peer provedení a integraci systému kryptoměny do bezdrátové sítě. V aktuálním provedení je systém dostupný pouze na území USA, a to hlavně z právních důvodů. Samotná síť je tvořena jednotlivými Helium hotspoty, které fungují jako přijímací stanice (gateway) a jsou vlastněny nejenom společnostmi, ale i jednotlivými uživateli, kteří tak pomáhají vytvářet decentralizovanou infrastrukturu celé sítě. Systém pro kryptoměnu je poté implementován, tak že ve chvíli, kdy přes hotspot putují jednotlivé datové balíky, těžší zařízení Helium tokeny pomocí vykonávání užitečných úkonů, které pomáhají celé síti. Příkladem může být ověřování pozic jednotlivých uzlů sítě (nodes), řazení dat a jejich jednotlivé odesílání do sítě nebo předávání dat mezi jednotlivými hotspoty či validaci bezdrátového spojení. Využití Helium sítě je zamýšleno hlavně pro lokalizaci různých objektů jako jsou elektrické koloběžky, elektrická kola, chytré obojky či náramky, které mohou přes síť odesílat malé množství dat v krátkých časových intervalech, a to s nízkými náklady na provoz. Pokud chce externí

subjekt využít Helium síť pro přesun dat, musí si nejdříve zakoupit token (data credit) sloužící právě pro tyto účely. Společnost se zaměřuje hlavně na bezpečnost přenosu dat z hardwarové do aplikační vrstvy. A proto Helium vyvíjí a nabízí zařízení specificky se zabezpečením na hardwarové hladině. Pro tento účel využívá technický standard 802.15.4 IEEE PHY, který definuje provoz pro osobní bezdrátové sítě s nízkým provozem. Helium síť nabízí komplexní řešení, které je možné spravovat prostřednictvím příslušného API na stránkách společnosti a využívají vlastní otevřený protokol pro bezdrátové sítě s názvem LongFi, optimalizovaný pro komunikaci na velké vzdálenosti, maximální úsporu energie a pro zařízení využívající nízké přenosové rychlosti. LongFi umožňuje obousměrný provoz a možnost zasílání aktualizací nebo schopnost doručovat data s novými instrukcemi pro koncová zařízení. Výhodou tohoto protokolu je možnost provozu nejen na frekvencích pásma ISM jako je 779 MHz (Čína), 868 MHz (Evropa) a 902 MHz až 928 MHz (Amerika), ale i celosvětově využívaných frekvencích 2,4 a 5 GHz, což přináší velkou všestrannost vzhledem k budování samotné infrastruktury sítě. Komunikace v síti je poté omezena přenosovou rychlostí od 1 kb/s až do 5 kb/s a maximální velikost jedné zprávy 24 bytů. Z hlediska komunikace je koncové zařízení omezeno na vysílání pouze po dobu 400 ms na jednom kanálu. Velkou výhodou je také možnost provozovat LongFi na zařízení primárně certifikovaných pro síť LoRa, které v tomto případě musejí obsahovat speciálně upravený LongFi firmware. (30) (32)

### **3.4.7 MIOTY**

MIOTY je komunikační širokopásmový protokol vytvořený za účelem pro aplikaci v masivních komerčních a industriálních sítích pro IoT. Samotným jádrem protokolu je patentovaná technologie Telegram splitting, která dovoluje sítím s touto technologií řešit problémy s rozsáhlou škálovatelností na vysoké úrovni a s tím spojené zvýšené riziko rušení mezi jednotlivými zařízeními. Klíčovým elementem je rozdělování jednotlivých zpráv do mnoha malých skupin (sub-pakety), které jsou posléze odesílány v různých časových intervalech a frekvencích, což dramaticky zmenšuje aktivní vysílací čas jednotlivých koncových zařízení a tím snižuje celkové zatížení sítě. Odesílání paketů v náhodných časových úsecích pomocí pseudonáhodné funkce následně přispívá k vytváření robustního zabezpečení sítě proti rušení z vnějšího prostředí. Tento přístup je důležitý zejména z důvodu využívání bezlicenčního ISM pásma, které je často využíváno

různými poskytovateli LPWAN, a tedy možnému výskytu mezi-kanálového rušení. Konkrétně využívá frekvence 868 MHz pro Evropu a 915 MHz pro Severní Ameriku. MIOTY dosahuje průměrné komunikační vzdálenosti až 15 kilometrů v otevřeném prostředí a asi 5 kilometrů v oblastech se zástavbou. Přenosová rychlost dosahuje až 2,4 kb/s s možností odesílat zprávu o maximální velikosti 245 bytů, přičemž běžně se používají zprávy o velikosti 10 až 192 bytů. Síť je navržena a testována na bezproblémové odesílání milionu zpráv za den z tisíců aktivních koncových zařízení. MIOTY je prvním protokolem, který získal novou certifikaci TS 103 357 (TS – UNB). Velkou konkurenční výhodou je získávání dat ze senzorů, které cestují rychlostí až 120 kilometrů za hodinu, což umožňuje řadu nových využití pro praxi. (20) (21) (39)

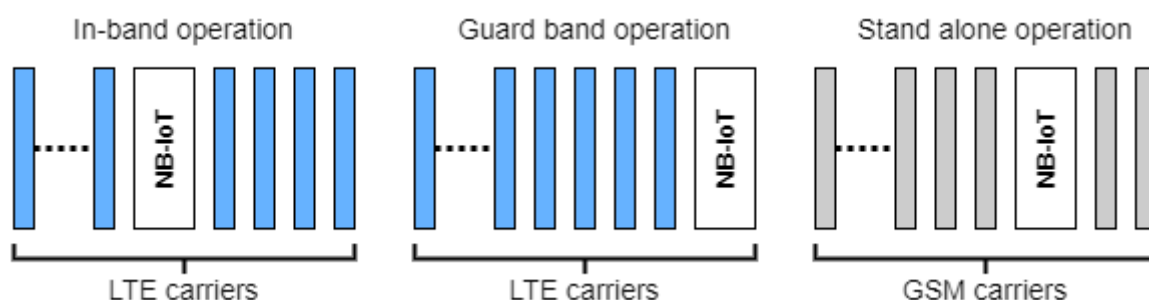
### **3.4.8 Hiber**

Hiber je specializovaná LPWAN technologie, která využívá částečně infrastruktury LoRa sítě a zaměřuje se na pokrývání globálních oblastí s obrovskou rozlohou a nepřístupných míst. I proto je Hiber v některých případech označován jako LPGAN technologie (low-power global area networks). Pro samotnou síť využívá senzory na bázi LoRaWAN, které shromažďují a odesílají jednotlivá data do připravených stanic, které mohou pokrývat oblasti o velikosti až 10 kilometrů. Data jsou následně několikrát za den odeslána nano satelitům, které se nacházejí na nízké oběžné dráze přibližně 600 kilometrů nad zemí. Využívání nano satelitů místo klasických satelitů umožňuje redukci nákladů na implementaci a provoz celého řešení. Přes satelity jsou data odeslána do cloudu, kde si je mohou uživatelé zobrazit a nadále s nimi pracovat. V současné době firma nabízí dva hlavní produkty. Prvním je Hiberband Direct, který dovoluje přímou komunikaci jednotlivých zařízení se satelitem bez nutnosti přijímacích stanic. Toto řešení je vhodné pro odlehle oblasti a nabízí jednosměrnou komunikaci s maximální počtem 4 zpráv za jeden den, přičemž jedna zpráva může být dlouhá až 144 bytů. V tomto případě se pro komunikaci využívá frekvence 400 MHz a díky přímé komunikaci se satelity tato služba nemá relativně žádný vzdálenostní limit. Druhým produktem, který společnost nabízí je Hiberband Via, pracující s již zmiňovanými zařízeními LoRa a vyžaduje tak pro přenos dat průchod přes přijímací stanice. Jedna stanice může přijímat data od 500 zařízení a dále je distribuovat do satelitní sítě. Opět je možno využívat pouze jednosměrnou komunikaci a není tak možné například aktualizovat již zavedené senzory o nový firmware bez

manuálního zásahu. Za den je možné odeslat z jednoho koncového zařízení maximálně 100 zpráv s tím, že velikost této zprávy je stejná jako v případě Hiberband Direct tedy 144 bytů. Vzdálenost je omezena dosahem jednotlivých stanic, který je, jak již bylo zmíněno maximálně 10 km v oblastech s minimálními překážkami či zástavbou. Zde je pro komunikaci využito frekvencí 433, 868 a 915 MHz. Důležité je podotknout, že snahou Hiber není konkurovat tradičním poskytovatelům IoT a LPWAN, ale dostat tuto technologii do oblastí, které jsou těžko přístupné, značně rozlehlé anebo oblastí, které nejsou na tak vysoké technologické úrovni, aby si vývoj těchto sítí mohly dovolit. Cílem společnosti Hiber je zejména monitorování rybářských lodí na moři, odlehlých území a přírodních rezervací, které pokrývají velká území. (22) (66)

### **3.4.9 NB-IoT**

Celým názvem Narrowband - Internet of Things je LPWAN technologie, která koexistuje v LTE a GSM mobilním licenčním pásmu. Standard je vyvinut společností 3GPP a specializuje se na pokrývání zejména vnitřních prostor objektů, dlouhou výdrž baterie, nízké náklady na provoz a vysokou hustotu připojení, která dosahuje hodnot až 100 000 koncových zařízení na jednom kilometru čtverečním. Samotný síťový protokol je založen na existujícím mobilním LTE protokolu, u kterého jsou záměrně omezeny funkcionality klasické telekomunikace, a naopak rozšiřovány a zlepšovány funkce související s IoT aplikací, zejména pak snižování spotřeby elektrické energie, dosah a prostupnost signálu. Protokol je dále zaměřen na optimalizaci zasílání malých dat v krátkých časových intervalech. Pro fungování tato technologie využívá v menším počtu případů GSM frekvence, ale v dnešní době je najdeme zejména v LTE pásmech. Finální síť umožňuje provoz ve třech operačních módech. Prvním je Stand alone operation, který využívá existující GSM pásma operátorů, dále Guard band operation, který využívá rezervní bloky v LTE frekvenčním prostoru mobilních poskytovatelů a v neposlední řadě In-band operation, který naopak využívá jednoho z existujících a aktivních bloků v LTE pásmu poskytovatele.



**Obrázek 6 - Operační módy NB-IoT (vlastní zpracování)**

NB – IoT využívá ve svých sítích QPSK modulaci (Quadrature Phase Shift Keying), což je technika fázového posunu, kde jsou dva informační bity modulovány společně v jednom okamžiku a je pro ně vybrán jeden ze čtyř možných nosičů stavů fázového posunu. Dále používá FDMA frekvenční dělení (Frequency-Division Multiple Access), které umožňuje několika uživatelům odesílat data prostřednictvím stejného komunikačního kanálu, pomocí rozdělení propustnosti pásma do nepřekrývajících se sub-kanálů a následného přidělení jednotlivým uživatelům. Samotná komunikace v síti má maximální datovou propustnost 159 kb/s pro uplink a 127 kb/s pro downlink, s tím že zpráva může být dlouhá až 200 bytů, ale nejčastěji je používáno 50 bytových zpráv, které bohatě pro účely LPWAN postačují. Přibližná doba výdrže bezdrátového koncového zařízení je 10 let při odeslání 200 bytové zprávy jednou denně. Komunikace má zpoždění 1,6 až 10 sekund a umožňuje pouze half duplex. Samotný vývoj tohoto standardu velice rychle pokračuje a v nejbližší době jsou očekávány aktualizace technických prvků, ale i rozšiřování o nové funkcionality a služby jako je například vzdálená aktualizace koncových zařízení a skupinová komunikace pomocí této sítě. (2) (11)

### **3.4.10 LTE – M**

Za technologií LTE – M (Long Term Evolution for Machines) stojí opět společnost 3GPP, je zaměřena hlavně na M2M komunikaci a aplikace v oblasti IoT. V porovnání s NB – IoT je standard LTE – M zaměřen na větší objemy datových přenosů, větší přenosovou rychlost a možnost využití hlasové komunikace, přičemž se jedná o jednu z mála sítí v prostředí LPWAN, která tuto funkci umožňuje. Vzhledem k provozu v existujících pásmech mobilní sítě využívají této technologie hlavně mobilní operátoři a dále ji pomáhají rozvíjet. V České republice je hlavní provozovatel společnost Vodafone.

Velkou výhodou této technologie je minimalizace potřeb budování nových infrastruktur, a to především díky možnosti využívání funkce již existujících sítí, jen s úpravou za pomoci softwarového updatu, možnost použití čipů, které jsou levnější díky half duplex přenosu s možností využívat i full duplex, kdy komunikace probíhá oboustranně v jednom časovém úseku. Možnost využití chytrého režimu spánku, kdy se koncová zařízení probouzejí pouze v určených časových intervalech, zajišťuje síťovým prvkům průměrnou výdrž 10 let při odeslání jedné zprávy denně. Přenosová rychlost se může vyšplhat až na 1 Mb/s, ovšem většina aplikací pracuje pouze s částí rychlosti kolem 100 kb/s a tím je celkové zatížení sítě sníženo. Hustota připojení je až 361 000 koncových zařízení na 1 kilometr čtvereční. Odeslané zprávy mohou dosahovat až velikosti 200 bytů a po síti se pohybují se zpožděním od 10 do 15 milisekund. V budoucnu je očekáváno značné rozšíření této technologie zejména mezi řadami mobilních operátorů, kteří díky ní mohou tvořit a nabízet vlastní IoT řešení. (34) (60)

#### **3.4.11 EC-GSM-IoT**

Ve zkrácené formě EC – GSM je širokopásmová technologie určená pro nasazení v prostředí internetu věcí, kterou stejně jako NB – IoT a LTE – M vyvíjí a spravuje společnost 3GPP. Za písmeny EC v názvu se ukrývá anglické sousloví Extended Coverage neboli rozšířené pokrytí, které indikuje zaměření tohoto standardu na pokrývání rozsáhlých oblastí signálem. Standard je postaven na upravené verzi protokolu eGPRS pro LPWA provoz, která umožňuje vysokou kapacitu, dlouhý dosah signálu a obecně nesložitého systém komunikační sítě s nízkou spotřebou pro různorodá použití v oblasti internetu věcí. První komerční nasazení sítě s tímto standardem proběhlo v roce 2017 a díky podpoře všech hlavních výrobců mobilního hardwaru budou EC – GSM sítě koexistovat se síťovými technologiemi jako je 2G, 3G, 4G či 5G. Výstavba, nad již existujícími technologiemi umožňuje sítím využívat zavedené systémy zabezpečení jako je podpora pro autentizaci jednotlivých entit, důvěrnost identifikace uživatelů, datová integrita a samotná identifikace jednotlivých zařízení. Zprovoznění technologie může být provedeno pouhou softwarovou aktualizací, což značně snižuje náklady na provoz. Komunikace je prováděna pouze v half duplex módu s FDMA modulací signálu a v jednu chvíli je možné připojení až 50 000 koncových zařízení pro jednu přijímací stanici. Přenosová rychlost se nachází mezi hodnotami 70 kb/s a 240 kb/s pro uplink i downlink s délkou zprávy nepřesahující 200 bytů. Komunikační



zpoždění je obvykle od 700 milisekund do 2 sekund. Obecně EC – GSM se zaměřuje zejména na industriální aplikace s nízkou hladinou primárních investic. (23) (26)

### **3.5 Využití širokopásmových sítí s nízkou spotřebou**

Obrovská rychlost vývoje bezdrátových technologií, snaha získávat o procesech co možná nejvíce dat a vzrůstající tlak na snižování spotřeby elektrické energie, způsobil postupné rozšíření technologií internetu věcí a samotných LPWA sítí do mnoha sektorů a odvětví. V současném stavu se s tímto fenoménem lidé setkávají skoro na každém kroku všedního života a je možné říct, že je již běžnou součástí denních procesů. Použití těchto technologií se dá rozdělit do dvou základních skupin komerční a nekomerční sféry. Co se týká komerčního využití hlavní oblastí je průmysl, následovaný obory jako je zemědělství, zdravotnictví, energetika nebo logistika. V průmyslu internet věcí napomáhá k automatizaci jednotlivých úkonů, lepší kontrole procesů a snižování vstupních nákladů při výrobě. V poslední době se objevují dokonce chytré průmyslové komplexy, které minimalizují nutnost lidského zásahu do celého procesu, čímž se snaží snížit riziko nehody, které je s tímto spojeno. Značné rozšíření je možné sledovat i v konceptu chytrých měst, které mají za cíl zlepšit životní úroveň občanů města a zjednodušit jim každodenní činnosti, zkvalitnit a zautomatizovat i procesy, jako je energetika, řízení dopravy, odvoz odpadu nebo úklid a údržbu městských částí. (78)

Co se týká nekomerčního neboli spotřebitelského sektoru je základní myšlenka stejná v podobě usnadnění a zkvalitnění nějaké činnosti, popřípadě přidání na hodnotě produktu ve smyslu nových funkcí a nových možností využití. Jedná se o chytré domy, zabezpečovací systémy, chytrou spotřební elektroniku a v poslední době hlavně nositelná zařízení pro sledování osobních informací, jako je srdeční tep, tlak nebo údaje o počtu kroků. I přesto, že se může zdát, že nekomerční a komerční sektor jsou na první pohled zcela oddělené oblasti, internet věcí a s ním spojené technologie mají za cíl oba sektory ještě více spojit a v globálním pohledu tak vytvořit fungující celek všech oblastí, který má pomáhat snižovat náklady a usnadňovat veškeré procesy.

S využitím LPWAN technologií vyvstává otázka obrovského množství sběru dat (Big Data) a jejich následného využívání, které je navíc exponenciálně rostoucí. Pro představu jednoduchá síť opatřena deseti senzory sledující teplotu, vlhkost, tlak, hladinu zvuku a kvalitu ovzduší, tak shromažďuje data o pěti veličinách. Jednotlivé snímání může

být nastaveno například v pětiminutových intervalech, což znamená, že za jednu hodinu systém získá 60 unikátních hodnot, při celodenním provozu 1440 hodnot. Tyto data musí být někde uložena, následně je prováděna jejich analýza a vyhodnocování získaných informací. Důležité je také zmínit, že v praxi byly technologie internetu věcí úspěšně použity s mezinárodně uznávaným a rozšířeným standardem pro řízení a správu IT služeb nazývaný ITIL (Information Technology Infrastructure Library). LPWAN je využíváno zejména v senzorických sítích a monitoringu potřebných prvků. (10)

## **Průmysl**

V odvětví průmyslu ve spojení s širokopásmovými sítěmi je často zmiňována takzvaná čtvrtá průmyslová revoluce, která je definována jako komunikace M2M, tedy veškeré stroje a objekty jsou připojeny do sítě, mohou navzájem komunikovat a vytvářet tak funkční celky, které mohou samostatně fungovat a reagovat na vyvstalé situace. Často je v různých kontextech zmiňována právě fráze průmysl 4.0, ale v reálném nasazení se o jeho plném zavedení v mnoha případech spíše firmy pokoušejí a teprve ho testují. Ukazuje se, že úplná robotizace a automatizace výrobních linek je finančně nákladný proces a v současné době je stále ekonomičtější využití lidské pracovní síly. V případě průmyslu je IoT někdy označováno zkráceně jako IIoT (Industrial Internet of Things) neboli průmyslový internet věcí. V jednotlivých procesech dochází k velké agregaci dat, která je potřeba sledovat. V ideálním případě je ve společnosti LPWA síť schopna sledovat a propojovat všechny části výroby od statických senzorů po zaměstnance. Sledování polohy zaměstnanců nemusí sloužit jen k hlídání jejich pracovní činnosti, ale zejména umožňuje vytvoření bezpečnostních opatření. Monitorování nebezpečných prostor je ideálním místem pro využití chytrých senzorů, které jsou schopny funkce v tomto prostředí bez nutnosti zásahu člověka a značně tak eliminují riziko případné nehody. (65)

Nejčastější využití v průmyslovém nasazení se týká monitorování vedení plynů a kapalin, monitorování hladin nádrží nebo skladovacích sil, předpovědi údržby jednotlivých objektů a monitorování pracovního prostředí. V případě sledování vedení různých médií jde o strategické umístění senzorů pro zachycení případné havárie, což umožňuje rychlejší reakci společnosti a snižuje riziko, které může zasáhnout například životní prostředí, ohrozit lidské životy a zároveň předchází finančním ztrátám. V praxi se jedná o senzory, které zachytávají vibrace, tlak, proud nebo zaznamenávají zvuky

z akustických čidel. Díky sledování je možné provádět plánování v reálném čase, detailní telemetrii a vedení záznamů o jednotlivých strojích, nástrojích, materiálech a produktech. Sběr těchto dat umožňuje předcházet nedostatečné, pomalé nebo naopak příliš časté údržbě, která vede k vyšším finančním nákladům.

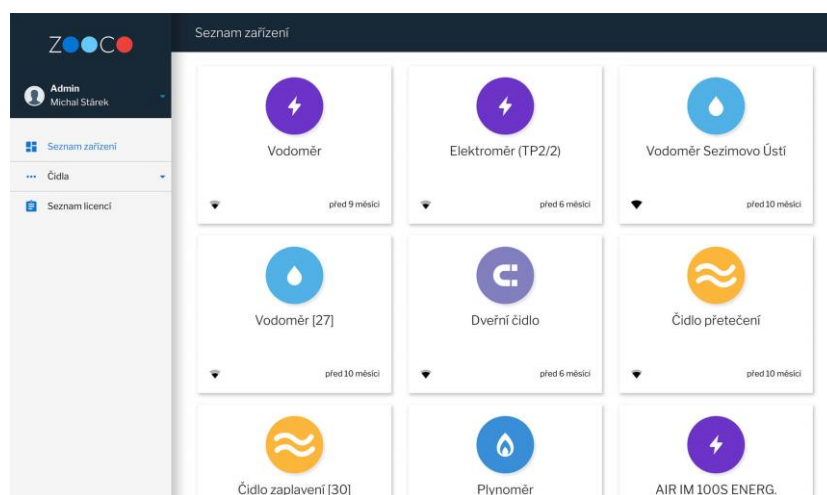
Monitorování výrobního prostředí je důležité specificky v chemickém, medicinském a potravinářském průmyslu, kdy jednotlivé produkty a výrobky vykazují jiné vlastnosti v různých prostředích. V těchto případech jsou hlavní sledované veličiny teplota a vlhkost, které mohou mít zásadní vliv na prostředí, kde se produkty nacházejí. Dále se monitoruje hladina prachu v ovzduší, hladiny různých plynů, intenzita světla, a to nejen z výrobních důvodů, ale i z důvodů bezpečnostních. Vytvořené sítě opatřené senzory v takovýchto prostředích sbírají jednotlivá data o již zmíněných veličinách, poté jsou analyzována, vyhodnocována a pomocí získaných informací jsou ovládány příslušné systémy vytápění, ventilace vzduchu, popřípadě chlazení. Právě použití hardwarových a softwarových prvků internetu věci umožňuje neustálé a efektivní udržování přesných hodnot, které jsou v jednotlivých použití zapotřebí, což vede k vysoké míře efektivnosti. (15)

## **Energetika**

Energetiku lze považovat za oblast blízce související a zároveň rozšiřující samotný průmysl. Jedná se o velice zásadní a otevřenou oblast zejména vzhledem k LPWAN, které se v poslední době v této oblasti značně rozšiřují. Za posledních pár let velké energetické společnosti začali přecházet na plošné vzdálené měření odběru elektřiny, vody nebo plynu a zpřístupnili další funkce, které tato technologie umožnila. Prováděná telemetrie umožňuje šetřit náklady, které byly spojeny s pravidelnou fyzickou kontrolou odpočtu u zákazníka, přináší přesnější data a informace o jednotlivých odběrech a eliminuje riziko chyb pomocí strojového zápisu. Některé společnosti dokonce začali nabízet přístup k těmto nasbíraným údajům přes webové prostředí. Přínosem je možnost sledování dat z historického hlediska, a to v různých časových jednotkách jako jsou jednotlivé roky, měsíce, dny, hodiny nebo dokonce minutové úseky. Pro poskytovatele to přináší možnosti nejen informativního rozměru, ale umožňuje i analýzy a optimalizace samotné distribuce podle zjištěných informací, které vytvářejí různorodé modely spotřeby. (9) (85)

Vzhledem k tomu, že tato čidla slouží převážně pro interní použití jednotlivých poskytovatelů a odběratelů nemají k detailním údajům přístup, objevila se možnost pro

společnosti třetích stran vytvořit senzory mířené právě na odběratele. Jednou z takových společností je ZOOCO, která se věnuje vývoji a distribuci senzorů pro snímání veličin spojených s elektřinou, vodou, teplotou a kvalitou ovzduší. Tyto senzory využívají technologie Sigfox a NB-IoT s možností přístupu do webové aplikace, která poskytuje snadnou správu získaných dat.



Obrázek 7 - Webové prostředí ZOOCO (83)

## Automobilový průmysl

Automobilový průmysl je jedním z největších průmyslových odvětví. Ročně vyrábí přibližně 70 milionů jednotek produktu a v roce 2017 činil obrat automobilového průmyslu 3 biliony amerických dolarů. V současné době se ovšem v tomto oboru projevuje jistá stagnace, která je způsobena nejen nedostatkem zásadních technologických inovací, ale také zahlcením samotného trhu v podobě obrovského množství značek a modelů. Tuto stagnaci začal narušovat až v posledních letech vzrůstající zájem o elektrické automobily. Samotný internet věcí se netýká jen výrobních procesů, ale i funkcí samotného vozidla. V případě výroby je stejně jako v průmyslové výrobě cíleno na zlepšování efektivity, zrychlování jednotlivých úkonů a snižování nákladů bez dopadu na finální funkčnost. Automatizace výrobního procesu funguje již řadu let, ale až v poslední době jsou vytvářeny výrobní komplexi, které obsahují linky připojené do sítí, vytvářející multifunkční celky.

Jedním z průkopníků v této oblasti se stala společnost Tesla Motors, která vyrábí elektrická auta stejnojmenné značky a její snahou bylo vytvoření zcela autonomního

výrobního komplexu, kde veškeré úkony obstarávají stroje. Jak se však ukázalo tento úkol je velice náročný z hlediska finančních nákladů. Po nezdaru s tímto plánem se společnost rozhodla ustoupit od vytvoření plně autonomní linky a vrátila se k využívání lidských zdrojů, alespoň v těch procesech, u kterých je to z finančních a technických důvodů nutné. Nejnovějším způsobem v této oblasti je využití senzorů a LPWA sítí pro komunikaci mezi samotnými vozidly, popřípadě vozidla a centrální stanice. Jedná se například o snímání stavu vozidla, správu vozového parku, sledování výkonu, spotřeby, najetých kilometrů, monitorování vývoje dopravy v časových intervalech, sledování časové osy jízdy a komunikace mezi autonomními vozidly. Většina takto získaných dat je zpracovávána automaticky příslušnými systémy a prezentována přehledně v softwarových prostředích určených příslušným pracovníkům dané společnosti, a to nejen pro kontrolu, ale i možnosti případné optimalizace. (4)

Zmiňovanou komunikaci mezi jednotlivými prvky automobilového průmyslu můžeme rozdělit do čtyř skupin. První skupinou je komunikace mezi dvěma vozidly (V2V), které umožňuje sdílení dat mezi automobily například o relativní pozici mezi sebou, rychlosti nebo plánovaném směru jízdy. Tato komunikace se týká především automobilů, které využívají některé z autonomních funkcí jako je udržování vozu v jízdním pruhu, automatická změna jízdního pruhu nebo autonomní parkování. Druhou skupinou je komunikace vozidla spolu se silniční infrastrukturou (V2I) jako jsou semaforey, výstražné tabule, hlášení nehod či další silniční značení. Třetí skupina poté představuje komunikační spojení mezi vozidlem a chodcem (V2P), které je na straně chodce zprostředkováno prostřednictvím mobilní aplikace. Tato komunikace je využívána zejména pro sledování polohy vozidel taxi služby nebo podobných služeb a umožňuje zobrazování přibližného času příjezdu, popřípadě frekvence dopravy. V některých městech je ve zkušebním provozu řízení systémů přechodů pro chodce pomocí této funkce. Poslední čtvrtou skupinu představuje spojení mezi vozidlem a sítí (V2N) nebo přesněji systém inteligentní přepravy, určený pro poskytování důležitých informací řidičům, popřípadě autonomním vozidlům od různých institucí jako je stav dopravy, vývoj počasí a obecně varování před nebezpečím na vozovce. Do této skupiny spadají velice známé aplikace, které umožňují rozšíření základních funkcí systému automobilu jako je Android auto od společnosti Google nebo CarPlay od společnosti Apple. Velkou výhodou automobilů, které jsou sledovány pomocí senzorů je možnost včasného informování uživatele o potřebě

servisního zásahu nebo nutné výměně určitého dílu, což značně zvyšuje bezpečnost provozu a snižuje náklady. (64)

## **Zemědělství**

Zemědělství je dalším z odvětví, kde jsou technologie spojené s IoT značně na vzestupu. Chytré pěstování plodin a chov zvířat je efektivním způsobem, jak přistupovat k zemědělství a do budoucna velice důležitý krok, který vzhledem k nárůstu potřebného množství potravy, bude jedním ze zásadních. Využití LPWAN technologií je opět směřováno hlavně na snižování nákladů a zjednodušování procesů spojených s touto oblastí, a to zejména snížení potřebného prostoru pro výrobu a omezení lidského faktoru. Důležité je zefektivnění a optimalizace spotřeby a využití vody. Chytré systémy na bázi internetu věcí se snaží zlepšit veškeré procesy pomocí monitorování užitečných ploch, které je zprostředkováno jednotlivými senzory a jejich propojení v jednotnou síť.

Zavedení chytrého zemědělství spočívá v pěti hlavních kategoriích, které poté přinášejí zásadní benefity ať už v jednotlivých úsecích nebo na globální úrovni. Jde o sledování klimatických podmínek, využití technologií k přesnému farmaření, využití pěstování v chytrých sklenících, podrobnou analýzu nasbíraných dat a použití chytré strojové techniky pro zefektivnění jednotlivých procesů. Podnebí hraje kritickou roli v zemědělství, a proto sledování jeho stavu a vývoje je jedním z nejdůležitějších procesů. Získávání aktuálních a přesných informací týkajících se právě podnebí je klíčem ke kvalitním plodinám a úspěšnému pěstování ve velkém množství. Senzory jsou využívány přímo na polích nebo v příslušných objektech a sbírají jednotlivé hodnoty o vývoji teploty, vlhkosti, množství srážek, síle větru a mnoho dalších. V případech, kdy systém obdrží hodnoty vyvíkající se normálu může zaslat hlášení, díky kterému je možná rychlá reakce a odpadá nutnost fyzických kontrol na příslušných plochách, která snižuje náklady a umožňuje využití pracovních sil u jiných procesů. Dalším bodem je využití dostupných technologií pro cílené a přesné pěstování, kdy jednotlivé technologie umožňují pomocí získaných informací optimalizovat jednotlivé procesy jako je setí, závlaha, sklizeň a provádět je s velikou přesností. Stejně využití se dá aplikovat i na sledování farmářských zvířat a zemědělských strojů. V posledních letech zejména z důvodu změny klimatických podmínek dochází ke ztrátě ploch pro pěstování určitých plodin v dříve běžně využívaných oblastech. Proto vzniká velké množství projektů zaměřujících se na pěstování plodin

v chytrých sklenících. Funkcionalita takovýchto skleníků je zajištěna pomocí meteorologické stanice snímající nejen vnitřní, ale také vnější hodnoty a ovládající příslušné systémy, které zajišťují úpravu potřebných veličin. Se snahou co možná největší úspory vody, vznikla podkategorie těchto chytrých skleníků, která se věnuje pěstování rostlin hydroponicky. Rostliny jsou pěstovány v uzavřeném systému bez půdy a živiny jsou jim dodávány v podobě roztoku, který je přesně dávkován a obsahuje všechny potřebné nutriční látky. Základní myšlenkou je možnost pěstování většího množství rostlin na menším prostoru díky vícepatrovému designu, lehčí údržba a značná úspora vody. Všechny procesy tohoto systému jsou umožněny pouze díky důkladné analýze velkého množství dat. V mnoha případech tradiční databázové systémy nestačí a je nutné využití cloudových úložišť a end-to-end IoT platform. Potřeba analýzy dat vede nejen k vylepšování podmínek, ale zároveň pohání celý technologický vývoj této oblasti. Na toto téma navazují prognostické metody, které umožňují získání informací o budoucím vývoji jednotlivých parametrů.

V oblasti zemědělské techniky dochází k revoluci v podobě technických pokroků souvisejících s internetem věcí. Jedná se zejména o využívání autonomních zemědělských vozidel a dronů umožňujících kontrolu rozsáhlých oblastí ve zkrácené době. Právě drony přináší velké časové úspory při správě a údržbě zemědělských ploch, která byla vždy časově náročná. Takovéto drony je možné vybavit různou škálou senzorů od jednoduchých kamer, teplotních a vlhkostních čidel až po termální či multispektrální senzory, které jsou například schopny detekovat místa, která potřebují závlahu nebo hnojivo. Využívání těchto technologií přináší přesnější dávkování nejen vody, ale i chemikálií. Revoluční technikou jsou autonomní nebo polo autonomní traktory a jiná zemědělská technika. Ty mohou pracovat na určených plochách bez lidské pomoci a umožňují tak zpřesnění a zefektivnění jednotlivých úkonů, které vede k úspoře nákladů a času. Tyto vozidla využívají řadu technologií jako je LiDAR (Light Detection And Ranging), GPS, senzory pro snímání povrchů nebo čidla pro sledování vlastností půdy. (1) (40)

## **Logistika**

Jedním z oborů moderní doby, který ve velkém zavádí technologie LPWAN je logistika. Hlavním důvodem je obrovská závislost na čase a optimalizaci jednotlivých úkonů. V dnešní době si skoro každý zvykl na doručení objednaného zboží do druhého dne

nebo ještě lépe v ten stejný den. Tento tlak nutí logistiku k zavádění a využívání moderních technologií, které přispívají k časové úspoře. Jedná se zejména o sledování vozidel, jednotlivých zásilek, ale také automatizaci a monitorování skladovacích prostor. Samotné systémy pro správu polohy pomáhají s monitorováním aktivit řidiče, polohy vozidla a stavu jednotlivých zásilek. Výhodou je rychlé získávání informací, které dovoluje odpovídající reakce nejen ze strany zaměstnanců, ale také zákazníků. Další důležitou součástí logistického řetězce jsou procesy týkající se zejména skladování. V tomto případě relativně levné senzory umožňují správu skladů s poměrně nízkou počáteční investicí, přinášejí lepší organizaci ve skladech a zkrácení času potřebného pro naskladnění nebo expedici. Při použití technologií LPWAN je docíleno větší efektivity, bezpečnějšího skladování a předcházení možných problémů týkajících se hlavně chyb tvořených lidským faktorem. Stejně jako v mnoha dalších oborech i v logistice je značně důležitá prediktivní analytika umožněna využitím různorodých senzorů zajišťujících sběr dat, nad kterými je posléze provedena analýza a její výsledky jsou využity pro budoucí rozhodování a optimalizaci jednotlivých kroků logistického řetězce. V dnešní době se jednotlivé společnosti snaží dosáhnout třech hlavních dispozic vzhledem k přepravovanému zboží. Zabezpečení zásilek v procesu přepravy, transparentnost v celém výrobním procesu a možnosti sledování zásilky v celém časovém intervalu. K naplnění těchto hledisek je často využíváno použitím širokopásmových sítí a radiofrekvenčních identifikátorů, které jsou s produktem spjaty od začátku výrobního procesu. Data o tomto produktu jsou ukládána do blockchainu a každý produkt má svoje vlastní ID, díky kterému si lze o produktu zjišťovat kompletní informace v jednotlivých fázích počínaje výrobou a konče doručením. Značné očekávání má logistika od autonomních vozidel a dronů, které mohou doručovat zásilky bez nutnosti přestávek, a navíc s velkou efektivitou. Tyto způsoby doručování jsou ovšem v současné době v ranném vývoji a použití v praxi je ještě značně daleko. (5) (50)

## **Zdravotnictví**

Nízkoenergetické sítě přinášejí do zdravotnictví nový impuls v podobě nositelných zařízení určených pro lékařské účely. Jedná se hlavně o zařízení monitorující stav pacienta, chytrá zařízení pro automatické dávkování léků, či komplexní systémy pro prevenci onemocnění. V některých případech se jedná o zařízení, která mohou zásadně změnit



každodenní život pacientů. Do zdravotnické kategorie spadají i nositelné náramky a hodinky, které jsou schopny lidem měřit srdeční tep, tlak nebo každodenní fyzické zatížení. Problém je však v rozmanitosti použitých senzorů a technologií, kdy lékaři bojují za prosazení standardizace, která by umožnila větší důvěryhodnost a možnost kompletního zavedení dat z těchto zařízení do lékařské sféry. Navíc takováto data v případě jejich správnosti mohou sloužit nejen k diagnostice jednoho pacienta, ale mohou pomáhat v prevenci, včasné diagnostice rizikových skupin, potenciálnímu výzkumu a následně lepšímu pochopení jednotlivých symptomů. Technologie internetu věci dále umožňují tvorbu zařízení pomáhajícím pacientům z dlouhodobými nemocemi, jako je například diabetes. V takovém případě zařízení monitoruje hladinu cukru pacienta a automaticky ho upozorňuje v kritických momentech. Samotná možnost vzdáleného sledování potenciálních nebo již diagnostikovaných pacientů je velice atraktivní a může napomáhat v mnoha případech. Velikou výhodou použití těchto technologií je snížení nákladů na vývoj jednotlivých zařízení, prevence, lepší výsledky léčby a přesnější diagnostiku. Naopak neustálé monitorování vede k snížení úrovně soukromí nebo dokonce možnosti napadení zařízení v podobě kybernetického útoku a následné problémy s tím spojené. V některých případech může dojít k chybě na zařízení, což může vést při nedbalé kontrole k chybné léčbě. (68) (86)

### **Chytrá města**

Vznik chytrých měst je výsledkem velkého rozvoje technologií a vzrůstající urbanizace, která sebou přináší velké rozdíly v úrovni bydlení a života ve městech pro jednotlivé obyvatele. Samotný koncept představuje město nebo městskou část, která využívá různorodé technologie internetu věci pro sběr dat a následného řízení jednotlivých činností spojených s chodem takového celku. Opět je zde tlak na efektivnost, snižování nákladů jednotlivých procesů a snahu o zlepšení kvality života tamních obyvatel. Do oblasti chytrých měst spadá automatické řízení dopravních systémů, řízení značení, chytré sportovní haly, autonomní hromadná doprava, chytré parkovací plochy a obchodní domy, ale i chytré technické zázemí města jako jsou vodní čističky, sběrné dvory, veřejné osvětlení, vedení a kanalizace. V ideálním případě je takové město samostatným ekosystémem, který je řízen, spravován, udržován a schopen existence bez nutnosti zásahu z okolí. Vybudování takto fungujícího chytrého města je ovšem velice náročné a na světě

takových příkladů není mnoho. Příkladem může být město poblíž Dubaje s názvem The Sustainable City, které funguje jako pilotní projekt a v současné době zde žije přibližně 2 700 obyvatel s tím, že město nepotřebuje žádný zásah z okolního prostředí. Město je schopné produkovat vlastní energii, jídlo a dokáže chytře využívat systém recyklace vody. Právě v takových to využití je důležité získávání přesných a včasných dat, které jsou analyzovány a získané informace využity pro úpravu jednotlivých procesů podle vývoje různých faktorů. LPWAN technologie jsou využívány hlavně pro sítě základních senzorů sledujících teplotu, vlhkost, sílu či směr větru a díky těmto informacím jsou jednotlivé systémy jako vytápění, klimatizace, ventilace, závlahové systémy nebo pole solárních panelů schopny reagovat na jakoukoliv zásadní změnu. (27) (59) (88)

### **Chytré domácnosti**

Z anglického „smart homes“ neboli chytré domy jsou stavby opatřené technologiemi internetu věcí, které mají za cíl zjednodušení a zautomatizování základních činností v domech, bytech či jiných objektech. Chytrá část je poté řešena v podobě spotřebičů připojených do sítě, různorodých senzorů pro snímání teploty, vlhkosti, světla nebo pohybu a upravených komponent, které jsou schopny reagovat na různé druhy pokynů a dle nich upravit svoje vlastnosti. Jedná se zejména o chytré spotřebiče, nábytek, světla, vypínače, časovače, termostaty a zabezpečovací systémy. V poslední době se chytré domy zaměřují zejména na úspory ve spotřebě energie, což znamená využití chytrých termostatů, které jsou schopné rozpoznat a naučit se zvyky svého uživatele a podle těchto informací řídit systém vytápění a cirkulace vzduchu. Dále se jedná o systémy obsahující automatické ovládání oken nebo žaluzií dle aktuálního počasí. Velkou popularitu také zaznamenali hlasoví asistenti jako je Google Home, Amazon Alexa nebo Apple Siri, které se čím dál tím častěji objevují jako hlavní část systému chytrých domů a umožňují uživateli ovládat jednotlivá zařízení pomocí hlasových pokynů. Nevýhodou chytrých domácností je stále pořizovací cena i přes značný nárůst popularity a postupnému vývoji levnějších a přístupnějších zařízení. Nárůst popularity můžeme vidět i v podobě velkého zájmu světových lídrů v technologiích jako je Google, Samsung, Amazon, Apple nebo TP-Link. Další nevýhodou, která nemusí být na první pohled znatelná je obrovská rozmanitost jednotlivých zařízení od různých výrobců, protože posléze dochází k nekompatibilitě jednotlivých prvků systému mezi sebou a tím problémům s ovládáním. Problém

nekompatibility se snaží řešit hlavně společnosti, které nabízejí komplexní řešení pro všechny různé kombinace ovládání a automatizace. V české republice je nejznámější společností Loxone, která funguje již od roku 2009, spolupracuje s více jak deseti tisíci partnery po celém světě. Další společnosti, které stojí za zmínku v této oblasti jsou Jablotron, Paradox, ABB nebo Fibaro. Technologie chytrých domácností se v poslední době navíc začali rozšiřovat například i na zahradní plochy, kde se jedná o automatickou závlahu a autonomní sečení trávy. Chytré domácnosti jsou komplexní systémy, které využívají velké množství rozdílných technologií pro širokou škálu specifických požadavků. (33) (35) (52)

### **3.6 Bezpečnost LPWAN**

Vzhledem k masivnímu rozšiřování internetu věcí a s tím spojené častější užívání technologií LPWAN přichází na jednotlivé aplikace obrovský tlak v podobě zvětšujícího se rizika bezpečnosti. Je možné říci, že čím více sítí se rozšiřuje v praxi, tím je větší šance útoku na takovouto síť. Riziko napadení stoupá společně s vytvářením obrovské datové základny, kdy velká většina uživatelů v současné době bezpečnost značně přehlíží a neuvědomují si riziko v podobě zařízení neustále připojených do internetové sítě. Je nutné si připomenout, že celý systém je vždy tak dobrý jako je jeho nejhorší nebo nejslabší prvek, a to platí dvojnásob v zabezpečení komunikace. V základu lze rozdělit zabezpečení na tři hlavní skupiny. Bezpečnost na straně serveru neboli na straně poskytovatele služby, bezpečnost samotného koncového zařízení, a to jak po softwarové, tak hardwarové stránce a v neposlední řadě bezpečnost celé síťové infrastruktury, která je využívána k přenosu jednotlivých dat.

V případě serverového zabezpečení je využíváno jak softwarových aplikací pro celou řadu úkonů, tak i fyzického zabezpečení v podobě ochrany před manipulací s příslušnými servery a získání případných dat touto formou. Nesmí chybět ani redundance dat pro případ živelných pohrom. Nemalou částí je dále provádění správného pracovního procesu s osobními daty uživatele a s tím spojené dodržování stanovených zákonů a nařízení týkajících se tohoto subjektu. Zabezpečení koncových zařízení je značně komplexní proces, který opět zasahuje do více úrovní a týká se nejenom správného zacházení ze strany uživatele zařízení, ale zároveň výrobního procesu, a tedy strany poskytovatele.

Je jasné, že zařízení může používat špičkové a moderní zabezpečovací standardy, ale uživatel bude například zařízení používat se slabými hesly nebo nebude dbát na základní pravidla používání a v takovém případě bude zařízení ohroženo skoro na stejné úrovni jako kdyby žádné z pokročilých standardů nepoužívalo. Samozřejmě tato zásada platí i obráceně, kdy uživatel může být velice pečlivý a používat vše správně, ale poskytnuté zařízení bude špatně navrženo nebo s bezpečnostními chybami, je bezpečnostní riziko stejně vysoké. Pro síťovou infrastrukturu platí stejné zásady a je nutné nejen dobře tyto infrastruktury navrhovat, ale zároveň je správně využívat, proto aby bylo docíleno co možná nejlepšího zabezpečení.

Základním prvkem zabezpečení je autentifikace uživatele následována šifrováním přenášených dat společně s nutným dešifrováním na straně příjemce. Jedná se o funkce, které napomáhají udržování ochrany osobních dat a informací. S tím také souvisí etické a morální problémy spojené s přenosem dat. Je důležité, aby výrobci specifikovali data, která jsou nutná přenášet pro zachování funkčnosti s důrazem na zvýšené bezpečnostní riziko, data, která slouží pro zlepšení a rozvoj aplikace a data nepotřebná. S tímto problémem vyvstává také otázka, čeho se musí samotný uživatel vzdát po stránce soukromí, aby obdržel větší komfort nebo mu byly usnadněny nějaké základní procesy denního života. Jak je možné vidět, data jsou v technologickém světě všudypřítomná a většina komplexních systémů se bez aktuálních a přesných dat vytvářejících informace vůbec neobejde. Jedná se zejména o společnosti pracující v reklamním prostředí jako je Google, Facebook nebo Amazon, u kterých jsou data základním kamenem jejich podnikání. I proto jsou v dnešní době data považována za velice lukrativní komoditu, kdy se zvyšováním jejich přesnosti a správnosti roste i ochota o jejich získání včetně hodnoty, kterou jsou dané subjekty ochotny zaplatit. Právě kvalitní a správná data pomáhají firmám tvořit konkurenční výhody na již velice náročném a nevlídném trhu. U všech síťových prvků je nutné využívat aktuálních a silných standardů a technologií, tento fakt je však značně ovlivněn standardy a technologiemi vyskytujícími se v současných aplikačních užití a firmy jsou ochotny používat kompatibilní řešení na úkor zabezpečení.

Dle Jasona Andressona existují tři základní pilíře bezpečnosti. Důvěrnost (confidentiality) představující utajení zpráv před cizími neoprávněnými osobami. Integrita (integrity), která zaručuje neměnnost přenášených dat, a tedy jejich správnost. Dostupnost (availability) starající se o dostupnost dat v určitém čase. V novějších zdrojích se často

přidává ještě zmiňovaná autentizace zajišťující ověření zdroje či původce a takzvané nezamítnutí, kdy nelze zamítnou již provedenou akci, která byla označena jako platná. (3)

Evropská agentura pro kybernetickou bezpečnost ve své studii říká, že samotné rozšiřování internetu věcí a jeho technologií nabízí potenciálním útočníkům rozmanité možnosti napadení a ty by měli být adresovány a následně odstraněny ještě před plným rozvinutím a globálním zavedením IoT. (25)

Hlavními faktory, které ovlivňují bezpečnost síťových infrastruktur a koncových zařízení jsou relativně krátký životní cyklus, následně značný tlak potenciálních zákazníků a vliv trhu na co možná nejnižší cenu samotných zařízení. A právě snaha snížení ceny přispívá k tomu, že výrobci používají horší levné nebo rovnou zastaralé komponenty, což má za následek zvýšení rizika zranitelnosti zejména mezi jednotlivými generacemi a rozhodně tomu nepomáhá ani nedostatečná podpora zařízení ze strany výrobce v podobě pomalých nebo chybějících softwarových aktualizací. Obecně se lze řídit tím, že při výrobě by se společnost měla snažit využívat příslušné standardy a dodržovat pravidla manipulace s daty uživatelů v rámci nařízení, ovšem jak se ukazuje v dnešní době se na toto pravidlo nelze spolehnout. (63)

Technologie pro zvyšování soukromí (Privacy Enhancing Technology – PET) umožňují uživatelům, kteří jsou zapojeni v různých procesech komunikace, kde probíhá jak odesílání, tak i přijímání zpráv, možnost ochránit sami sebe před možným sledováním jejich aktivit. PET se zaměřuje hlavně na aspekty důvěrnosti jako je anonymita odesílatele a příjemce, kdy je v procesu komunikace tato informace zakrývána, dále skrytí samotného procesu komunikace neboli nelze rozpoznat kdo komunikuje s kým a následně také zajištění nespojitosti jednotlivých akcí. Jako základním stavebním kamenem je šifrování, fiktivní komunikace (dummy traffic), kdy dochází k odesílání náhodných bitů do sítě v různých časových intervalech, aby bylo zakryto odeslání reálných šifrovaných zpráv. Třetím procesem je krok obecně nazývaný vysílání (Broadcasting), který zasílá šifrované zprávy všem uživatelům na dané síti a zakrývá tak identitu skutečného příjemce, který jako jediný může zprávu dešifrovat. S postupným tlakem na větší bezpečnost a zvyšování úrovně soukromí jsou přidávány další prvky této technologie pro zkvalitnění výsledku jako je například MIX, blind signature, credentials nebo DC network. I přes všechny tyto metody a procesy je velice důležité dodržování transparentnosti ve správě osobních dat a jak je s nimi nakládáno. Důraz je také kladen na využívání správných nástrojů

ve správných situacích. Nutné je, aby si sám uživatel uvědomoval, jaká data poskytuje a přistupoval k otázce zabezpečení seriózně i ze své strany. Obecně platí, že tlak na zabezpečení a technologie spojené s tímto tématem bude v budoucnu stále narůstat. (67)

Bezpečnost LPWAN prvků je hlavním znepokojujícím faktorem zejména při použití v oblastech jako je průmysl, zdravotnictví nebo logistika. Jedná se o to, že tyto obory disponují zaběhnutými systémy, které nejsou navrženy a připraveny pro fungování v komunikačních sítích s ohledem na jejich rozvoj. Proto je implementace těchto technologií velké bezpečnostní riziko. Navíc riziko úniku dat a informací je v těchto oblastech velice citlivé a může mít fatální následky. Jedná se o únik nějakého výrobního procesu, nového produktu nebo informací, které zajišťují tržní výhodu posléze v horším případě informací směřujících k možnosti pozdějšího vydírání nebo dokonce k ovlivnění zdravotního stavu příslušné osoby. Je tedy zásadní, aby jednotlivé IoT systémy garantovali důvěrnost, integritu dat a informací, soukromí a anonymitu uživatelů. Navíc je velice důležité zabezpečit důvěrnost dat z koncových zařízení a to specificky, vždy když zařízení operují v otevřených a nekontrolovaných prostředích.

V prostředí LPWAN lze rozdělit zabezpečení do dvou kategorií. Klasický přístup k zabezpečení a nově se objevující technologie a postupy zabezpečení IoT. Klasické přístupy jsou založeny na kryptografických procesech a snaží se řešit hlavní bezpečnostní problémy jako je důvěrnost, dostupnost a ochranu soukromí. Nevýhodou je, že spousta běžně užívaných kryptografických řešení je pro aplikaci v IoT nevhodná nebo neefektivní, kdy jsou tato řešení často založena na vysokém výpočetním výkonu a zabírají velké množství paměti zařízení. Proto se rozšiřuje snaha o vylepšení existujících řešení nebo vývoj nových. V klasickém přístupu jsou používány hlavně symetrické a asymetrické kryptografie. V případě symetrického šifrování jde o sdílení jednoho klíče pro šifrování a dešifrování, kdy je dosaženo poměrně efektivního výsledku s nižší úrovní zabezpečení. Nejčastěji využívané standardy v této oblasti jsou AES (Advance Encryption Standard), RC4 anebo 3DES. V případě asymetrického přístupu je šifrování zajištěno pomocí dvou klíčů, privátního a veřejného. Při tomto procesu jsou jednotliví uživatelé certifikováni a jsou jim uděleny příslušné klíče. V praxi můžeme najít například systémy RSA, DSA, El Gamal, NTRU, ECC a mnoho dalších. I přesto, že toto řešení má mnoho výhod jako je flexibilita, škálovatelnost a efektivní management šifrovacích klíčů, je tento proces velice energeticky náročný, a proto v mnoha případech pro IoT nepoužitelný. Dalším

řešením je použití šifrování založené na identitě (Identity Based Encryption), která je vhodná pro aplikace s vysokou úrovní škálovatelnosti. Tato technologie je postavena na unikátním řetězci, který identifikuje uživatele a odebírání tak nutnost certifikátů. Jinou možností je využití kryptografie založené na attributech (Attribute Based Encryption), která funguje na principu využití struktury přístupů definující vztahy mezi jednotlivými komunikujícími a nastavuje jejich atributy. V těchto systémech je uživateli vygenerován privátní klíč založený na zvolených attributech a veřejný klíč, který splňuje podmínky dané struktury. Tento proces může být řešen dvěma způsoby. Key Policy ABE (KP-ABE) nebo Cipher-text Policy ABE (CP-ABE). V současnosti je atributové šifrování považováno za slibné zejména v oblastech cloud computingu a M2M komunikace.

V oblasti řešení soukromí jsou používány často technologie pro zajištění anonymity, nespojitosti mezi komunikujícími a nemožnosti vysledování jednotlivých účastníků. K těmto krokům je využito například procesu zvaného data tagging, který využívá metadat pro identifikování a smysluplnost jednotlivých dat, která jsou přenášena. Bez příslušných metadat jsou jednotlivá data bezvýznamná. Jinou metodou je ZKP (Zero Knowledge Proof), mechanismus ujišťující soukromou identitu jednotlivých uživatelů. Celý proces je založen na dvou rolích dokazovatel (prover) a verifikátor (verifier), kdy dokazovatel demonstruje ověřovateli a zároveň se tak prokazuje, že drží nějaké určité informace, které dokazují jeho identitu.

Další technikou ochrany dat je například K-anonymity model, který jednotlivé záznamy dat ukládá do upravené tabulky neobsahující při prvním pohledu žádná citlivá data. Tento systém je využíván řadou provozovatelů IoT cloudových platform. Důležité je využívat řešení zajišťující dostupnost, která je pro IoT sítě značně důležitá. Pro tuto příležitost se v praxi používají takzvané systémy proti DoS/DDoS útokům. V tomto případě se jedná hlavně o metody spojené s monitoringem a hledáním IP adres (IP Traceback methods), které se zabývají zvýšením bezpečnosti internetových protokolů zejména pak TCP/IP. V posledních letech hraje důležitou roli v bezpečnosti IoT umělá inteligence, která pomáhá s včasnou detekcí problémových míst a v některých případech i s tvorbou řešení těchto problémů. Pro tento účel se ve značné míře využívají umělé neurální sítě, které sledují a analyzují provoz jednotlivých infrastruktur.

Se zvýšenou implementací sítí internetu věcí se začínají objevovat i nová řešení zabývající se bezpečností komunikace. Jedním z nich je Software Define Networking

(SDN), který se zaměřuje na kontrolu, konfiguraci nebo správu sítě, a to za pomoci vytvoření rozděleného kontrolního a datového plánu pro jednotlivé sítě. Další stále více populárním přístupem je vytváření takzvaných blockchainů (blockchain based solution). Tato efektivní technologie měla za následek zejména revoluci ve světě kryptoměn. Blockchain je tvořen zabezpečenou databází, která je decentralizovaně rozmístěna v jeho síti a obsahuje všechny provedené transakce všech účastníků. Využití blockchain řešení přináší tři hlavní výhody do oblasti IoT. Decentralizace, která je častou vlastností sítí internetu věcí, a proto je její využití ideálním řešením. Neidentifikovatelnost, kdy jsou jednotlivá zařízení identifikována pomocí veřejného klíče nebo jeho zašifrované varianty, které neukládají ani nepropojují žádné informace o identitě uživatel. Poslední výhodou je samotná bezpečnost jednotlivých transakcí v síti, kdy každá transakce předtím, než je odeslána do sítě musí být podepsána zařízením a musí být síť ověřena, tím je zajištěna nemožnost změny transakce, která je v danou chvíli již takto prezentována v síti. (44)

Internet věcí je komplexní systém, který pracuje v dynamickém prostředí a je podrobován různorodým variacím v reálném čase. Jednotlivá bezpečnostní řešení by měla být schopna adaptace do dynamického prostředí a rozlišovat v jakém kontextu je jaké řešení použito. Právě tento proces rozlišování hraje velkou roli ve výběru jednotlivých metod pro zabezpečení. Samotným kontextem mohou být informace o daném prostředí jako je poloha, předpokládaná sensitivita útoků, spolehlivost komponent včetně fyzické kondice zařízení jako je stav baterie, to vše hraje v bezpečnosti významnou roli. Nelze ani zapomenout na nutnost analytického přístupu, který pomáhá v rozhodnutí, díky již reálným hodnotám a možnost úprav a optimalizace řešení podle získaných výsledků. V individuálních nasazení LPWAN je důležité brát v úvahu poměr mezi spotřebou energie a úrovní zabezpečení. Musí být analyzováno jaká úroveň zabezpečení se ještě vyplatí v poměru kolik dané řešení konzumuje energie.

### **3.7 Arduino a komunikační rozhraní**

Arduino je open-source elektronická platforma založená na hardwarovém a softwarovém řešení, které cílí na snadné použití ve vývoji prototypových zařízení. Nejedná se o mikroprocesor, ani o mikrokontroler, ale o vývojovou desku, která ve většině případů nejčastěji obsahuje mikrokontroler v podobě 8bitového AVR jako je ATmega8,



ATmega168, ATmega328 nebo ATmega1280. Mikroprocesor představuje řídicí jednotku v počítačových systémech umožňující vykonávat potřebné výpočty a úlohy, ale nedokáže pracovat samostatně a je závislá na dalších komponentách, které procesoru zasílají data nebo mu pomáhají ve zpracování jednotlivých úkonů. Tím mohou být například registry, různé typy paměti nebo vstupní a výstupní zařízení. Samotný mikrokontroler je sice charakterizován jako vestavěný systém obsahující několik kritických částí v jednom čipu. Jednotlivé integrované části jsou mikroprocesor, paměťové jednotky, vstupně výstupní porty a další periferie jako jsou časovače, analogově digitální převodníky, či analogový kompilátor. Mikrokontrolery umožňují vývojovým týmům stavět prototypové funkční systémy v relativně krátkém čase, protože nemusejí vybírat jednotlivé základní komponenty a ověřovat jejich kompatibilitu. Ovšem ani mikrokontroler jako takový není schopen samostatného fungování a je nutné ho opatřit příslušným rozhraním pro načítání a flashování programů, či komunikačním rozhraním jako je například nějaký druh zobrazovacího zařízení. V takovém případě vývojová deska představuje velice vhodnou kombinaci mikroprocesoru nebo mikrokontroleru opatřeného všemi potřebnými komponenty a vstupními a výstupními porty. Právě Arduino je jednou z nejpoblárnějších vývojových desek využívaných nejen v profesionálním odvětví, ale i komunitách studentů, amatérských nadčenců, umělců a programátorů. Arduino desky jsou vyráběny v mnoha variantách a verzích, které mají různé úrovně schopností z hlediska výpočetních charakteristik. Tyto charakteristiky mohou být velikost paměti, rychlost procesoru nebo různá nabídka vstupních a výstupních připojení, které umožňují rychlejší testování a vývoj projektů. Samotné desky jsou schopny za pomoci příslušných knihoven spolupracovat se senzorickými moduly, které mohou představovat světelné senzory, teplotní a vlhkostní senzory nebo různé spínače či tlačítka. Tyto moduly umožňují Arduino čtení fyzikálních veličin z reálného světa a jejich převod do světa digitálního a fungují tedy jako vstupní zařízení. Na jednotlivé vstupy je Arduino schopno reagovat příslušnými softwarovými pokyny a následně díky nim ovládat některá výstupní zařízení představující například elektronická relé, servomotory, spínání LED nebo odesílání zpráv po sériové lince. Pro vytváření programové části lze využít příslušné Arduino IDE a jazyku Wiring, který je open-source programovací jazyk postavený nad jazykem C/C++. Mezi hlavní zástupce vývojových desek Arduino patří Arduino UNO, Arduino NANO a Arduino Micro. V průběhu roku 2019 byly jako reakce na růst popularity internetu věci vydány tři nové

verze v podobě Arduino NANO 33 IoT, 33 BLE a 33 BLE SENSE společně s cloudovou platformou Arduino IoT, která se nachází ve fázi beta verze. Tato nová zařízení přicházejí na trh z novými funkcemi cílícími právě na prostředí internetu věcí. Jedná se zejména o nové možnosti konektivity jako je Wi-Fi, Bluetooth a dále zabezpečení v podobě přidání ECC608A krypto čipu, který poskytuje základní zabezpečení v aplikacích IoT. (41) (80)

Vývojové desky Arduino poskytují veliké spektrum možností v podobě různorodých specifikací a vlastností. Každý model je vhodný pro jiné nasazení a účel vývoje, proto je důležité vybrat správnou verzi podle toho co je od ní očekáváno a jaké jsou na ni kladeny nároky v procesu vývoje a životního cyklu zařízení.

	Arduino UNO	Arduino Nano	Arduino Pro mini
<b>Typ mikroprocesoru</b>	Atmega 328P	Atmega 328P	Atmega 328P
<b>Frekvence procesoru</b>	16 MHz	16 MHz	16 / 8 MHz
<b>Operační napětí</b>	5 V	5 V	5 / 3,3 V
<b>Doporučený rozsah napájení</b>	7–12 V	7–12 V	5–12 V
<b>Analogové vstupní piny</b>	6	6	6
<b>Digitální I/O piny</b>	14 (6 PWM)	14 (6 PWM)	14 (6 PWM)
<b>Maximální odběr proudu</b>	40 mA	40 mA	40 mA
<b>Flash paměť</b>	32 KB	32 KB	32 KB
<b>Vyhrazeno pro bootloader</b>	0,5 KB	2 KB	2 KB
<b>SRAM</b>	2 KB	2 KB	2 KB
<b>EEPROM</b>	1 KB	1 KB	1 KB
<b>Rozměry (mm)</b>	69x53	43x18	33x18

Tabulka 3 - Charakteristika vývojových desek Arduino (vlastní zpracování)

### 3.7.1 SPI

Z anglického Serial Peripheral Interface je synchronní sériová komunikační linka umožňující zaslání dat přes sériové rozhraní specificky navržená pro fungování ve spolupráci s mikrokontrolery, kdy poskytuje možnost komunikace mikrokontroleru

a modulů nebo dokonce dvou mikrokontrolerů navzájem, ale pouze na krátké vzdálenosti. SPI je schopné pracovat ve full duplex modu, který umožňuje zařízení přijímat i odesílat data simultánně na jedné lince. V porovnání s dalšími typy komunikace nacházejících se na vývojových deskách Arduino jako je UART a I2C je jednoznačně nejrychlejší komunikující rychlostí více jak 8 Mb/s. Větší rychlost je obecně dána využitím jednoduššího, a tedy rychlejšího protokolu, kde jsou datové a časové vodiče sdíleny mezi jednotlivými zařízeními a každý z nich vyžaduje pouze unikátní vodič pro adresování. V prostředí SPI je vždy jedno zařízení označeno jako master, obvykle je to právě mikrokontroler, který kontroluje a řídí periferní zařízení, která jsou na tuto linku připojena. Typicky jsou pro zařízení společné tři linky a jedna unikátní pro každé zařízení:

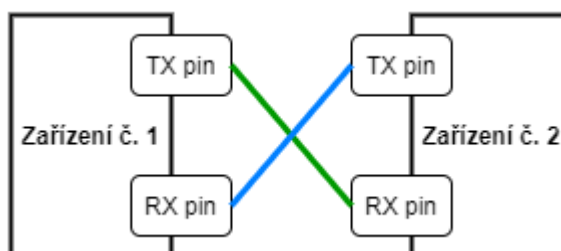
- MISO (Master In Slave Out) – linka pro odesílání dat od slave k master
- MOSI (Master Out Slave In) – linka pro odeslání dat od master k slave
- SCK (Seriál Clock) – linka určující časovou synchronizaci pro přenos dat
- SS (Slave Select) – specifický pin umožňující zařízení povolovat a zakazovat

Pokud je slave select pin na hodnotě LOW komunikuje slave zařízení s řídicím master zařízením, ale pokud je hodnota pinu HIGH master zařízení je ignorováno. A právě tento proces umožňuje sdílení linek pro MISO, MOSI a SCK. Jednou z věcí, na kterou je potřeba dávat pozor je, že standard SPI je značně volný a skoro každé zařízení je implementováno trochu jinak. Proto je potřeba dodržovat přesné postupy připojení zařízení, které jsou popsány ve specifikačních listech daného výrobce. Výhodou používání SPI je relativní jednoduchost protokolu, který není tak složitý jako například u komunikace I2C. Dále je tento protokol značně rychlejší než technologie UART a I2C a umožňuje nepřetržitou komunikaci bez nutnosti přerušování. V neposlední řadě také dovoluje rozdělení MISO a MOSI linek pro full duplex přenosu dat. Nevýhodou je více využitých portů nebo pinů, limit počtu připojených zařízení, žádná možnost kontroly toku dat a chybí také korekce chyb například pomocí paritních bitů. Celá komunikace následně podléhá jednomu zařízení (master), což vystavuje celou síť bezpečnostnímu riziku v podobě útoku nebo možné závady. (75) (89) (90)

### 3.7.2 UART

Univerzální asynchronní příjem a přenos (Universal Asynchronous Reception and Transmission) je jednoduchý komunikační protokol, který umožňuje hostitelskému zařízení komunikovat se zařízeními pomocnými. UART podporuje obousměrný, asynchronní a sériový přenos dat. Pro komunikaci využívá pouze dvou pinů, jeden pro odesílání (TX) a druhý pro příjem (RX), které jsou v praxi zastoupeny digitálními piny 0 a 1. Tento protokol je zároveň schopen řešit synchronizační problémy mezi mikrokontrolerem a externími sériovými zařízeními. Samotná komunikace může probíhat třemi způsoby:

- Simplex – data jsou přenášena pouze jedním směrem
- Half duplex – data jsou přenášena oběma směry, ale ne ve stejný čas
- Full duplex – data jsou přenášena oběma směry, a to ve stejný čas



Obrázek 8 - Schéma zapojení UART komunikace (vlastní zpracování)

Po vytvoření spojení tedy data putují od TX pinu vysílajícího zařízení k RX pinu přijímacího zařízení. V tomto procesu nefiguruje žádné časování, protože je tento protokol asynchronní. Právě díky chybějícímu časování obsahují data startovací a koncové bity, které reprezentují začátek a konec datových paketů. Přenos dat je založen na principu FIFO (First in, First out) a sběrnice je označena jako zaneprázdněná (BUSY) po dobu celého přenosu, dokud zařízení neobdrží koncový bit. UART dále disponuje kontrolou přerušení, jeho cílem je automatické odeslání obsahu bufferu.

Výhodou použití AURT je jednoduchý provoz, který má velice dobře zpracovanou dokumentaci a je jednou z nejpoužívanějších metod komunikace mezi zařízeními. Dále nevyžaduje přítomnost časování a umožňuje kontrolu přenesených dat pomocí paritních bitů. Nevýhodou tohoto řešení je malá velikost datového rámce, která je 9 bitů. Rychlost

přenosu není příliš vysoká a není umožněno použití více výstupních zařízení jako master a slave. Na bázi této technologie vznikl novější standard USART (Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter), který umožňuje nastavení synchronního nebo asynchronního přenosu dle potřeby implementace. (89) (90)

### 3.7.3 I2C

Zkratka I2C (Inter-integrated-circuit) je název pro sériový komunikační protokol podobný technologii UART, ale využívaný ne pro potřeby komunikace dvou počítačů, nýbrž pro potřeby komunikace zařízení s přídatnými moduly a senzory. Jedná se o jednoduchou obousměrnou komunikační sběrnici založenou na dvou vodičích. Hlavním využitím jsou projekty, kdy je potřeba propojení velkého počtu zařízení jako jsou senzory, různá rozšíření a mnoho dalšího, kdy je možné bezproblémové komunikace až od 128 zařízení pomocí jednoho připojení. I2C používá pro tyto potřeby adresový systém a sdílenou sběrnici. Mnoho různých zařízení může být připojeno pomocí jednoho vodiče, všechna data jsou přes tento vodič sdílena a následně jsou tříděna podle adres zařízení, která je odeslala. Ovšem kompromisem za snadné připojení velkého počtu zařízení je rychlost, která je znatelně menší než v případě UART a SPI. Samotná rychlost je dále ovlivněna kvalitou vodiče a externím rušením. I2C pracuje na dvou linkách s názvem SCL (Serial clock line) a SDA (serial data line acceptance port). SCL je časovací linka pro synchronizaci komunikačního procesu a SDA je datová linka, přes kterou jsou posílány a přijímány jednotlivé datové bity. Hlavní zařízení (master) inicializuje přenosovou sběrnici, generuje časový úsek, v jakém je komunikační okno otevřeno a přiděluje jednotlivým rozšiřujícím zařízením (slave) jejich adresy. Samotný vztah master a slave není konstantní a záleží na směru toku dat v daném čase. Proces komunikace probíhá tak, že master zařízení odešle každému připojenému zařízení signál tím, že SDA linku přepne z úrovně HIGH na úroveň LOW a poté provede stejnou operaci na SCL lince. Master posléze odešle všem připojeným zařízením 7 nebo 10 bitovou adresu a read/write bit na slave zařízení, s kterým chce komunikovat. Toto zařízení následně porovná adresu se svou obdrženou a ponechá SDA linku na hodnotě HIGH. Zařízení master následně odešle nebo přijme datový rámec, po každém úspěšném přijetí nebo odeslání odešle komunikační zařízení ACK bit o úspěšně provedené operaci. Pro zastavení datového přenosu master

zařízení odešle stop signál do slave zařízení pomocí přepnutí časování SCL na HIGH předtím, než dojde k přepnutí SDA linky také na HIGH.

Synchronizace časování probíhá tím, že master zařízení generuje vlastní časování na SCL lince a tuto informaci odešle pomocí datové linky ostatním zařízením. Aktuální časování je vždy aktivní pouze po dobu, kdy je SCL nastaveno na HIGH a synchronizace je prováděna při připojení I2C rozhraní do SCL linky, kde je změněna hodnota z HIGH na LOW. Jakmile je hodnota LOW, zařízení si ponechá tento stav, dokud není dosaženo na lince opět stavu HIGH. Potom co všechna zařízení projdou stavem LOW, začnou počítat svoji HIGH periodu a zařízení, které první dokončí tento stav, změní svoji hodnotu SCL znovu na LOW. Výhodou využívání I2C je minimum zatížených pinů pro komunikaci, a to i při použití velkého množství přídavných zařízení. Toto řešení je velice flexibilní díky podpoře velkého počtu zařízení zastupující roli jak master, tak slave. Dokáže provozovat obousměrnou komunikaci na principu využití pouze dvou vodičů a dokáže se snadno přizpůsobit různorodým zařízením, které se na lince nacházejí. Nevýhodou je pomalejší rychlost přenosu dat a v některých případech komplikovanější integrace do PCB designů, kde je vyžadován pull-up rezistor. (89) (90)

### **3.8 Příklady rozšiřujících modulů pro Arduino**

Pro vývojové desky Arduino existuje bezpočet různých typů rozšiřujících modulů. V této kapitole jsou uvedeny pouze nejčastěji používaná rozšíření, popsány jejich vlastnosti a přiblížen proces principu funkčnosti.

#### **Teplotní senzory**

Teplotní senzory lze rozdělit do dvou základních skupin, které používají dva rozdílné typy termistorů. Termistor je speciálním typem rezistoru měnící svůj elektrický odpor na základě změny teploty. Prvním skupinou termistorů jsou takzvané NTC (negastor), které se využívají u velké většiny teplotních senzorů a jejich funkce je založena na nepřímé úměrnosti, kdy s rostoucí teplotou klesá hodnota odporu příslušného NTC termistoru. V případě druhé skupiny se jedná o termistory PTC (pozitor), které nejsou tak často používány a jejich funkce pracuje s přímou úměrností, kdy při zvyšování teploty dochází k zvyšování odporu rezistoru. V obou případech je k získání teploty nutná znalost charakteristiky termistoru, z které je možné následně dopočítání výsledné teploty.

Populární kombinované moduly jsou DHT11, DHT22, BME280. Právě modul BME280 je často využíván v mnoha projektech. Jeho specifikace umožňuje sledování teploty v intervalu od -40 do 85 stupňů celsia, a to s přesností 0,5 stupně celsia. Pro komunikaci daný senzor nabízí možnosti I2C nebo SPI. A může být napájen jak 3,3 V tak 5 V stejnosměrného napětí. Pokud se jedná specificky o teplotní senzor velmi často je využíván DS18B20, který nabízí vodotěsnost, rozpětí měření od -55 do 125 stupňů celsia, opět s přesností 0,5 stupně. Provozní napětí může být v intervalu 3 až 5,5 V. Tento senzor je schopen komunikovat na bázi jednoho datového vodiče. (77)

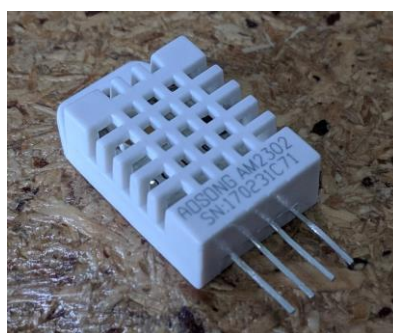


Obrázek 9 - Teplotní senzor DS18B20 (37)

### Vlhkostní senzory

Jednotlivých senzorů a modulů, které jsou schopny měřit vlhkost je na trhu celá řada, ale za zmínku rozhodně stojí kombinovaný senzor DHT11, který v sobě kombinuje jak vlhkostní, tak i teplotní senzor, dále jeho novějšího nástupce DHT22, BME280 nebo velice oblíbený SHT30. Nejčastěji se v různorodých projektech objevuje právě nový DHT22 či BME280. V případě senzoru DHT22 rozsah měření pokrývá celou stupnici vlhkosti od 0-100 % oproti jeho předchůdci, který měřil hodnoty v rozmezí 20-80 %. I v případě BME se taktéž jedná o plný interval od 0 až do 100% relativní vlhkosti s přesností 3 stupňů procenta. Samotný proces měření vlhkosti je založen na bázi kondenzátoru obsahující speciální materiál, který má nejen hygroskopické, ale zároveň dielektrické vlastnosti a je umístěn mezi dvojicí elektrod. Materiály spadající do skupiny hygroskopických jsou materiály snadno pohlcují vodu ze vzdušné vlhkosti a následně ji udržují. V případě,

kdy dojde k navlhčení tohoto materiálu začne zdatelně měknout a při opačném procesu vysoušení tvrdnout. V praxi se používá jako hygroskopická látka oxid fosforečný nebo chlorid hořečnatý. V případě dielektrických vlastností to jsou látky, které patří do nevodivých materiálů, ale jsou schopny polarizace neboli udržení elektrického pole bez nutnosti stálého přívodu elektřiny. Do senzorů se jako dielektrikum používá nejčastěji speciálně upravený plast či polymer. Díky materiálu s oběma vlastnostmi je poté možno snímat vlhkost vzduchu pomocí zvyšující se kapacity snímače, která je následně převedena dle stanovených tabulkových hodnot na procentuální vyjádření vzdušné vlhkosti. (31) (42)



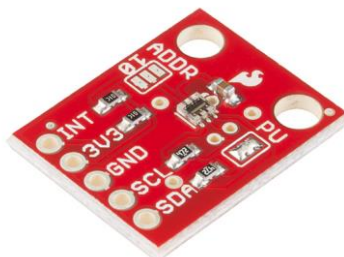
Obrázek 10 - Kombinovaný senzor DHT22 (vlastní zpracování)

### Světelné senzory

Senzory světelné umožňují měřit světelný svit a umožňují tak připojeným zařízením reagovat na naměřené hodnoty. Tyto senzory mají využití hlavně v oblastech jako jsou chytrá města a domácnosti, kde slouží jako základní prvek ovládní světla a žaluzií. Světelné senzory jsou vyráběny s velkou škálou funkcí týkající se různých typů světla. Není problém nalézt multifunkční senzory snímající zároveň běžný svit, infračervené světlo a UV záření v podobě jednoho kompaktního modulu. Ale samozřejmě je možnost senzorů zaměřujících se specificky na jeden typ záření. Běžně je v praxi využívání senzoru TSL2561, SI1145 nebo BH1750. TSL2561 je základní variantou světelného snímače schopné snímání intenzity světla v rozsahu od 0,1 až do 40 000 lux. Senzor je testován na správné fungování v teplotních podmínkách -30 až 80 stupňů celsia. V případě potřeby měřit hodnoty UV záření je možné použít senzor SI1145 vyráběný firmou SiLabs. V tomto případě jsou hodnoty ultrafialového záření dopočítávány nepřímou z hodnot svítivosti a infračerveného záření za pomoci příslušných algoritmů. Existence infračervené diody přímo na desce senzoru umožňuje ve specifických oblastech využití k detekci vzdálenosti.



Senzor BH1750 je velice všestranný vzhledem k možnosti využití komunikace na sběrnici I2C a nízké spotřebě elektrické energie v podobě 0,12 mA. Provozní napětí je 3,3 V a snímání probíhá v intervalu 1 až 65535 lux s přesností přibližně 20 %. (53)



Obrázek 11 - Světelný senzor TSL2561 (74)

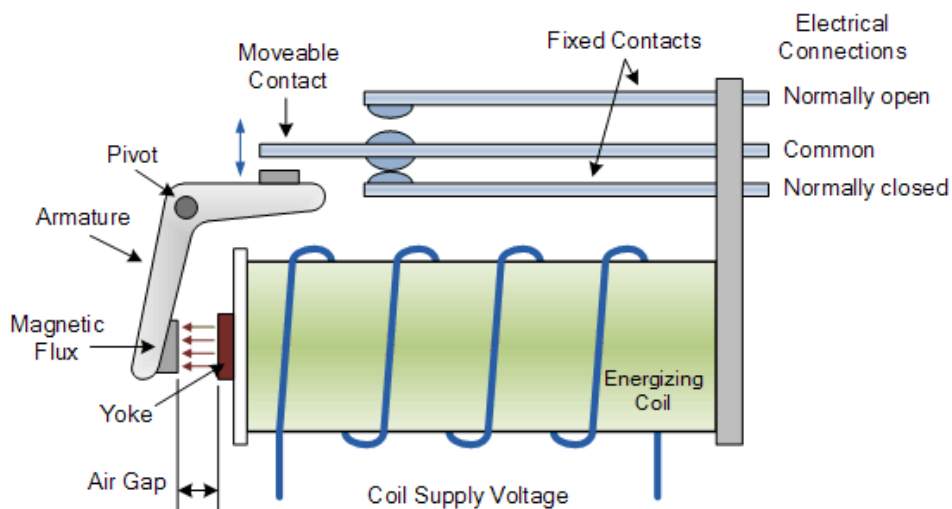
### Tlakové senzory

Nejčastěji známé jako barometrické tlakové senzory jsou formou barometrů umožňující měření a sledování veličiny atmosférického tlaku a v některých případech využívat tuto funkcionalitu k dopočítávání nadmořské výšky zařízení se značně dobrou přesností. V minulosti byl tlak měřen pomocí tekutiny uzavřené ve skleněné nádobce, kde hladina tekutiny stoupala nebo klesala podle změny v hodnotě tlaku, ovšem tato metoda byla velice nepřesná a v mnoha případech postrádala tato zařízení jakoukoliv stupnici uvádějící jednotlivé hodnoty a bylo tedy možné jen zjistit, kdy tlak stoupl nebo klesl. Postupem času tedy vzniklo několik nových řešení bez použití jakékoliv tekutiny v podobě takzvaného aneroidu nebo MEMS tlakoměru (Micro Electro Mechanical Systems), které jsou používány v moderních zařízeních. Tlakoměry tohoto typu obsahují malou membránu přes kapacitní desku, která je v kontaktu s atmosférou. Následně je atmosférický tlak detekován prostřednictvím toho, do jaké míry je membrána tlakem deformována v důsledku změny tlaku. Jedním z nejčastěji používaným tlakoměrem v oblasti vývoje zařízení je BMP280 od společnosti Bosch, který je nízkonákladový a zároveň značně přesný v jednotlivých měřeních. Tento modul kombinuje měření tlaku a teploty, a to s přesností 1 hPa na tlakové stupnici a 1 °C pro teplotní hodnoty. Senzor dále umožňuje komunikaci prostřednictvím protokolu I2C nebo SPI a může být využit jako výškoměr s přesností 1 metru. Měření tlaku podléhá intervalu od 300 do 1100 hPa a celý modul průměrně konzumuje 0,6 mA proudu. Na trhu existuje veliká škála těchto senzorů

od různých společností a různou oblastí zaměření, kterou mohou být měření tlaku specifických kapalin nebo plynů. (70)

### Elektromagnetická relé

Elektromagnetická relé jsou elektricky ovládané spínače používané pro ovládání nebo spínání silnoproudých zařízení za pomoci slaboproudého signálu. Jedná se o cívku s feromagnetickým jádrem opatřenou mechanickou částí, která je složena z takzvané pohyblivé kotvy s pružinou. Funkce je poté zajištěna sepnutím slaboproudého ovládacího obvodu, které vytvořením magnetického pole cívkou přepne kotvu do polohy otevřeno a relé je tak sepnuto na silnoproudé straně. Pokud dojde k přerušení ovládacího signálu pružina vrátí relé do původní polohy a obvod je přerušen. Relé mají dvě rozdílné možnosti zapojení. Normálně otevřený (NO) nebo normálně uzavřený (NC) obvod. V případě normálně otevřeného zapojení je silnoproudý obvod sepnut až ve chvíli, kdy slaboproudá část obdrží ovládací signál. Naopak u normálně uzavřeného zapojení je ve výchozím zapojení silnoproudý obvod v provozu a při obdržení ovládacího signálu relé silnoproudou část rozpojí. Relé jsou velmi často využívány v různém odvětvích automatizace průmyslu a zařízení v chytrých domácnostech. Případnou nevýhodou je potřeba využití mechanických součástí, které mohou podléhat velké míře opotřebení. Pro potřeby velkého množství spínacích cyklů a vyšší úroveň rychlosti byly vyvinuty relé polovodičové, bohužel tento typ je z hlediska výroby finančně náročnější, díky nutnosti tato relé chladit je v praxi upřednostňován elektromagnetický typ. (24)



Obrázek 12 - Schéma elektronického relé (19)

## **Lokalizační moduly**

Pro sledování polohy zařízení je využíváno různorodých metod, ale nejčastěji jsou do jednotlivých řešení implementovány GPS systémy. Právě tyto lokalizační moduly obsahují anténu pro vysílání a samostatný procesor zajišťující zpracování dat a jednotlivé procesy komunikace. Důležité faktory ovlivňující lokalizační moduly jsou velikost, rychlost aktualizace dat, modulační rychlost, senzitivita navigace, energetická náročnost, počet kanálů, které modul poskytuje, kvalita, popřípadě velikost antény a přesnost, s kterou je modul schopen zaměřovat polohu. Často využívaným modulem v praxi je NEO-6M GPS Module s rozměry 23x30 mm vycházející ze stejnojmenné rodiny NEO-6. Poskytuje aktualizaci dat v režimu od 1 Hz do maximálních 5 Hz. Modulační rychlost je 9600 baudů a senzitivita signálu -161 dBm. Obsahuje integrovanou anténu s možností provozu až 50 kanálů a horizontální přesností pozice 2,5 m. Pro provoz je nutné modul napájet v rozmezí od 3 V do 5 V. Přibližná doba zaměření polohy je 27 sekund při běžném provozu a méně než 3 sekundy při asistovaném zaměření. Využití těchto senzorů polohy je hlavně v prostředí monitorování vozidel, zvířat nebo zásilek. (69)

## 4 Vlastní práce

Praktická část práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První část se zabývá srovnáním vybraných technologií širokopásmových sítí s nízkou spotřebou za pomoci vícekriteriální analýzy variant. Následně druhá část je věnována vytvoření prototypu senzoru, který v těchto širokopásmových sítích pracuje.

### 4.1 Zhodnocení technologií širokopásmových sítí

První kapitola praktické části se zabývá srovnáním vybraných technologií pomocí určených kritérií. Je zde uveden základní popis použitých metod vícekriteriální analýzy variant (VAV) a výpočet příslušných vah jednotlivých kritérií. Tato kritéria byla vybrána na základě literární rešerše z teoretické části práce. Důležité je zmínit, že neexistují dvě naprosto totožné technologie širokopásmových sítí, které by si bez jakéhokoli rozdílu odpovídali. Výběr správné síťové technologie je proto klíčový pro aplikaci v praxi.

#### 4.1.1 Popis bodovací metody vícekriteriální analýzy variant

Jedná se o elementární metodu, která spočívá v hodnocení jednotlivých variant za přispění vybraných kritérií, a to prostřednictvím předem zvolené stupnice, která musí být pro všechna kritéria stejná. Můžeme tedy říci, že se jedná o kvantifikaci hodnocení variant podle zvolených kritérií. Nejdříve je tedy nutné stanovit bodovací stupnici. Nejčastějším typem je stupnice od 0 do 10, která byla zvolena pro srovnání síťových technologií i v této práci. Následné hodnocení jednotlivých variant je prováděno přidělením příslušného počtu bodů a to tak, že čím více bodů varianta obdržela, tím je její výsledné hodnocení lepší. Konečný výběr nejlepší varianty je určen pomocí součtu bodů jednotlivých kritérií příslušících jedné variantě a následovné porovnání všech výsledků variant. Samotný výsledek vícekriteriální analýzy je pouze kompromisní řešení, kdy neexistuje přesně jedno skutečně nejlepší a jednoznačné řešení. Důvodem je velký vliv zvolené metody, příslušné normalizace, použití vah kritérií anebo jejich výpočet různými metodami.

$$b_i = \sum_{j=1}^n b_{ij}$$

Je-li tedy každé *i-té* variantě hodnocené podle *j-tého* kritéria přiřazen počet bodů  $b_{ij}$  je celkové ohodnocení varianty rovno součtu dílčích hodnot. Jako kompromisní varianta je vybrána ta, která má největší počet bodů  $b_i$ . V případě potřeby je možné metodu rozšířit o váhové kritérium, které bylo v práci uplatněno. V tomto případě jsou hodnoty  $b_i$  vypočítány jako vážený součin.

#### 4.1.2 Metodika výpočtu váhových kritérií

Pro postup výpočtu nejlepší kompromisní varianty bylo v této práci použito dvou metod pro výpočet váhového kritéria. V základním rozdělení pod-kritérií je použita bodovací metoda výpočtu vah a následně ve finálním srovnání jednotlivých variant se jedná o využití Saatyho metody.

##### ➤ Bodovací metoda výpočtu váhového kritéria

Jedná se o základní metodu výpočtu vah kritérií, která pracuje s kardinálními informacemi neboli rozhodovatel zná jednotlivé rozestupy mezi variantami, nejen jejich samotné pořadí. Spočívá v přiřazení jednotlivých bodů z předem určené stupnice, v tomto případě se jedná opět o 0 až 10. Čím více má kritérium bodů tím je více preferováno a můžeme říci, že má na rozhodnutí větší vliv. Není vyloučeno příslušným kritériím určit stejné bodové ohodnocení, což vyjadřuje, že kritérium není nad druhým preferováno. Vzorec pro výpočet vah pomocí bodovací metody je následující:

$$v_j = \frac{b_j}{\sum_{j=1}^n b_j}$$

Kde:

$b_j$  – počet přiřazených bodů v *j-tém* kritériu

$n$  – počet kritérií

$j$  – nabývá hodnot 1, 2, ...,  $n$

##### ➤ Saatyho metoda výpočtu váhového kritéria

V případě Saatyho metody se jedná o postup výpočtu vah kritérií ovšem založené na kvantitativním párovém srovnání, kdy se porovnává preference jednotlivých dvojic kritérií,

kteře vytvářejí takzvanou Saatyho matici. Tato metoda využívá Saatyho preferenční stupnici s následujícím tvarem:

1 – rovnost  $i$  a  $j$

3 – slabá preference  $i$  před  $j$

5 – silná preference  $i$  před  $j$

7 – velmi silná preference  $i$  před  $j$

9 – absolutní preference  $i$  před  $j$

Ve většině případů se využívá takto formulovaná stupnice, ovšem pokud je potřeba je možné využít i sudých mezistupňů, které zde nejsou zobrazeny. Jednotlivé preference se zapisují do Saatyho matice  $S = (S_{ij})$ :

$$S = \begin{array}{c|cccc} & K_1 & K_2 & \dots & K_n \\ \hline K_1 & 1 & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ K_2 & S_{21} & 1 & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ K_n & S_{n1} & S_{n2} & \dots & 1 \end{array}$$

Obrázek 13 - Saatyho matice (vlastní zpracování)

Kde:

$K$  – označuje jednotlivé kritérium

$n$  – představuje počet kritérií

$S_{ij}$  – je prvek matice porovnávající  $i$ -té a  $j$ -té kritérium

Matice má na diagonále samé jedničky, které představují rovnost kritéria a sebe sama. Její velikost je  $n \times n$  a prvky matice vyjadřují odhad podílů vah zvolených kritérií.

#### 4.1.3 Vybrané LPWAN technologie pro zhodnocení pomocí VAV

Pro samotný postup vícekritériální analýzy variant byla vybrána pouze část síťových technologií uvedených v teoretické části. Hlavním důvodem je v některých případech nejasnost jednotlivých charakteristik, vlastností a u poloviny zmíněných technologií

širokopásmových sítí s nízkou spotřebou jejich poskytovatelé ani neuvádějí potřebné údaje ve veřejných zdrojích, a to zejména v případech privátních společností, které se soustředí na budování individuálních řešení sítí. Pro srovnání byla nakonec vybrána tato šestice:

- **Sigfox** – technologie stejnojmenné firmy pocházející z Francie. Komunikaci pomocí bezdrátových sítí se začala věnovat hlavně v souvislosti se vzdáleným měřením elektrické energie, plynu a spotřeby vody. Pro poskytování konektivity používá vlastní patentovanou UNB technologii. V současné době je možné síť Sigfoxu využívat v 70 zemích s pokrytím přibližně 5 milionů čtverečních kilometrů.
- **LoRa** – síťový protokol a technologie využívaná při bezdrátové komunikaci s cílem nízké spotřeby a pokrytí velké oblasti signálem, navržený s hlavním použitím v bezdrátových zařízeních s provozem na baterii. Jedná se o technologii, která podporuje obousměrnou komunikaci koncových zařízení se stanicemi, což umožňuje aktualizace softwarového vybavení pomocí OTA aktualizací. V současné době rozdělena do třech tříd A, B a C, kdy jednotlivé třídy mají různé vlastnosti pro specifická užití.
- **NB-IoT** – Narrowband - Internet of Things je LPWAN technologie, která koexistuje v LTE a GSM licenčním pásmu a je vyvíjena organizací 3GPP. A specializuje se na pokrývání zejména vnitřních prostor objektů, dlouhou výdrž baterie, nízké náklady na provoz a vysokou hustotu připojení, která dosahuje hodnot až 100 000 koncových zařízení na jednom kilometru čtverečním. Finální síť umožňuje provoz ve třech operačních módech Stand alone operation, Guard band operation, In-band operation.
- **WAVIoT** – síťová infrastruktura poskytovaná jako služba stejnojmennou firmou založenou v Texaském Houstonu. Zaměřuje se zejména na vytváření sítí pro chytrá města, kde zajišťuje připojení nízko energetických zařízení jako jsou elektroměry, plynoměry a vodoměry, které odesílají malé množství dat o příslušných měřených veličinách.

- **RPMA** – Random Phase Multiple Access je síť s velkou kapacitou, širokými možnostmi rozšiřitelnosti, výbornou penetrací signálu, která využívá bezlicenční frekvence a cílí zejména na průmyslový sektor.
- **Weightless** – LPWAN technologie, která je specificky navržena pro užití v prostředí internetu věcí. Její výhodou je celosvětové otevřený standard, který umožňuje rychlejší vývoj a nižší cenu infrastruktury. Užívání není licenčně zpoplatněno, ale je nutné zaplatit členský poplatek pro přístup do vývojové části Weightless. V počátku vývoje společnost rozlišovala tři typy Weightless P, N a W, ale v současnosti je Weightless je brán jako jeden produkt vycházející ze specifikace zanáčované jako P.

#### 4.1.4 Kritéria, pod-kritéria a jejich zhodnocení

Pro analýzu bylo vybráno několik skupin pod-kritérií tvořících pěti základních neboli hlavních kritérií, na jejichž základě je tvořeno samotné srovnání jednotlivých LPWAN technologií. Zvolená kritéria představují:

- Komunikaci
- Nasazení
- Dokumentaci
- Podporu platform třetích stran
- Konfiguraci systému

V následující části práce jsou specifikována jednotlivá kritéria i pod-kritéria na základě, kterých je vytvořena tabulka určující váhy pomocí bodovací metody a tabulka s výsledným ohodnocením jednotlivých širokopásmových technologií vícekritériální analýzou variant včetně vyhodnocení získaných tabulkových hodnot z porovnání.

##### ➤ **Komunikace**

Kritérium komunikace je založeno na vlastnostech týkající se samotného přenosu dat. Jako dílčí kritéria jsou zde tedy počet zařízení, které je schopna obsluhovat jedna přijímací stanice, přenosová rychlost dat, maximální velikost přenášené zprávy



a maximální počet přenesených zpráv za jeden den. Počet koncových zařízení přistupující ke stejné stanici je velice důležitým faktorem při budování sensorických sítí, které ve většině případů disponují obrovským počtem senzorů a čidel. Velice blízce souvisí i s velikostí plochy, která může být pokryta a kvalitou přenosu v podobě zaručení nerušeného přenosu i při velkém počtu komunikujících zařízení v jeden časový okamžik. Přenosová rychlost určuje, jak velké množství dat je možné přenést z koncového zařízení do cílové infrastruktury nejčastěji v jedné sekundě. Tento faktor ovlivňuje nejen množství, které je v síti možné přenést, ale také napovídá tomu, jak dlouho samotné zařízení tráví jednotlivými vysíláními. A právě delší čas strávený vysíláním může zvyšovat riziko rušení, bezpečnostní riziko nebo zatížení sítě. Maximální velikost zprávy následně určuje, kolik dat je možné přenést pomocí jednoho vysílání a je tedy hlavním řídicím prvkem v aplikacích založených na složitých senzorech s mnoha veličinami, kde je potřeba přenášet velké množství dat. Proto je nutné zvolit technologii, která to umožňuje nebo upravit řešení, tak aby splňovalo podmínky zvolené technologie. Maximální počet zpráv za den je u mnoha technologií jen doporučením a u jiných pravidlem, které je nutné dodržovat. Toto omezení je zavedeno kvůli zlepšení stability a bezpečnosti sítě. Nejedná se tedy pouze o bezpečnostní, ale i kvalitativní opatření.

Pro výpočet váhového kritéria byla jednotlivá pod-kritéria ohodnocena příslušnými body podle jejich významnosti v ohledu na výslednou komunikaci. Největší váha byla přiřazena přenosové rychlosti s 10 body, následovaná maximální velikostí jedné zprávy s 8 body, počtem koncových zařízení připojených na jednu základní stanici obdržel bodů 7, a na závěr nejmenší vahou je maximální počet zpráv za den, který technologie podporuje s 6 body.

	<b>Body</b>	<b>Váhy</b>
<b>Počet zařízení na 1 gateway</b>	7	0.2258
<b>Přenosová rychlost</b>	10	0.3226
<b>Maximální velikost zprávy</b>	8	0.2581
<b>Maximální počet zpráv za den</b>	6	0.1935

**Tabulka 4 - Váhové kritérium komunikace (vlastní zpracování)**

Jak je možné vidět několik technologií obdrželo stejný počet 10 bodů v pod-kritériu počtu koncových zařízení obsluhovaných jednou stanicí. To je zapříčiněno stejnou specifikací u těchto technologií v podobě přibližně jednoho milionu zařízení, které zvládne obsluhovat jedna základní stanice. Poté se specifikace značně snižuje a například u technologie Weightless, je počet zařízení pouhých 2 769. Pokud se jedná o přenosovou rychlost jednoznačně nejlépe je na tom technologie NB-IoT, která je založena na telekomunikačních sítích, což vede právě k tomuto výsledku s hodnotu rychlosti přenosu dat až 159 kb/s. Dalším pod-kritériem je maximální velikost zprávy, kde jasně dominuje LoRa a RPMA, u kterých dosahuje hranice velikosti zprávy přibližně 240 kilobytů. Nejhůře je na tom WAVIoT s maximálním obsahem zprávy ve velikosti 8 bajtů. V případě omezení maximálního počtu odeslaných zpráv za den opět nejvíce bodů obdržela technologie LoRa, která je v tomto případě bez omezení, stejně jako WAVIoT a RPMA. V případě porovnání, se na prvním místě umístila technologie LoRa, zejména díky velkému počtu zařízení připojících se na jednu základní stanici, velké datové velikosti zpráv a neomezenému počtu zpráv zaslaných za jeden den. Druhá v pořadí je technologie RPMA, která opět disponuje značným počtem zařízení na jednu stanici a neomezeným počtem komunikačních zpráv v síti. Třetí se umístila technologie NB-IoT. Ta disponuje obrovským náskokem v podobě rychlosti přenosu dat společně s datově velkými zprávami. Na čtvrtém místě je technologie Sigfox, která nemá problém s připojením více jak jednoho milionu zařízení na jednu stanici, ale na druhou stranu je zde značné omezení v podobě maximálního počtu 140 zpráv za jeden den a samotné velikosti těchto zpráv omezené na 12 bytů. Páté místo obdržela technologie WAVIoT, která sice podporuje značně velký počet připojených zařízení, ale s opravdu malou přenosovou rychlostí. A poslední šesté místo patří technologii Weightless, která disponuje dobrou přenosovou rychlostí, ale je značně omezena v podobě počtu připojených zařízení na jednu základní stanici, maximálním počtem zpráv za den a jejich velikostí.

	Počet zařízení na 1 gateway	Přenosová rychlost	Maximální velikost zprávy	Maximální počet zpráv za den	Výsledek	Pořadí
<b>Sigfox</b>	10	5	6	8	6.9677	4
<b>LoRa</b>	10	7	10	10	9.0323	1
<b>NB-IoT</b>	3	10	8	7	7.3226	3
<b>WAVIoT</b>	10	5	4	10	6.8387	5
<b>RPMA</b>	5	6	10	10	7.5806	2
<b>Weightless</b>	1	9	6	6	5.8387	6
<b>Váhy</b>	0.2258	0.3226	0.2581	0.1935		

Tabulka 5 – Vyhodnocení kritéria komunikace (vlastní zpracování)

### ➤ Nasazení

Nasazení je kritériem představujícím, jak je síť distribuována, v jakém je používána frekvenčním pásmu a jaké tato technologie umožňuje vzdáleností pokrytí. Specificky se jedná o model nasazení představující typ distribuce v podobě šíření skrze operátora nebo jako privátní řešení, popřípadě jejich kombinace. Pokud je technologie šířena prostřednictvím operátora ve velké většině případů má velice kvalitní infrastrukturu a rychle rostoucí rozvoj technologií, ale na druhou stranu privátní řešení mají velikou výhodu v podobě individuálně upravené aplikace. Dalším pod-kritériem je plná dostupnost sítě v České republice, kdy všechny vybrané technologie je možné provozovat na území ČR, ale kde jen část aktivně působí. Následně je zde bráno v potaz vzdálenostní pokrytí, a to jak v otevřeném prostředí, tak v zastavěných oblastech. Posledním pod-kritériem nasazení je samotné frekvenční pásmo využité jednotlivými technologiemi.

Pro váhy jednotlivých pod-kritérií nasazení bylo bodové ohodnocení rozděleno následovně: pokrytí signálem v zastavěných oblastech obdrželo nejvíce 10 bodů, pokrytí otevřeného prostředí bodů 9, zda je technologie dostupná v ČR obdrželo bodů 6, využití frekvenční pásmo, které technologie používá 5 bodů, a nakonec model nasazení pouhé 2 body. Následně byly vypočítány jednotlivé váhy a použity v hodnocení za pomoci bodovací metody.

	<b>Body</b>	<b>Váhy</b>
<b>Model nasazení</b>	2	0.0625
<b>Dostupnost v ČR</b>	6	0.1875
<b>Pokrytí otevřené prostředí</b>	9	0.2812
<b>Pokrytí zastavěná plocha</b>	10	0.3125
<b>Využití frekvenční pásmo</b>	5	0.1562

**Tabulka 6 - Váhové kritérium nasazení (vlastní zpracování)**

Na začátek je nutné zmínit, že pod-kritérium dostupnosti v ČR splňují všechny porovnané technologie, ale jen polovina v podobě Sigfox, LoRa a NB-IoT aktivně působí na území České republiky a obdrželi tak plný počet bodů. Ostatní technologie buďto v tuto chvíli spuštění připravují nebo jsou schopny připravit individuální řešení, které by na našem území pracovalo, ale v tuto chvíli působí pouze v zahraničí. Dále jak již bylo v teoretické části popsáno můžeme vidět, že téměř všechny technologie využívají ISM frekvenční pásmo, kdy pouze NB-IoT operuje v LTE pásmech a RPMA se snaží prosadit v pásmu 2,4 GHz. V případě modelu nasazení jsou na tom nejlépe LoRa a WAVIoT, které poskytují svoji technologii jako komplexní infrastrukturu, kdy vystupují jako operátoři jejich síťových technologií nebo zároveň dovolují privátní řešení upravené na míru zadavatele. Co se týká pokrytí nejlépe je na tom Sigfox s dosahem až neuvěřitelných 50 km v otevřených oblastech, následován technologiemi WAVIoT a LoRa. Nejlépe se tedy umístila technologie Sigfox díky svému velkému dosahu signálu a dlouhodobému provozu na území České republiky. Na druhém místě je technologie WAVIoT a to hlavně díky kombinovanému modelu nasazení, skvělému dosahu signálu a možnosti využití běžně dostupného ISM pásma. Třetí se umístila LoRa, která opět umožňuje kombinovaný způsob nasazení, je značně zaběhlá na území ČR a disponuje také dobrým dosahem signálu. Čtvrté místo náleží NB-IoT působícím rovněž stabilně na našem území, a to díky spolupráci se společností Vodafone. Problematickým faktorem této technologie je malá prostupnost v zastavěných oblastech, která značně snížila její hodnocení. Na posledních dvou místech se umístily Weightless a RPMA, které disponují pouze zlomkem pokrytí oproti ostatním technologiím a nepůsobí navíc aktivně v České republice. Důležité je zmínit, že samotné nasazení je ovlivněno mnoha proměnnými zejména ze strany uživatele a každé řešení musí být individuálně zváženo.

	Model nasazení	Dostupnost v ČR	Pokrytí otevřeného prostředí	Pokrytí zastavěná plocha	Využití frekvenční pásmo	Výsledek	Pořadí
<b>Sigfox</b>	9	10	10	9	10	9.6250	1
<b>LoRa</b>	10	10	7	6	10	7.9063	3
<b>NB-IoT</b>	9	10	6	1	6	5.3750	4
<b>WAVIoT</b>	10	5	9	10	10	8.7813	2
<b>RPMA</b>	5	5	2	2	8	3.6875	6
<b>Weightless</b>	5	5	2	2	10	4.0000	5
<b>Váhy</b>	0.0625	0.1875	0.2813	0.3125	0.1563		

Tabulka 7 - Vyhodnocení kritéria nasazení (vlastní zpracování)

### ➤ Dokumentace

Velký vliv na implementaci těchto síťových technologií má i jejich případná dokumentace, a to jak od oficiální zdrojů představující společnosti stojící za danou technologií, popřípadě jejich partnery. Zároveň je ale nutné pohlížet i na komunitní materiály, které mohou vypovědět o kvalitě řešení, kdy větší popularita může ukazovat na přívětivější programové prostředí a jednodušší zavedení do celého systému. I přesto však zůstává oficiální dokumentace důležitějším faktorem z důvodu jistoty správnosti zdroje a možnosti zajištění podpory v tomto ohledu.

Kritérium dokumentace obsahuje dvě pod-kritéria v podobě oficiálních a neoficiálních dokumentů a studijních materiálů, se kterými je možné dále pracovat. Bodové ohodnocení pro určení vah bylo rozděleno v podobě 10 bodů pro oficiální dokumentaci a materiály společností stojících za těmito technologiemi. A následně 6 bodů pro materiály komunitní, které jsou v mnoha případech dobrým studijním materiálem, ale mohou být nespolehlivé vzhledem k jejich neověřenému původu. Proto byla větší váha zvolena pro oficiální dokumentaci z ověřených zdrojů.

	Body	Váhy
<b>Oficiální materiály</b>	10	0.6250
<b>Komunitní materiály</b>	6	0.3750

Tabulka 8 - Váhové kritérium dokumentace (vlastní zpracování)

Při srovnání tohoto kritéria můžeme vidět bodování rozvržené po celé škále. Důvodem jsou značně velké rozdíly v obou dostupných typech materiálů. Technologie ohodnocené nízkým počtem bodů jsou většinou privátní společnosti, které se zabývají poskytováním individuálních soukromých řešení, a tak jsou materiály a dokumentace velice těžko k nalezení, popřípadě úplně chybí anebo je poskytována až jednotlivým zákazníkům po obdržení objednávky. V případě kritéria dokumentace se na prvním příčce umístila technologie Sigfox za pomoci dobře zpracované a přehledné oficiální dokumentace s možností získání rad od podpory společnosti a jejich partnerů. Na druhém místě skončila LoRa, která je opačným případem velice silného komunitního zastoupení v podobě dobře zpracovaných návodů a ukázek implementace, ovšem s nepřehlednou a často složitou oficiální dokumentací. NB-IoT se umístila na třetím místě s dobrou oficiální dokumentací, ale minimálními zdroji z komunitního sektoru, to zejména z důvodu použití převážně v komerční sféře. Poslední tři místa obsadily tedy RPMA, WAVIoT a Weightless, ke kterým oficiální dokumentace vůbec není veřejně poskytována nebo jen v minimálním množství. V případě komunitních materiálů je to stejné jako v případě NB-IoT, kdy jsou technologie používány v komerčním sektoru, a tak nevzniká mnoho komunitních projektů. Vzniku neoficiálních materiálů nepřispívá ani to, že tyto technologie v současné době fungují ve velice malých oblastech převážně Spojených států.

	Oficiální materiály	Komunitní materiály	Výsledek	Pořadí
<b>Sigfox</b>	10	8	9.2500	1
<b>LoRa</b>	5	10	6.8750	2
<b>NB-IoT</b>	8	2	5.7500	3
<b>WAVIoT</b>	4	1	2.8750	5
<b>RPMA</b>	5	3	4.2500	4
<b>Weightless</b>	3	2	2.6250	6
<b>Váhy</b>	0.6250	0.3750		

Tabulka 9 - Vyhodnocení kritéria dokumentace (vlastní zpracování)

### ➤ Podpora platformem třetích stran

Vzhledem k tomu, že poskytovatelé širokopásmových sítí se soustředí zejména na provoz a správu samotné síťové infrastruktury, je potřeba zdůraznit důležitost podpory aplikací třetích stran, díky které je možné upravovat stávající řešení pro specifické potřeby. Do kritéria spadá hodnocení backendu daných technologií a jejich API. Tyto faktory jsou důležité zejména pro přístup k datům a jejich následné manipulaci. Dále je zde zohledněno, zda je řešení open-source nebo veřejně nepřístupné, což opět umožňuje nebo zamezuje individuálním úpravám a přizpůsobení tak technologie potřebám výsledného řešení. Na to navazuje samotné ohodnocení úrovně přizpůsobení neboli možnosti customizace jednotlivých řešení a zda je poskytovatelé nabízejí. Poslední pod-kritérium je úroveň dospělosti, která představuje, na jaké jsou vývojové úrovni jednotlivá řešení již aplikovaná v praxi a jak dlouho jsou provozována.

V případě podpory platformem třetích stran bylo jednotlivým pod-kritériím uděleno dohromady 26 bodů v následující podobě: backend a API obdrželo 10 bodů jako jedno z nejvýznamnějších pod-kritérií, následně možnosti úprav řešení v podobě customizace 7 bodů, s tím blízkou související varianta řešení open-source obdržela 5 bodů a úroveň dospělosti 4 body. Z takto rozdělených hodnot byly následně vypočítány jednotlivé váhy.

	<b>Body</b>	<b>Váhy</b>
<b>Backend a API</b>	10	0.3846
<b>Open-source řešení</b>	5	0.1923
<b>Možnosti customizace</b>	7	0.2692
<b>Úroveň dospělosti</b>	4	0.1538

**Tabulka 10 - Váhové kritérium podpora platformem třetích stran (vlastní zpracování)**

Jak je možné vidět v tabulce zhodnocení na prvním místě skončila technologie Sigfox díky velice dobře zpracovanému a fungujícímu backend řešení, silnému a přívětivému API a vysoké úrovni dospělosti, která navazuje na to proč vzniká velké množství cloudových řešení spolupracujících se Sigfox infrastrukturou. To je také usnadněno díky již zmiňované dokumentaci a dalším výhodám v podobě operátorského provozu této technologie. Druhé místo obsadila technologie LoRa a to díky otevřenému přístupu k vývoji prostřednictvím open-source řešení, které jsou pro tuto technologii vyvíjené a velké míře přizpůsobení rozličným aplikacím. Na třetím místě skončilo NB-IoT

hlavně díky vyrovnaným výsledkům ve všech pod-kritériích. Čtvrtá pozice patří technologii Weightless, která je jednou z nejsilnějších v podobě přizpůsobení individuálním požadavkům uživatele. To je odůvodněno hlavně open-source řešením, které se v poslední době začíná objevovat ve startupových technologiích, jako je NWave nebo Telensa. Pátou pozici získalo WAVIoT, které se může chlubit značnou úrovní dospělosti v podobě dlouholetého fungování v praxi, ale na druhou stranu nedosahuje moc velké úrovně customizace. RPMA skončilo na posledním místě opět i přes značnou zavedenost na trhu má problémy v podobě minimálních možností úprav a jeho serverová řešení nejsou na nejlepší úrovni. Samotná vývojová podpora ze třetích stran samozřejmě závisí hodně na popularitě dané technologie, jejím praktickým řešením a obtížnosti navazovat komunikaci s infrastrukturami technologií širokopásmových sítí.

	Backend a API	Open-source řešení	Možnosti customizace	Úroveň dospělosti	Výsledek	Pořadí
<b>Sigfox</b>	10	5	6	10	7.9615	1
<b>LoRa</b>	6	10	10	6	7.8462	2
<b>NB-IoT</b>	8	8	6	7	7.3077	3
<b>WAVIoT</b>	5	5	8	10	6.5769	5
<b>RPMA</b>	4	5	7	10	5.9231	6
<b>Weightless</b>	5	10	7	6	6.6538	4
<b>Váhy</b>	0.3846	0.1923	0.2692	0.1538		

Tabulka 11 - Vyhodnocení kritéria podpora platform třetích stran (vlastní zpracování)

### ➤ Konfigurace systému

Konfigurace systému poté představuje kritérium zaměřené na samotné nastavování, implementaci a údržbu zařízení ve vybrané síti, rozšířené o topologii, která hraje roli v přípravě jednotlivých zařízení jak po stránce aplikační, tak po stránce umístění představující polohu pro využití jednotlivých senzorů. Pod-kritérii jsou tedy konfigurace koncových zařízení, implementace jednotlivých zařízení do systému komunikační sítě, úroveň složitosti konfigurace aplikačního prostředí na straně poskytovatele a samotná topologie infrastruktury. Všechny tyto faktory mají vliv na vytvoření systému nejen



z hlediska hardwarového, ale zároveň i softwarového a hrají tedy významnou roli ve výběru výsledné technologie.

Pro kritérium konfigurace systému bylo zvoleno čtyř pod-kritérií. Jedná se o konfiguraci koncových zařízení, která obdržela 10 bodů jako nejvíce důležitá, implementace koncových zařízení do systému poskytovatele obdrželo 8 bodů, konfigurace aplikačního prostředí 7 bodů a síťová topologie infrastruktury body pouze 4 vzhledem k menšímu významu v ohledu na konfiguraci systému jako takového.

	<b>Body</b>	<b>Váhy</b>
<b>Konfigurace koncových zařízení</b>	10	0.3448
<b>Implementace KZ do systému</b>	8	0.2759
<b>Konfigurace aplikačního prostředí</b>	7	0.2414
<b>Topologie infrastruktury</b>	4	0.1379

Tabulka 12 - Váhové kritérium konfigurace systému (vlastní zpracování)

V případě tohoto kritéria značně dominuje technologie Sigfox s plným počtem bodů hned ve třech různých pod-kritériích. Jedná se o konfiguraci koncových zařízení, implementaci těchto zařízení do síťové infrastruktury a konfiguraci samotného aplikačního prostředí. Jediná oblast bez plného počtu bodů je topologie infrastruktury, kde vévodí technologie LoRa s tím, že je možné ji nakonfigurovat nejen v podobě typické hvězdicové topologie jako ostatní varianty, ale zároveň umožňuje velice zajímavou mesh topologii přispívající k novým možnostem aplikace těchto sítí. Sigfox tedy skončil na prvním místě. Na místě druhém se nachází technologie NB-IoT, která je následována na třetím místě technologií LoRa a na místě čtvrtém technologií WAVIoT, kdy všechny zmíněné mají velice podobné hodnoty napříč všemi pod-kritérii. Tento fakt je možné vidět i na výsledných hodnotách, které se liší v setinách, popřípadě desetínách. Na pátém místě společně skončily technologie RPMA a Weightless se stejným bodovým ohodnocením. Tento výsledek je značně ovlivněn minimem možností získaných informací vzhledem k jejich privátní povaze a komerčním nasazením bez možnosti náhledu na jednotlivá kritéria z otevřených zdrojů.

	Konfigurace koncových zařízení	Implementace KZ do systému	Konfigurace aplikačního prostředí	Topologie infrastruktury	Výsledek	Pořadí
<b>Sigfox</b>	10	10	10	9	9.8621	<b>1</b>
<b>LoRa</b>	8	6	8	10	7.7241	3
<b>NB-IoT</b>	7	8	8	9	7.7931	2
<b>WAVIoT</b>	6	9	7	9	7.4828	4
<b>RPMA</b>	5	7	5	9	6.1034	5
<b>Weightless</b>	5	7	5	9	6.1034	5
<b>Váhy</b>	0.3448	0.2759	0.2414	0.1379		

Tabulka 13 - Vyhodnocení kritéria konfigurace systému (vlastní zpracování)

#### 4.1.5 Závěrečné vyhodnocení variant LPWAN

Na základě předešlého vyhodnocení srovnání vybraných pod-kritérií a získaných výsledků je sestavena výsledná tabulka variant širokopásmových sítí a jejich příslušných hlavních kritérií, vyhodnocující jednotlivé prvky za pomoci vícekritériální analýzy variant specificky bodovací metody s váhami. Váhové kritérium je v tomto případě vypočteno za pomoci Saatyho matice.

V závěrečném srovnání podle hlavních kritérií bylo pro výpočet jednotlivých vah použito Saatyho metody. Ta poskytuje díky svému kvantitativnímu párovému srovnání kritérií lepší kontrolu nad důležitostí, a tedy preferencí jednotlivých kritérií sloužících ke srovnání vybraných variant širokopásmových technologií. Ta je reprezentována příslušnou Saatyho maticí, která na diagonále, kde jsou jedničky vyjadřuje rovnost kritéria a sebe sama. Ostatní hodnoty již vyjadřují jednotlivé preference mezi zvolenými dvojicemi kritérií. Po vytvoření matice a vypočítání hodnot jednotlivých vah pomocí geometrického průměru jednotlivých preferencí, je možné vidět, že největší vliv v závěrečném srovnání poskytuje kritérium komunikace s hodnotou váhy 0,4311. Následována kritériem nasazení s hodnotou 0,2508. Třetí největší váhou je hodnota pro kritérium konfigurace systému o velikosti 0,2048. Dále kritérium podpory platform třetích stran s hodnotou 0,0717 a na závěr nejmenší váhu má kritérium dokumentace, a to s hodnotou o velikosti 0,0417. Takto

získané váhy jsou následně využity v závěrečném srovnání opět za pomoci bodovací metody s příspěvím váhového kritéria.

	<b>Komunikace</b>	<b>Nasazení</b>	<b>Dokumentace</b>	<b>Podpora platformem třetích stran</b>	<b>Konfigurace systému</b>	<b>Geometrický průměr</b>	<b>Váhy</b>
<b>Komunikace</b>	1	3	5	5	3	2.9542	0.4311
<b>Nasazení</b>	1/3	1	3	5	3	1.7188	0.2508
<b>Dokumentace</b>	1/5	1/3	1	1/5	1/7	0.2857	0.0417
<b>Podpora platformem třetích stran</b>	1/5	1/5	5	1	1/7	0.4911	0.0717
<b>Konfigurace systému</b>	1/3	1/3	7	7	1	1.4034	0.2048

**Tabulka 14 - Váhové kritérium závěrečné zhodnocení (vlastní zpracování)**

Jednotlivá kritéria, zástupci technologií a jejich zhodnocení úspěšnosti v daných oblastech byly vysvětleny v předchozích srovnáních. Pomocí těchto jednotlivých porovnání bylo dosaženo mezivýsledků pro finální komparaci jednotlivých variant podle hlavních kritérií představující komunikaci, nasazení, dokumentaci, podporu platformem třetích stran a konfiguraci systému. Jak je možné vidět na prvním místě se umístila technologie Sigfox díky nejlepšímu hodnocení rovnou ve čtyřech kritériích. Největším podílem je dobře zpracovaná dokumentace, společně s výkonnou serverovou částí a snadnou konfigurací nových zařízení do infrastruktury této technologie. Velice těsně se na druhém místě umístila technologie LoRa, která na druhou stranu disponuje obrovskou komunitní podporou, velikou úrovní možných úprav pro specifická řešení a excelentními komunikačními vlastnostmi pouze s malým omezení velikosti jednotlivých zpráv a neomezeného počtu jejich zaslání v rámci jednoho dne. Třetí místo náleží technologii WAVIoT, která působí zejména na území USA, a to především v komerční sféře. Díky

tomu nemá tak silné zastoupení v podobě komunitních ani oficiálních materiálů a specifické zaměření postrádá jakékoliv větší možnosti úprav. Na čtvrté pozici skončila technologie NB-IoT, která je na území České republiky zavedeným hráčem poskytující solidní infrastrukturu vzhledem k provozu v pásmech LTE. Ovšem použití si v současné době nachází spíše u malých společností nebo operátorů mobilních sítí samotných. Navíc velkým mínusem je malá propustnost v obydlených oblastech, která brání využití u mnoha koncových řešení. Pátá pozice patří technologii RPMA, kde je problémem menší přenosová rychlost, prozatímní nasazení v oblastech mimo Evropu, malá podpora platform třetích stran, kdy je u tohoto řešení využíváno proprietárních aplikací. Jako poslední se na šesté pozici umístila technologie Weightless, kterou nejvíce sráží komunikace zejména v malém počtu připojených zařízení na jednu základní stanici, malý dosah signálu, a to jak v otevřeném prostředí, tak zastavěných oblastech, s čímž je nutné při nasazení počítat. Dále je k dispozici minimální počet materiálů, ze kterých lze při použití těchto zařízení ve vývoji čerpat. V budoucnu snad dojde k vylepšení některých zásadních vlastností vzhledem k tomu, že tato technologie je aktuálně v procesu úprav tohoto síťového protokolu.

	Komunikace	Nasazení	Dokumentace	Podpora platform třetích stran	Konfigurace systému	Výsledek	Pořadí
<b>Sigfox</b>	6.9677	9.6250	9.2500	7.9615	9.8621	8.3933	1
<b>LoRa</b>	9.0323	7.9063	6.8750	7.8462	7.7241	8.3070	2
<b>NB-IoT</b>	7.3226	5.3750	5.7500	7.3077	7.7931	6.8639	4
<b>WAVIoT</b>	6.8387	8.7813	2.8750	6.5769	7.4828	7.2738	3
<b>RPMA</b>	7.5806	3.6875	4.2500	5.9231	6.1034	6.0441	5
<b>Weightless</b>	5.8387	4.0000	2.6250	6.6538	6.1034	5.3562	6
<b>Váhy</b>	0.4311	0.2508	0.0417	0.0717	0.2048		

Tabulka 15 - Závěrečné vyhodnocení vybraných technologií (vlastní zpracování)

Pro přehlednější zobrazení byla přidána tabulka se zaokrouhlenými hodnotami, které nikterak nemění výsledek zhodnocení, ale má pouze grafický účel pro lepší orientaci. Hodnoty byly zaokrouhleny na celá čísla z intervalu 0–10. Výsledek váženého součinu se liší pouze v desetínách a na pořadí nemá tedy zásadní vliv. Jak můžeme vidět ve výsledku technologie Sigfox a LoRa získali velice podobné hodnocení jen s velmi malým rozdílem, odrážejícím neustálý boj těchto dvou technologií o pozici špičky na trhu na území České republiky. Neznamena to však, že použití jedné nebo druhé technologie je možné bezprostředně zaměňovat. Každá z širokopásmových síťových technologií má své specifické vlastnosti určující vhodné použití a k tomu je v praxi nutné přihlížet.

	Komunikace	Nasazení	Dokumentace	Podpora platformem třetích stran	Konfigurace systému	Výsledek	Pořadí
<b>Sigfox</b>	7	10	9	8	10	8.5218	1
<b>LoRa</b>	9	8	7	8	8	8.3894	2
<b>NB-IoT</b>	7	5	6	7	8	6.6615	4
<b>WAVIoT</b>	7	9	3	7	7	7.3348	3
<b>RPMA</b>	8	4	4	6	6	6.2771	5
<b>Weightless</b>	6	4	3	7	6	5.4450	6
<b>Váhy</b>	0.4311	0.2508	0.0417	0.0717	0.2048		

Tabulka 16 - Závěrečné vyhodnocení vybraných technologií v upravené podobě (vlastní zpracování)

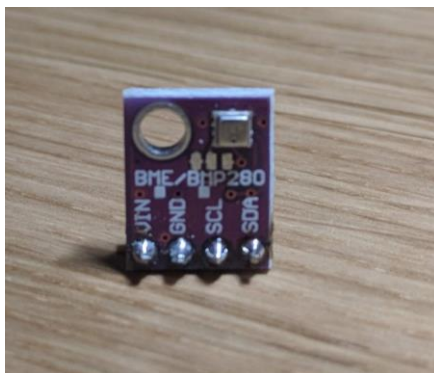
## 4.2 Návrh a vytvoření prototypu senzoru

Druhá kapitola praktické části se zaměřuje na samotný návrh a stavbu prototypu senzoru pracujícím v širokopásmových sítích s nízkou spotřebou. Stavba senzoru se skládá ze dvou hlavních částí. První část je zaměřena na hardwarové prvky senzoru, jako jsou moduly jednotlivých čidel pro měření, vývojová deska představující hlavní řídicí jednotku celého systému, pomocné moduly pro napájení a komunikaci včetně jejich zapojení do finální podoby prototypu senzoru. Druhá část se již věnuje softwarové problematice, kde je popsáno použité vývojové prostředí IDE, samotný program pro měření, sběr a přenos dat ovládající vývojovou desku Arduino, backend prostředí síťové technologie

Sigfox, která byla zvolena na základě provedené vícekritériální analýzy variant, a prostředí pro zobrazení a správu dat Beebotte.

#### 4.2.1 Kombinovaný senzor teploty, tlaku a vlhkosti BME280

Pro základní měření veličin byl použit značně univerzální senzor od společnosti Bosch. Důvodem výběru byly malé rozměry a komplexní řešení v podobě jednoho PCB modulu obsahující vše podstatné. Pro přenos dat může využívat jak I2C, tak SPI protokol. Jedná se o nízkonákladové řešení, které umožňuje měření vlhkosti s přesností na 3 %, měření tlaku s přesností na 1 hPa a teploty s přesností 1 °C. Díky změně tlaku v závislosti na nadmořské výšce je také možné využít tento modul jako výškoměr, a to s přesností do 1 metru. Jedná se o novou generaci senzoru z rodiny BMP085, BMP180 a BMP183, která poskytuje minimalizaci problémů s okolním šumem při měření, a velice rychlé časy převodů jednotlivých naměřených hodnot. Díky vestavěnému regulátoru napětí je možné tento senzor provozovat v intervalu od 3,3 V až do 5 V bez narušení jeho integrity.



Obrázek 14 - Kombinovaný senzor BME280 (vlastní zpracování)

#### 4.2.2 Snímač intenzity svitu BH1750

V návaznosti na rozšíření funkcí senzoru byl dále použit světelný senzor BH1750 obsahující analogově digitální konvertor přímo na desce modulu, který zajišťuje výstup výsledného digitálního signálu bez nutnosti dalších komplikovaných přepočtů. Je tedy značně lepším a jednodušším řešením oproti klasickým fotorezistorům, odesílajícím data v podobě naměřeného napětí a podle této hodnoty jsou zpětně dopočítány skutečné hodnoty svítivosti, pomocí předem stanovených tabulkových převodů a získány potřebné

informace. Právě díky této jednoduchosti a rychlosti samotného senzoru popsané v části teoretické práce byl zvolen jako vhodné rozšíření pro prototyp. Data ze senzoru BH1750 jsou vyjadřována přímo v luxech (lx), tedy jednotce svítivosti. Pro připojení tento senzor používá I2C protokol a provozní napětí je 3,3 V, kdy maximální zatížení může být 4,5 V ovšem jen na krátký čas. Udávaná odchylka měření je maximálně 20 % se standardním měření pohybujícím se kolem 5 %.



**Obrázek 15 - Světelný senzor BH1750 (vlastní zpracování)**

#### **4.2.3 Bateriový modul 18650 Wemos V3**

Bateriový modul slouží jako nosič pro Li-Ion baterii s označením 18650 a přidává jí tak několik nových funkcionalit. Modul je opatřen Micro USB konektorem pro dobíjení baterie v případě potřeby se specifikací napětí 5 V a proudem 500 mA. Dále je modul opatřen standardním USB konektorem typu A, který lze využít pro napájení různorodých externích zařízení v tomto případě opět s maximálním napětím 5 V, ale zvýšenou hodnotou proudu v podobě až 4 A. Nechybí ani indikace nabíjení baterie, indikace probíhajícího stavu nabíjení, obvod zajišťující ochranu proti přebití a obvod pro ochranu proti vybití pod únosnou úroveň. Zejména díky ochranným funkcím byl vybrán jako vhodné rozšíření prototypu senzoru.



Obrázek 16 - Bateriový modul Wemos V3 (vlastní zpracování)

#### 4.2.4 Komunikační modul Wisol SFM10R1

Na základě výsledků z vícekritériální analýzy variant byla pro komunikaci zvolena technologie Sigfox. Specificky se jedná o použití komunikační modul Wisol umožňující provoz v prostředí této širokopásmové sítě. Wisol je vybaven ovládáním pomocí příkazů AT, které značně usnadňují komunikaci po softwarové stránce. Vyžadováno je provozní napětí v maximální hodnotě 3,3 V a spotřeba modulu je upravena na nízkoenergetické použití v podobě TX – 49 mA, RX – 15 mA a v režimu spánku je to pouhých 2  $\mu$ A. Pro připojení k vývojové desce používá UART protokol, který zajišťuje snadné propojení díky dvou datovým vodičům. Vzhledem k rozdělení oblastí, ve kterých Sigfox působí je důležité zmínit, že se jedná o model učený pro oblasti Evropy s označením R1 a je tedy vhodný pro Českou republiku. Samotný modul obsahuje všechny potřebné části a stará se jak o šifrování, tak o samotný přenos dat v jednom. V ceně síťového modulu je dále jedno roční licence pro provoz v síti Sigfox, kterou je možné následně prodloužit po domluvě s poskytovatelem. Funkčnost zařízení je nejprve podmíněna registrací na stránkách samotné společnosti.

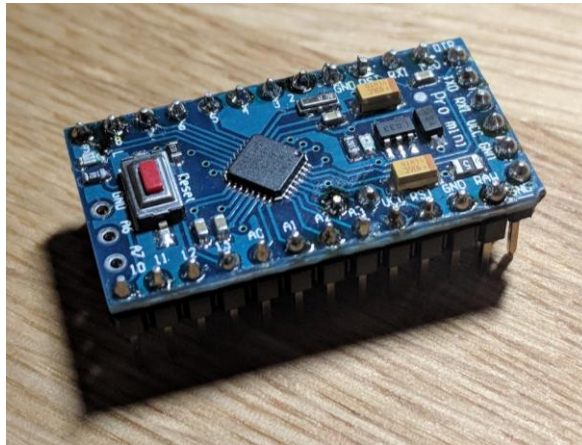




Obrázek 17 - Komunikační modul Wisol pro síť Sigfox (vlastní zpracování)

#### 4.2.5 Vývojová deska Arduino Pro mini

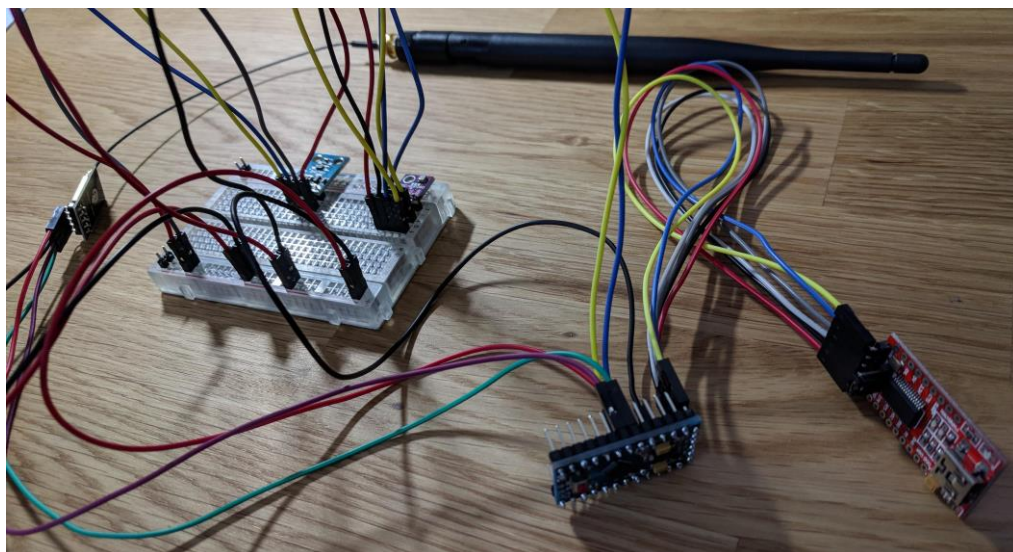
Arduino Pro mini je vývojová deska na bázi mikroprocesoru ATmega 328P. Díky své malé velikosti je vhodná pro rozmanitou škálu projektů, zejména těch, které jsou omezeny místem a spotřebou. Deska obsahuje 14 digitálních výstupních a vstupních pinů, z nichž 6 může být využito jako PWM výstupy. Maximální odběr na jeden pin je 40 mA. Pro analogová zařízení je na desce dostupných 6 analogových vstupních pinů, resetovací tlačítko a resonátor na PCB. Arduino Pro mini je vyráběno ve dvou verzích a to 5 V / 16 MHz nebo 3,3 V / 8 MHz. Verze s nižším napětím je použita pro tvorbu prototypu v této práci, zejména díky vhodné kompatibilitě napětí 3,3 V vyžadované specifikací připojených rozšiřujících modulů. Z hlediska paměti má vývojová deska k dispozici 32 KB, kdy z této hodnoty jsou 2 KB použity na samotný bootloader zařízení. Tento typ vývojové desky byl vybrán oproti například jednodeskovému počítači Raspbery Pi nebo jiným vývojovým deskám hlavně díky malým rozměrům a nízké spotřebě elektrické energie, která je u senzoru napájeném baterií velice důležitá.



Obrázek 18 - Arduino Pro mini (vlastní zpracování)

#### 4.2.6 Propojovací vodiče, nepájivé pole a krabice

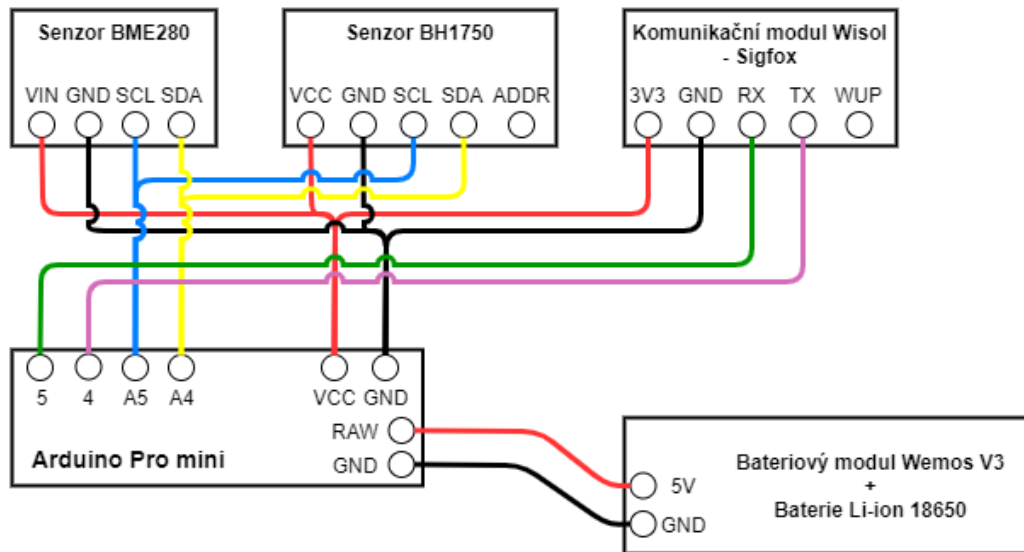
Pro testování a tvorbu prototypu jsou zapotřebí další hardwarové prvky jako propojovací vodiče, nepájivé pole a následně finální krytí v podobě vytvořené krabice. Pro testování zapojení je možné využít vodičů s připravenými konektory, které jsou kompatibilní s piny na vývojové desce, přídatných modulech a samotném nepájivém poli. Nepájivé pole neboli kontaktní nepájivé pole je pomůcka, která umožňuje opakované vytváření, navrhování a testování elektrických obvodů bez potřeby tyto spoje pájet. Skládá se z vodivé a nevodivé části. Samotná vodivá část představuje otvory opatřené kovovými svorkami, které vytvářejí aktivní část nepájivého pole, kdy umožňují pomocí kompatibilních vodičů opakované odpojování a zapojování komponent. Převážná většina prodáváných polí obsahuje část vyhrazenou pro datové přenosy, někdy nazývaná jako část pracovní a zbývající část vyhrazenou pouze pro rozdělování napájení. Neméně důležitým prvkem je i krabice pro uložení výsledného prototypu a umožnění fungování ve venkovních prostorech. Jedná se specificky o krabici Spelsberg 16-L IP55 šedé barvy o rozměrech 130x85x37 mm. Ta je schopna díky ochraně IP55 ochránit svůj obsah proti tryskající vodě a částečně proti vniknutí prachu. Krabice od společnosti Spelsberg byla vybrána pro jednoduchost a zajištění voděodolnosti. Navíc oproti řešení na míru za pomoci dejme tomu 3D tisku je cena velice přijatelná.



Obrázek 19 - Testovací zapojení prototypu (vlastní zpracování)

#### 4.2.7 Zapojení prototypu senzoru

Pro zapojení senzorů je využito protokolu I2C, který je blíže specifikován v teoretické části. Umožňuje připojení až 128 zařízení, a to za pomoci pouze dvou datových vodičů. Pro napájení vývojové desky je využito příslušných pinů RAW a GRN (ground), ke kterým je připojen bateriový modul Wemos V3 zajišťující tak elektrickou energii pro desku a následně pro její přídavné moduly. Jednotlivé senzorické a komunikační moduly jsou napájeny přes výstupní piny GRN a VCC, který všem zařízením poskytuje napětí 3,3 V. Pro datové spojení senzoru BME280 a BH1750 je využito analogových vstupních pinů ve specifikaci SCL – A5 a SDA – A4, kde SCL je časový pin senzorů, SDA představuje samotný komunikační pin a A4, A5 jsou vstupní piny na vývojové desce Arduino. Komunikační modul je opět napájen ze stejné větve desky napětím 3,3 V, které je přivedeno na příslušný pin modulu. Pro zajištění samotného přenosu dat mezi deskou a modulem Wisol je využito TX a RX pinů na obou zařízeních. Konfigurace toho připojení je jednoduchá v podobě kříženého spojení, a tedy TX pin komunikačního modulu je spojen s RX pinem vývojové desky, a naopak TX pin desky je propojen s RX pinem na modulu. V tomto případě jsou jako vysílací a přijímací piny zvoleny digitální 4 a 5 na Arduino desce.



Obrázek 20 - Schéma zapojení prototypu (vlastní zpracování)



Obrázek 21 - Finální uložení prototypu (vlastní zpracování)

#### 4.2.8 Vývojové prostředí Arduino IDE

Pro vytvoření programu pro ovládání senzoru, bylo využito příslušného Arduino IDE jakož to vývojového prostředí pro programovací jazyk Wiring, který je využíván právě pro ovládání vývojových desek na bázi Arduino. Arduino IDE je open-source vývojové prostředí umožňující nejen vytváření příslušných programů, ale zároveň dovoluje tyto

programy nahrávat přímo do paměti desky a následně monitorovat případné výstupy pomocí sériové linky, na kterou je deska k počítači připojena. Velikou výhodou je podpora všech hlavních operačních platforem jako je Windows, Linux a MacOS. Další důležitou funkcionalitou tohoto vývojového prostředí je správa knihoven použitých v jednotlivých vytvořených programech. Umožněno je samotné stahování knihoven, jejich následná správa nebo manuální přidání knihovny v podobě příslušného ZIP souboru.

#### 4.2.9 Vytvořený program řídicí funkce senzoru

Pro samotný program je potřeba čtyř knihoven: Wire.h, BH1750.h, BME280\_I2C.h a SoftwareSerial.h sloužící jednotlivým modulům. Wire.h je knihovna umožňující základní komunikační schopnosti Arduina v podobě implementace základních funkcionalit I2C protokolu. BH1750.h je knihovna určená pro zajištění provozu stejnojmenného světelného senzoru a stejně tak BME280\_I2C slouží kombinovanému senzoru pro inicializaci, měření, sběr a odesílání dat. Poslední knihovna SoftwareSerial.h, která poskytuje komunikační rozhraní mezi vývojovou deskou Arduino a komunikačním modulem Wisol pro síť Sigfox. Na začátek je potřebné vytvoření základních proměnných, definování využívaných pinů a sensorických modulů.

```
#include <Wire.h>
#include <BH1750.h>
#include <cactus_io_BME280_I2C.h>
#include <SoftwareSerial.h>

//nastaveni pinu pro komunikaci pres TX a RX piny modulu
SoftwareSerial sigfox(4, 5);

//luxmetru a tlakomeru
BH1750 luxmetr;
BME280_I2C bme(0x76);

//vytvorene promenne pro merene hodnoty
int8_t humidity = 0;
float temperature = 0;
int16_t lum = 0;
float pressure = 0;

//vedlejsi promenne pro dalsi vyuziti
int16_t temp2, pres2;
int16_t tm = 0;
```

Obrázek 22 - Knihovny a definice proměnných (vlastní zpracování)

Dále následuje funkce SETUP, která je provedena při každém spuštění Arduina. Zde je zahájen provoz sériové linky pro počítač, sériové linky pro komunikaci s modulem Wisol a nechybí ani samotná inicializace jednotlivých senzorů spojená s kalibrací, v tomto konkrétním případě teplotního čidla. Pro vizuální reprezentaci při odesílání zpráv je použito systémové LED diody, která je zde také definována.

```
void setup() {
  //inicializace
  Serial.begin(9600);

  //inicializace komunikacni linky
  sigfox.begin(9600);

  //inicializace senzoru
  luxmetr.begin();
  bme.begin();
  //dovoluje kalibraci senzoru teploty
  bme.setTempCal(-1);

  //inicializace systemove diody s pinem 13
  pinMode(13, OUTPUT);
}
```

**Obrázek 23 - Základní inicializace (vlastní zpracování)**

V opakující se smyčce jsou již zahájeny měření všech příslušných veličin jako je vlhkost vzduchu, teplota, svítivost a tlak. Tento proces je proveden díky funkcím *getHumidity()*, *getTemperature\_C()*, *readLightLevel()* a *getPressure\_MB()*, které jsou součástí příslušných knihoven. Získané hodnoty jsou následně uloženy do předem definovaných proměnných.

```
// získání hodnot ze senzoru
bme.readSensor();
humidity = bme.getHumidity();
temperature = bme.getTemperature_C();
lum = luxmetr.readLightLevel();
pressure = bme.getPressure_MB();
```

**Obrázek 24 - Měření vybraných veličin (vlastní zpracování)**

Následně je provedena úprava hodnot proměnných teploty a tlaku z důvodu optimalizace pro odeslání přes komunikační modem, které probíhá v hexadecimálním formátu. Teplotní hodnota je tedy vynásobena 100, aby došlo k odstranění desetinného

čísla. Pro hodnotu tlaku je proveden podobný proces, kdy je od hodnoty nejprve odečteno 900 pro snížení počtu cifer a následně opět vynásobeno 100 pro odstranění desetinného místa, vznikne tak celé číslo. Tento proces se netýká proměnných vlhkosti a svítivosti, protože jsou měřeny přímo v rozsahu celých čísel.

```
//optimalizace teploty a tlaku pro odeslani
temp2 = (temperature * 100);
pres2 = ((pressure - 900) * 100);
```

**Obrázek 25 - Optimalizace dat pro odeslání (vlastní zpracování)**

Pro testovací účely následuje výpis naměřených hodnot do sériové linky. Jedná se o tři výpisy představující výstupní naměřené hodnoty ze senzorů, ten samí výpis, ale s upravenými hodnotami u proměnných, které to vyžadují, a nakonec výpis hodnot v šestnáctkové soustavě představující pozdější tvar zprávy pro odeslání do sítě Sigfox.

```
//testovací vypis namerene hodnoty
Serial.print(humidity); Serial.print(" % ");
Serial.print(temperature); Serial.print(" C ");
Serial.print(lum); Serial.print(" lx ");
Serial.print(pressure); Serial.println(" hPa");

//testovací vypis s upravenou teplotou a tlakem
Serial.print(humidity); Serial.print(" % ");
Serial.print(temp2); Serial.print(" C ");
Serial.print(lum); Serial.print(" lx ");
Serial.print(pres2); Serial.println(" hPa");

//testovací vypis v HEX formatu - jednotlivé hodnoty
Serial.print("Values in HEX: ");
Serial.print(humidity, HEX); Serial.print(" ");
Serial.print(temp2, HEX); Serial.print(" ");
Serial.print(lum, HEX); Serial.print(" ");
Serial.println(pres2, HEX);
```

**Obrázek 26 - Testovací výpis hodnot do sériové linky (vlastní zpracování)**

Pro zmenšení chybovosti senzorů je následně vytvořen rozhodovací strom, který zajišťuje tři nezávislá měření před samotným odesláním dat do sítě. To je zajištěno využitím jednoduchého počítadla v podobě proměnné s označením tm, která reprezentuje počet provedených měření.

```

if (tm == 2){
    //volani funkce pro odeslani hodnot
    sendMessage();
    //delay po odeslani
    delay(500);
    //reset pocitadla
    tm = 0;
    //delay po odeslani 15 minut - interval mereni
    delay(900000);
}
else{
    //pricteni urcene hodnoty po mereni
    tm = tm + 1;
    // delay po mereni
    delay(1000);
}

```

**Obrázek 27 - Rozhodovací část pro tři nezávislá měření (vlastní zpracování)**

Při třetím průchodu a tedy finálním měření je následně volána funkce sendMessage() zajišťující odeslání dat pomocí modulu Wisol směrem do serverové části infrastruktury Sigfoxu. Samotná funkce se skládá z několika částí zajišťující sepnutí diody pro fyzické upozornění o odesílání, následné vytvoření pole představující zprávu, která obsahuje hexadecimální vyjádření jednotlivých veličin a odeslání této zprávy prostřednictvím AT příkazů. Zpráva je tvořena jedním bajtem pro vlhkost, dvěma pro teplotu, dvěma pro svítivost a dvěma pro tlak. Výsledný řetězec je tedy dlouhý 14 znaků. Pro testovací účely opět nechybí ani výpis celého hexadecimálního pole zprávy v příslušném formátování a dvě na sebe navazující smyčky, které kontrolují, zda odeslání proběhlo úspěšně. Z důvodu přehlednosti je zde uvedena jen část funkce. Kompletní část kódu bude umístěna v příslušné kapitole přílohy.



```

//vlozeni namerenych hodnot do bufferu - formatovani potrebnych cifer
char message[12];
sprintf(message, "%02X%04X%04X%04X", humidity, temp2, lum, pres2);

//vypsani kontrolniho retezce do seriove linky
Serial.print("Message in HEX: ");
Serial.println(message);

//delay po vypsani kontroly
delay(500);

//zacatek prikazu AT pro odeslani do Sigfox
sigfox.print("AT$SF=");

//retezec hodnot 8 16 16 16
sigfox.print(message);

//ukonceni retezce
sigfox.print("\r");

```

Obrázek 28 - Hlavní část funkce pro odeslání dat (vlastní zpracování)

#### 4.2.10 Nastavení serverového rozhraní Sigfox infrastruktury

Administrativní neboli serverová část síťové infrastruktury Sigfox je tvořena platformou s názvem Sigfox Cloud aktuálně ve verzi 9.1, která byla vydána v lednu roku 2020. Pro přístup do této platformy se využívá odkaz *backend.sigfox.com*. Nejprve je však nutné dokončení registrace uživateli a příslušného zařízení. Pro proces registrace slouží stránka *buy.sigfox.com/activate*, kde je uživatel postupně veden několika částmi registračního procesu, který je vázán na ID a PAC koncového zařízení a s ním spojeného uživatelského účtu. Registrace začíná zadáním ID a PAC čísla do formuláře, kdy je zkontrolován formát a zda jsou data platná. Následuje vybrání země, v které bude zařízení operovat a pokud ještě uživatel nemá vytvořen účet, umožňující přiřazení zařízení, je vyzván k tomuto kroku. Účet je aplikačním prostředím reprezentovaný jako skupina (group) obsahující alespoň jeden typ zařízení (device type), které mohou být dále podle svých jednotlivých atributů rozděleny do rodin (family).

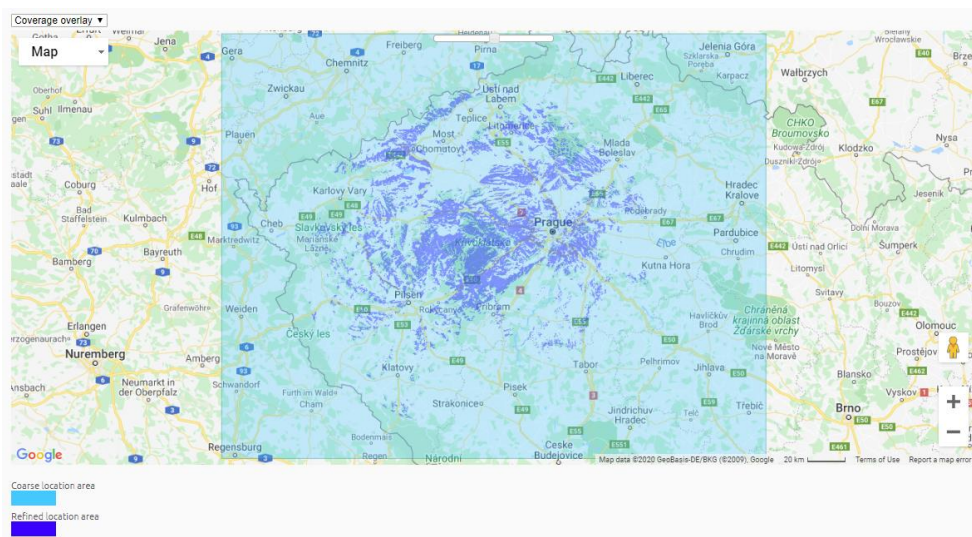
Po registraci je již možné přistoupit do samotného cloudového prostředí a správy koncových zařízení. Toto prostředí nabízí mnoho možností a funkcionalit, které jsou rozděleny do jednotlivých sekcí. Pro správu zařízení slouží záložka device, kde je možné

nalézt seznam zaregistrovaných koncových zařízení připadajících danému účtu. Zde jsou přehledně zobrazeny obecné informace připadající jednotlivým zařízením, jako je jejich komunikační stav, typ, skupina, do které zařízení spadá, ID, jméno a kdy naposledy zařízení komunikovalo s aplikační vrstvou Sigfoxu.

Communication status	Device type	Group	Id	Last seen	Name	Token state
	LPWANcz_DevKit_1	Bárta		2020-03-08 07:33:47	Sensor_001	<input checked="" type="checkbox"/>

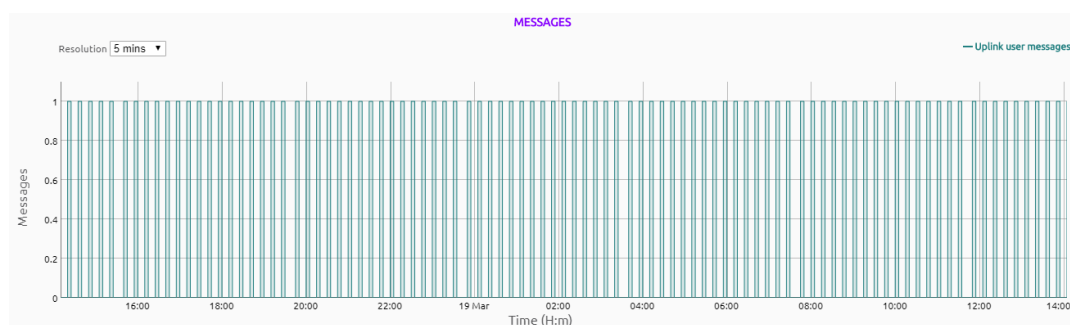
**Obrázek 29 - Informace o zařízení v prostředí Sigfox (vlastní zpracování)**

Ze základního zobrazení lze přejít přímo na detail zařízení, kde se zobrazí kompletní informace o přiřazených zařízeních ve velice podrobném výpisu, společně s údaji o certifikaci modemu a samotném koncovém zařízení, kde je možné vidět i jeho operační prostor včetně síly signálu posledního kontaktu. Dále je možné využít položku *location*, která již samotným názvem napovídá o tom, že zobrazuje polohu zařízení v podobě mapového rozvržení. Tento údaj je však pouze orientační a poloha zařízení je na mapě vyznačena s velkým rozptylem, díky určení pomocí základních stanic, které přijaly signál od koncového zařízení.



**Obrázek 30 - Lokalizační mapa Sigfox (vlastní zpracování)**

V záložce messages je možné sledovat jednotlivé zprávy obdržené od koncového zařízení, kde je uveden datum a čas, kdy byla zpráva obdržena systémem, obsah zprávy v podobě hexadecimálního řetězce, hodnoty v decimálním vyjádření s popisem, síla signálu přijaté zprávy, status callbacku a odkaz na zobrazení polohy zařízení ze sekce location. Dalším informativním odkazem je položka events, která obsahuje důležité údaje a upozornění týkající se jednotlivých zařízení. Tím může být první úspěšné spuštění zařízení následované komunikací s infrastrukturou, první úspěšně přijatá zpráva nebo varování v podobě podezřele vypadajícího obsahu zprávy s bezpečnostním rizikem. Pro přehledné zobrazení operací zařízení v čase slouží položka statistics obsahující čtyři časové grafy, zaměřující se na počet přijatých zpráv, počet přijatých bajtů v jednotlivých zprávách, průměrnou hodnotu poměru mezi silou signálu a jeho šumem (SNR) a na závěr indikaci síly signálu přijatých zpráv (RSSI). Význam indikátorů signálu je podrobně vysvětlen v teoretické části práce.



**Obrázek 31 – Ukázka statistiky o přijatých zprávách (vlastní zpracování)**

S ohledem na správu a operace zaměřující se na přijaté zprávy je nejdůležitější funkcí možnost vytváření takzvaných callbacků, které slouží nejen k překladu zpráv, ale následnému přesunu přijatých dat do klientské infrastruktury. Callback představuje dotaz pomocí http žádosti v podobě jednosměrného oznámení. Každý vytvořený callback aplikačním prostředím Sigfoxu je vázán na specifický typ zařízení a pouze touto cestou je možné dostat jednotlivá data do cílového systému, kde jsou využívána. Ve chvíli, kdy Sigfox cloud obdrží zprávu z vysílajícího koncového zařízení v krátkém časovém okamžiku generuje callback zprávu a odesílá ji pomocí specifikovaných pravidel na uživatelský server nebo platformu. Takový to typ zpracování je výhodný zejména pro odbourání nutnosti kontroly zisku nových dat, kdy data nově obdržená naopak spouštějí

automatický proces odeslání. Samotný callback se vytváří pomocí příslušného formuláře, ve kterém je nutné specifikovat jednotlivé položky jako je typ callbacku, kanál, konfigurace obsahu zprávy (payload), URL pro koncovou infrastrukturu, typ metody http a velice důležité formátování, které očekává cílová platforma v podobě json kódu.

K příjmu dat z vytvořeného senzoru bylo potřeba užít callbacku typu data/uplink v podobě kanálu URL, specifikována byla struktura zprávy ve tvaru 7 bytů představující 1 byte pro hodnotu vlhkosti a následně vždy 2 byty pro hodnoty teploty, svítivosti a tlaku. Jako přístupové URL je použito odkazu na API cílové infrastruktury Beebotte, která používá http metodu post a přístup zajišťuje jedinečný vygenerovaný token. Následně nechybí i příslušně naformátovaný json kód, který koresponduje s vytvořeným kanálem ve službě Beebotte.

**Device type LPWANcz\_DevKit\_1 - Callback edition**

Callbacks

Type: **DATA** | **UPLINK**

Channel: **URL**

Send duplicate:

Custom payload config: hum::uint:8 temp::uint:16 lum::uint:16 pres::uint:16

URL syntax: `http://host/path?id={device}&time={time}&key1={var1}&key2={var2}...`  
Available variables: device, time, duplicate, snr, station, data, avgSnr, lat, lng, seqNumber, deviceTypeId  
Custom variables: customData#hum, customData#temp, customData#lum, customData#pres

The feature 'send duplicate' and the following information: duplicate, avgSnr, lat and lng will not be available anymore for customers in the DATA callback feature (see "Custom Callbacks creation" and "Callbacks and Connectors" articles)

The information RSSI, SNR and station will be available through option. Contact your local Sigfox operator for more details.

Uri pattern: `https://api.beebottle.com/v1/integration/sigfox/data`

Use HTTP Method: **POST**

Send SNI:  (Server Name Indication) for SSL/TLS connections

Headers: X-Auth-Token: token [REDACTED]

header	value
X-Auth-Token	token [REDACTED]

Content type: **application/json**

Body

```
{
  "device": "{device}",
  "time": {time},
  "resources": {
    "Humidity": {customData#hum},
    "Temperature": {customData#temp},
    "Luminosity": {customData#lum},
    "Pressure": {customData#pres}
  }
}
```

OK Cancel

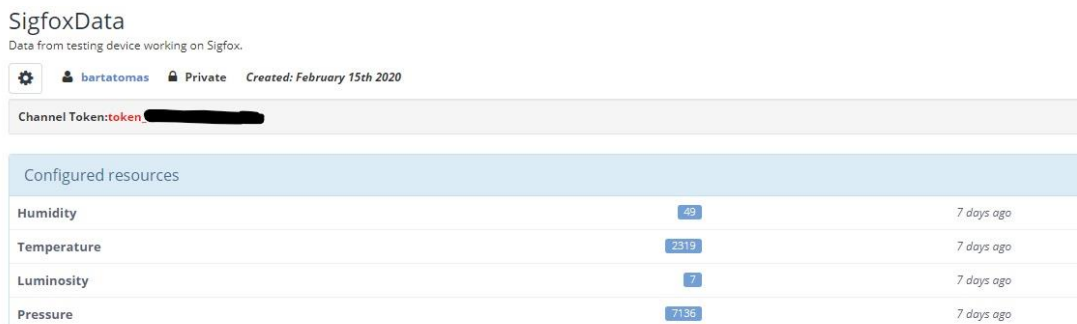
**Obrázek 32 – Vytvořený callback pro odeslání zpráv (vlastní zpracování)**

Mimo použité platformy Beebotte podporuje Sigfox Cloud všechny hlavní IoT infrastruktury jako je AWS IoT, AWS Kinesis, Microsoft Azure Event Hub, Microsoft

Azure IoT Hub a IBM Watson IoT platform. Postupem času však vznikají nová řešení s navyšující se popularitou této síťové technologie.

#### 4.2.11 Prostředí cloudové platformy Beebotte

Beebotte představuje cloudovou platformu pro objekty propojené sítěmi internetu věcí v reálném čase. Poskytující takzvanou PaaS (Platform as a Service), což představuje cloud computing služby umožňující uživatelům vývoj, chod a správu jejich aplikací bez nutnosti budování komplexních systémů a vysokých výdajů při tvorbě vlastních infrastruktur. Právě díky tomu je vhodnou volbou pro prototypový senzor vytvořený v této práci. Platforma tedy poskytuje podporu pro správu dat a jejich následnou prezentaci z různorodých aplikací reálného světa. Díky rozvinutému API, WebSockets a MQTT nabízí silný nástroj pro manipulaci s velkým množstvím dat generovaných právě objekty LPWAN sítí. Na stránkách společnosti je velice dobře popsána dokumentace včetně značného množství návodů a demoverzí pro počáteční seznámení s platformou. Po zaregistrování je nejprve nutné vytvořit kanál (channel) sloužící jako vodící prvek pro jednotlivé hodnoty získané ze síťové infrastruktury, v tomto případě společnosti Sigfox. Pro každý kanál je vygenerován jedinečný token, který slouží pro identifikaci při provádění již zmiňovaných callbacků. Obsahem jednotlivých kanálů je název, krátký popis a jednotlivé zdroje (recourses), které představují proměnné pro přijímaná data. Pro použití s vytvořeným prototypem senzoru je nakonfigurováno čtyř hodnot zdrojů, jeden pro každou měřenou veličinu. U jednotlivých zdrojů je potřeba specifikovat jejich název, který musí být stejný s názvem použitým ve formátování json kódu pro callback. Dále je možné určit krátký popis veličiny, její datový typ a povolit nebo zakázat funkci SoS (Send on Subscribe), která umožňuje automatické odeslání přijatých dat ve chvíli, kdy klient začne odebírat vytvořený zdroj.



Obrázek 33 - Vytvořený kanál pro ukládání přijatých dat (vlastní zpracování)

V práci byl vytvořen a použit kanál obsahující zdroje pro proměnné vlhkosti, teploty, svítivosti a tlaku. Vzhledem k tomu, že data v případě teploty a tlaku byla před odesláním nejprve upravena, je v prostředí Beebotte tyto data modifikovat zpět. K takovýmto úpravám dat slouží příslušná funkce zvaná BeeRules, která umožňuje vytváření pravidel nad datovou základnou, přičemž je možné data upravovat už při přijetí do cloudové platformy a zapisovat je již ve finální podobě. V praxi bylo použito dvou pravidel jedno se zaměřuje na hodnotu teploty a finalizuje ji vydělením stem. Druhé pravidlo následně vydělí stem přijatou hodnotu tlaku, a přičte k ní devět set, které byly před odesláním odebrány z důvodu optimalizace. Funkce BeeRules je prozatím v beta verzi, ale při použití v současném stavu funguje dostatečně a spolehlivě.

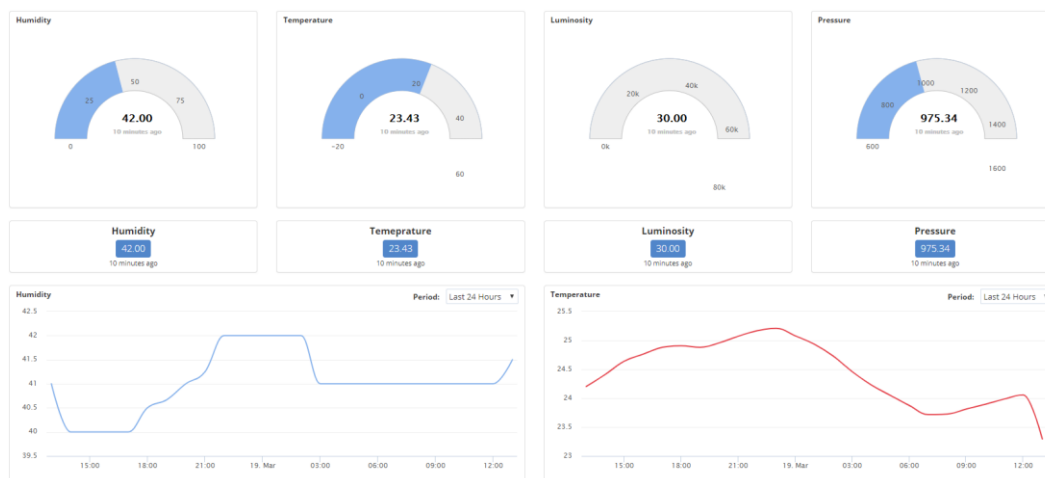
Beerules Recipes New Beerule Recipe

Create and manage your Beerules recipes

NAME	LAST MODIFIED	TRIGGER	CONDITION	ACTION
test <span>Enabled</span>	February 18th 2020	<a href="#">on write to SigfoData.Temperature</a>	<span>if</span> None	<a href="#">write</a> trigger.data / 100 <a href="#">to</a> SigfoData2.Temperature
Pressure conversion <span>Enabled</span>	February 18th 2020	<a href="#">on write to SigfoData.Pressure</a>	<span>if</span> None	<a href="#">write</a> ( trigger.data / 100 ) * 900 <a href="#">to</a> SigfoData2.Pressure

**Obrázek 34 – Pravidla pro zpětný převod hodnot (vlastní zpracování)**

K vytvoření přehledu získaných dat ze senzorů slouží funkce dashboard, umožňující jednotlivé veličiny zobrazit v grafické podobě přijatelné uživateli. K prezentaci dat slouží několik základních prvků, které lze na dashboard umisťovat v podobě widgetů. Může se jednat o časový panel, textové pole, základní zobrazovací jednotku, časový graf, časový graf zahrnující více veličin najednou, měřidlo se stupnicí, tabulku nebo teplotní mapu.



**Obrázek 35 - Ukázka grafického výstupu platformy Beebotte (vlastní zpracování)**

Ve webovém prostředí služby je samozřejmě možné nastavení, popřípadě úprava uživatelského profilu, dovolující přechod mezi jednotlivými plány předplatného, které se odvíjejí od množství přenesených a uložených dat. Dále je možné zobrazení jednotlivých statistik týkajících se přenesených, zpracovaných dat a zatížení využitím této cloudové platformy. Detailně je zde vedena množství doručených zpráv, využití v podobě publikování, čtení a zápisu dat vázaných na určené časové intervaly. Pro testování jednotlivých funkcí Beebotte je možné využít příslušné virtualizované konzole (Beebotte console), která umožňuje vytváření testovacích zpráv, pravidel a simulování různých akcí souvisejících s manipulací přijatých dat.

## 5 Výsledky a diskuse

Následující část se věnuje ekonomickému zhodnocení vytvořeného prototypu senzoru, jeho srovnání s komerčním řešením, dále možností modifikace vytvořeného prototypu a nechybí ani výsledná diskuse nad závěry zhodnocených vybraných technologií širokopásmových sítí.

### 5.1 Ekonomické zhodnocení prototypu

Kapitola ekonomického zhodnocení se věnuje vyčíslení a popsání nákladů spojených s tvorbou vytvořeného prototypu senzoru. Základním prvkem představující mozek celého senzoru je vývojová deska Arduino. Vzhledem k velkému množství využití a možností úprav pro různorodé projekty a řešení je cena velice přívětivá a z mého pohledu opodstatněná. Jedná se o jednorázovou investici, která navíc může sloužit v budoucnu dalším účelům prototypování celé řady nových zařízení. V případě senzorů se cena odvíjí hlavně od požadavků na jejich funkčnost vycházející z potřeb koncového řešení, a tedy druhem měřené veličiny. Multifunkční senzor BME280 pro měření vlhkosti, teploty a tlaku je jedním z nejčastěji používaných a ověřených senzorů pro tyto účely, nacházející se v současné době na trhu. Navíc tento senzor umožňuje sledování čtvrté veličiny, kterou je nadmořská výška, dopočítávána z hodnoty tlaku příslušným převodem z předem stanovených hodnot a poskytuje tak senzoru ještě větší komplexnost v podobě další funkce. Vyšší cenová hladina tedy odpovídá jeho vlastnostem a kvalitě. Druhý senzorický modul v podobě BH1750 je zhruba o polovinu levnější, nižší cena je zapříčiněna užší specializací v podobě snímání jen veličiny svítivosti okolního světla. Opět se však jedná o senzor běžně užívaný, a proto snadno dostupný. U sestaveného prototypu je velice podstatným rozšířením vývojové desky komunikační modul Wisol, který je dodáván společně s připraveným programátorem a vysílací anténou. V koncové ceně je zahrnuta jednorozční licence pro provoz v širokopásmové síti Sigfox, kterou je následně možné prodloužit nebo obnovit po domluvě přímo se společností nebo jejími partnery. Tvoří tak nejvyšší cenu v rozpočtu, ale vzhledem k prodeji v podobě kompletního balíčku připraveného k okamžitému použití se cena 533 Kč nejeví jako špatná investice i v porovnání s ostatními komunikačními moduly, které se na trhu vyskytují. Pro napájení senzoru byla zvolena baterie Li-ion 18650, u které je vhodné zvážit volbu v případě použití



většího počtu kusů, vzhledem k její ceně. U tohoto prototypu je však vhodnou volbou s cenou 145 Kč za jeden kus. Pokud jsou tyto baterie pořízeny z ověřených zdrojů, je jejich kvalita vzhledem k celkové ceně jednoznačným přínosem. Pro zapojení baterie do obvodu prototypu, obohacení o funkce ochrany před přílišným nabitím nebo vybitím a snazší možnost nabíjení, bylo použito bateriového modulu Wemos V3. Tento modul navyšuje celkovou cenu o 91 Kč, ale na druhou stranu přidává nové funkcionality v podobě šetrného nabíjení samotné baterie a různé druhy ochrany, což může předcházet větším investicím při nutné výměně komponent zničených v průběhu testování a provozu. Neméně důležitou je i krabice tvořící ochranný prostředek při použití prototypu senzoru ve venkovních prostorech. Tato položka tvoří minimální částku v celém rozpočtu, a to zejména díky využití standardně prodávané a využívané krabice od společnosti Spelsberg, která je využívána v povrchových rozvodech elektroinstalace. Pro další vývojovou verzi senzoru bych chtěl navrhnout uložení fyzického vybavení na míru, které bude mít za následek navýšení nejen finančních nákladů, ale zároveň časové dotace nutné pro vytvoření takového řešení. Tyto zmíněné komponenty tvoří hardwarovou část prototypu senzoru, která je z finančního hlediska náročnější oproti stránce softwarové, a to hlavně z důvodu využití příslušného Arduino IDE, které je poskytováno jako open-source řešení a nepodléhá tak žádným poplatkům. Co se týká dalších aplikačních prostředků je využito zejména cloudové platformy Beebotte, která umožňuje zobrazování získaných dat ze senzoru. Beebotte je v základním provedení poskytován zdarma, a to za předpokladu dodržení limitu 1500000 zpráv v jednom měsíci. Tato hranice je zcela vyhovující pro použití i z několika senzory natož s jedním funkčním prototypem. Nutné je také zmínit, že i přes licenci obsaženou s komunikačním modulem Sigfox v relativně dobré cenové hladině bude v budoucnu nutné investovat do obnovení, které se může pohybovat ve stejné cenové relaci nebo dokonce výše. V současné době nemá společnost Sigfox dostupné veřejné informace o licenčních cenách, ale v budoucnu plánuje zavedení licenčního programu pro testovací a vědecké účely, které by mohlo mému řešení napomoci ke snazšímu docílení prodloužení komunikační licence. Podstatné je zmínit, že v ceně této licence je využívání samotné infrastruktury společnosti Sigfox a přístup do jejich serverové části, kde je řešeno přijímání a odesílání jednotlivých zpráv. Pro samotný proces testování a zavedení do provozu bylo nutné dalších malých investic v podobě propojovacích vodičů, nepájivého pole a USB mini kabelu pro propojení s počítačem. Nákladová cena těchto

položek činní 320 Kč, která ale nemusí být nezbytně součástí celkové ceny prototypu senzoru. Výhodou je následná možnost opětovného použití těchto prvků při prototypování jiných senzorických zařízení. Na závěr je nutné zmínit, že celkové vyčíslení odpovídá jedné jednotce vytvořeného prototypu, kdy zde nejsou zahrnuty náklady v podobě práce, která byla pro sestavní prototypu zapotřebí. Pokud by v budoucnu byla řešena výroba více senzorů najednou je jasné, že ceny jednotlivých komponent by se mohli značně snížit v podobě nižší ceny za kus při odběru většího množství. Cena výsledného senzoru se může dále lišit z jeho poskytnutou funkcionalitou. V některých případech potřebujeme měřit pouze jednu specifickou veličinu, a v jiných případech několik určitých veličin vázaných na dané využití. Tato variace funkcí senzorů má samozřejmě vliv na výslednou cenu jednotlivých řešení, která jsou vytvářena dle potřeb individuálních aplikací.

	<b>Cena</b>
<b>Arduino Pro mini</b>	225.00 Kč
<b>BME280</b>	450.00 Kč
<b>BH1750</b>	294.00 Kč
<b>Wisol – sigfox</b>	533.00 Kč
<b>Bateriový modul Wemos V3</b>	91.00 Kč
<b>Baterie Li-Ion 18650</b>	145.00 Kč
<b>Krabice spelsberg</b>	40.00 Kč

Tabulka 17 - Vyčíslení nákladů hlavních komponent prototypu senzoru (vlastní zpracování)

	<b>Cena</b>
<b>Propojovací vodiče</b>	50.00 Kč
<b>Nepájivé pole</b>	120.00 Kč
<b>Mini USB kabel</b>	150.00 Kč

Tabulka 18 - Vyčíslení nákladů přidružených komponent (vlastní zpracování)

### 5.1.1 Porovnání s komerčním řešením

Díky vzrůstající popularitě internetu věcí a značné poptávce po různorodých senzorech je na trhu velké množství specificky zaměřených čidel a méně víceúčelových zařízení sloužící pro měření většího počtu veličin. V tomto případě se dá připodobnit

vytvořený prototyp senzoru spíše k zařízení konkurující meteorologickým stanicím a podobným zařízením sledující komplexnější vývoj více veličin v jednom okamžiku. Pro porovnání s komerčním řešením jsem si nakonec vybral zařízení od české společnosti Zooco. Ta nabízí několik typů čidel jako jsou pohybové senzory, bezdrátové spínače, měřiče spotřeby vody, elektřiny, senzory pro měření teploty nebo kvality ovzduší. Vzhledem k povaze vytvořeného prototypu je srovnání zaměřeno na samotné teplotní čidlo a modul měřící kvalitu ovzduší. V případě teplotního čidla je nabízené měření zajišťováno bezdrátovou jednotkou, která stejně jako prototyp funguje v prostředí širokopásmové sítě Sigfox. Hodnoty jsou měřeny každých 30 minut a jejich přehled je možné sledovat pomocí webového rozhraní nebo mobilní aplikace Zooco. Senzor je schopen měřit v rozsahu -55 až 125 °C, a navíc nabízí možnost umístění teplotního čidla až do vzdálenosti 1 m od řídicí jednotky díky poskytovanému kabelu. Cena samotného teplotního čidla s názvem Pingu je 2250 Kč, ke které je nutné připočítat dalších 290 Kč nutných k pokrytí licenčního poplatku pro provoz zařízení na jeden rok. Jak můžeme vidět cena je oproti prototypu značně vyšší i přesto, že toto čidlo nemá multifunkční užití a je zaměřeno jen na měření teploty. Tento rozdíl je nejvíce tvořen právě nutným zvýšením ceny z ohledu na prototypování, výrobu a tvoření aplikačního prostředí, které je spolehlivé a bezpečné.

	<b>Prototyp senzoru</b>	<b>ZOOCO senzor</b>
<b>Interval snímání</b>	15 minut	30 minut
<b>Rozsah měření teploty</b>	od -40 do 85 °C	od -55 do 125 °C
<b>Přesnost měření</b>	1 °C	1 °C
<b>Použitá frekvence</b>	868 MHz	868 MHz
<b>Komunikační infrastruktura</b>	Sigfox	Sigfox
<b>Cena</b>	1778 Kč	2250 Kč

**Tabulka 19 - Základní charakteristiky prototypu senzoru a komerčního řešení (vlastní zpracování)**

Druhá stránka věci je, že i přes vzrůstající tendenci počtu výrobců zabývajících se touto problematikou, konkurence není až na výjimky příliš silná, z důvodu značně rozličných oborů a specializací, ve kterých se tyto senzory uplatňují. Na trhu je sice velký počet výrobců, ale každý z nich s trochu jiným zaměřením. Proto si jednotlivé společnosti mohou dovolit nabízet lehce dražší zařízení s vyšší úrovní marže. V případě modulu pro

měření kvality vzduchu společnost nabízí čidlo měřící vlhkost a teplotu okolního vzduchu rozšířenou o monitorování koncentrace CO<sub>2</sub>. Tento model senzoru stojí 4180 Kč se započítanou roční licencí na provoz čidla v hodnotě 190 Kč. Pokud bychom senzoru odebrali schopnost měření koncentrace CO<sub>2</sub>, je toto čidlo víceméně porovnatelné s vytvořeným prototypem. V tu chvíli se cena od společnosti ZOOCO může zdát vysoká. Ovšem pokud vezmeme v potaz právě měření oxidu uhličitého, je výsledná cena s největší pravděpodobností opodstatněná. Důvodem je cena plynových senzorů, které jsou schopny CO<sub>2</sub> spolehlivě a přesně zaznamenávat. A opět je nutné vzít v potaz navýšení ceny v podobě zakomponování vynaložených nákladů na vývoj a údržbu celého řešení.

Jak jsem již naznačil, velice blízko má vytvořený prototyp také k meteorologickým stanicím, které se stejně tak zaměřují na měření většího počtu veličin týkajících se faktorů podnebí. Jako příklad může sloužit meteorologická stanice Netatmo, která poskytuje měření a sběr dat zastupující teplotu, vlhkost, tlak, koncentraci CO<sub>2</sub> a úroveň hluku. V tomto případě však zařízení díky svému zaměření na domácí prostředí nevyužívá širokopásmových sítí, ale je připojeno do internetové sítě pomocí Wi-fi, což zamezuje možnosti měření vzdálených a nepřístupných míst. Naproti tomu sestavený prototyp poskytuje vysokou míru variability v podobě nezávislosti na umístění a poloze senzoru. Samotná základní stanice Netatmo stojí přibližně čtyři tisíce korun a je ji možné rozšířit o další moduly se specifickými účely, jako je ovládání topných hlavic, zabezpečovací prvky nebo protipožární senzory.

Na závěr této kapitoly bych chtěl upozornit, že přímé porovnání v této oblasti je obtížné, především díky velkým rozdílům ve specializaci jednotlivých řešení. Je nutné zdůraznit, že při komerčním prodeji těchto zařízení vzrůstá rapidně cena při započtení nutné práce a výrobních procesů. Na druhou stranu, pokud je řešení dobře a robustně navrženo není problém při masové výrobě naopak výslednou cenu snížit, což společnosti dovoluje vyšší zisk na jeden produkt. Jak je možné vidět výsledná cena prototypu senzoru 1778 Kč je odůvodněná a odvíjí se od použitých komponent. V tomto případě není do celkového nákladu započtena cena práce a potřebných nástrojů k výrobě.

## 5.2 Možnosti modifikace

Vzhledem k vytvoření prototypu senzoru se nabízí také otázka jeho možné modifikace, budoucího rozšíření a využití. Proto budou v následující kapitole probrány možnosti modifikace a možných změn. Hlavním faktorem možných modifikací je určené použití senzoru, prostředí, kde senzor operuje a funkce, které jsou od něho očekávány. V případě vytvořeného prototypu umožňuje použití vývojové desky Arduino Pro mini připojení velkého množství různých typů rozšiřujících modulů. Pro komunikaci mezi deskou a jednotlivými moduly je použito komunikačního protokolu I2C dovolující připojit až 128 zařízení za pomoci dvou datových vodičů, což přispívá k zachování malých rozměrů koncového zařízení. Samotný prototyp poskytuje vcelku komplexní funkčnost v podobě měření čtyř veličin vlhkosti, teploty, svítivosti a tlaku. Vzhledem k tomu se velmi dobře hodí pro monitorování vnitřního i venkovního prostoru se zaměřením na atmosférické podmínky. Právě kvůli funkčnosti a na základě teoretických i praktických zkušeností z diplomové práce bych v budoucnu chtěl senzor opatřit čidlem pro snímání koncentrace CO<sub>2</sub>, který je jednou z hlavních veličin při monitorování například pracovních prostor.

Plynové senzorické moduly jsou ovšem velice cenově nákladné, kdy spolehlivé, kvalitní a s dlouhou životností začínají na cenové hladině přibližně dvou tisíc korun. Při případném použití senzoru v rizikových prostředích je možné přidání specializovaných čidel pro detekci různých typů plynů a chemikálií, u kterých se cena odvíjí od jednotlivých veličin, které je nutné měřit. Další úvahou je přidání tříosého akcelerometru spojeného s gyroskopem, který může sloužit pro sledování pohybujících se objektů nebo jako bezpečnostní prvek ve chvíli, kdy je senzor upevněn na příslušném místě umožňuje sledovat případné narušení nebo nežádoucí pohyb senzoru. Dobrou rozšiřující funkcí by mohl také poskytnout zvukový senzor opět pro monitorování nežádoucího zásahu nebo jako opatření pro sledování hlučnosti pracovního nebo domácího prostředí. Pro rozšíření sběru dat světelných hodnot by bylo možné přidání senzoru pro sledování UV záření, který by opět prototyp obohatil o novou veličinu související s podnebím v tomto konkrétním případě venkovního prostředí. Co se týká venkovního využití například v zemědělství, není problém opatřit prototyp modulem pro snímání vlhkosti půdy, popřípadě hladiny nádrže s vodou.

Jak je možné vidět nabídka různorodých čidel je značně široká. Na druhou stranu je důležité se zaměřit na měřené hodnoty, které opravdu uživatel potřebuje. Ať už je to z důvodu komplexnosti celého zařízení, kompromisu, jaká čidla na zařízení umístit s ohledem na jejich spotřebu, kdy častým zdrojem energie je baterie nebo samotná finanční stránka věci a proces výroby formující koncovou cenu zařízení. V tomto ohledu se jednotlivá komerční řešení spoléhají spíše na jednoduchost a spolehlivost v podobě jedné měřené veličiny, ale za to s velkou přesností a možností detailní správy ve webovém prostředí.

Vzhledem k fenoménu jednoduchých a jednoúčelových senzorů bych chtěl v budoucnu zvážit vytvoření systému, který v menším měřítku napodobuje právě síťovou infrastrukturu poskytovatelů širokopásmových sítí. Vytvoření bude spočívat v jednom hlavním modulu působícím stejně jako přijímací stanice v dané infrastruktuře, na kterou bude napojeno větší množství relativně primitivních senzorů s účelem pouhého měření a sběru dat. Tato koncová zařízení budou zasílat naměřené hodnoty za pomoci technologie LoRa do hlavní jednotky, která bude opatřena modulem pro komunikaci pomocí technologie Sigfox zasílající data na server do příslušného cloudového řešení, které bude v nejlepším případě řešeno vytvořením specificky pro tyto účely tedy na míru.

Za jednu z nejdůležitějších funkcí možného vylepšení bych považoval systém zasílání notifikací a zpráv reagující na určité změny v naměřených hodnotách. V danou chvíli by se systém s funkcí měření a následného upozornění stal velmi efektivním nástrojem, zejména pro detekci nečekaných změn dovolující reakci v podobě úprav přidružených procesů představující nastavení, či optimalizaci systémů vytápění, cirkulace vzduchu nebo závlahy. Systém automatického upozornění je v rizikových a potenciálně nepřístupných místech jedinou možností, jak na takové změny reagovat s přijatelnou rychlostí. Tento systém může být proveden v podobě zaslání zpráv na email, notifikací v mobilní aplikaci nebo zprávou SMS.

### 5.3 Diskuze nad výsledkem závěrečné VAV

V případě zhodnocení vybraných technologií širokopásmových sítí s nízkou spotřebou je možné vidět, že konečný výsledek ukazuje na velice těsné vítězství technologie Sigfox před konkurenčním řešením LoRa. Důvodem je zejména dlouhodobé působení nejen na trhu českém, ale zároveň celosvětové využití těchto sítí a jejich funkčnost prověřena léty praxe. Sigfox je velice silným hráčem poskytující značně propracovanou infrastrukturu dovolující aktivní připojení až jednoho milionu zařízení na jedinou přijímací stanici, přehlednou dokumentaci a zavedený proces nasazení. Umožňuje značně rozsáhlou oblast pokrytí, ke které se v případě otevřeného prostředí bez zástavby přibližuje pouze technologie WAVIoT. Lehce nižší hodnocení Sigfox obdržel v podpoře aplikací třetích stran, přičemž má sice přehledně a kvalitně zpracovanou serverovou část, ovšem jakožto uzavřený protokol neposkytuje velkou míru možností úprav jako většina ostatních technologií. Toto kritérium se však vztahuje na velice specifická řešení, u kterých je nutné provádět zásadní změny, proto není v samotném srovnání zásadním, a tedy příslušně ohodnoceno nižší váhou. Sigfox navíc disponuje relativně dobře provedenou konfigurací koncových zařízení do síťové infrastruktury, které je možné vidět v druhé části praktické práce, při zprovoznění síťové komunikace se serverem v podobě vytvořeného prototypu senzoru. S nepatrným rozestupem na druhém místě skončila technologie LoRa, která se může pyšnit zejména velice dobrým výsledkem v oblasti komunikace umožňující velikost datové zprávy až 243 bytů a neomezený počet odeslaných zpráv v jednom dnu. Značnou výhodou je dále velké množství komunitních materiálů a návodů usnadňující samotné nastavení koncových zařízení. Určitě nelze opomenout, že LoRa je velice flexibilní, co se týče úprav pro různorodé využití. Příkladem může být v teoretické části práce zmiňovaná technologie s názvem Hiber, která pomocí speciálně modifikované části LoRa infrastruktury zasílá data ze svých senzorů na nízkou oběžnou dráhu připravených satelitů starajícím se o koncové doručení dat do serverové části, což dovoluje pokrývat velice odlehle a zároveň rozsáhle oblasti. S viditelnou ztrátou hodnoty celého bodu na třetím místě skončila technologie WAVIoT. Samotné řešení ukázalo silné stránky především v oblasti kritéria nasazení, zejména pak v pokrytí zastavěných oblastí, které ve srovnání s ostatními variantami nemá s hodnotou až 16,6 km obdoby. To je zajištěno díky specializaci na průmysl a městské oblasti v podobě měření

odběru elektrické energie, vody a plynu. Bohužel vzhledem k proprietárnímu nasazení má technologie slabou dokumentační část, která se v současné době z velké části skládá pouze z oficiálních zdrojů, ovšem poskytované jen zákazníkům a partnerům využívající tuto technologii. Značné snížení bodů proběhlo v případě kritéria nasazení, kdy WAVIoT působí zatím jen na území USA. Kladem je snaha společnosti rozšířit technologii do dalších zemí a možnosti vytvoření privátních sítí se specifickými požadavky, a tedy dobrá úroveň případných úprav. Čtvrté místo připadlo technologii NB-IoT poskytující sice dobré parametry v oblasti komunikace, podpoře platform třetích stran a konfiguraci systému zapříčiněnou využíváním stávajících standardů a infrastruktur mobilních LTE sítí. Tato technologie je díky využívání telekomunikačních sítí často využívána pro tvoření individuálních IoT řešení přímo mobilními operátory. NB-IoT však pokulhává v síle dostupnosti signálu, která je vyloženě slabá v prostředí zejména vnitřních prostor tvořených železobetonovými konstrukcemi. S menším rozdílem za NB-IoT skončila na pátém místě technologie RPMA, která poskytuje opět velice dobré parametry komunikace, ale značně zaostává v kritériích nasazení a dokumentace. Nejhuře skončila technologie Weightless, která se postupně rozvíjí hlavně na území Dánska, Německa a v poslední době Taiwanu. Weightless zaostává především v dokumentaci, nasazení a komunikaci hlavně z důvodu značně malého počtu zařízení, které dokáže obsluhovat jedna přijímací stanice. Je možné říci, že v tuto chvíli je Weightless stále v procesu vývoje a dochází u něho k zásadním změnám, které mohou vést k budoucímu zlepšení.

Na závěr této kapitoly bych chtěl říci, že zhodnocení a případné srovnání jednotlivých technologií není zcela jednoduchý proces. Velký problém tvoří nedostatečný počet ověřených zdrojů a informací o jednotlivých sítích. V závislosti na rapidním vývoji těchto technologií v současné době je navíc problematika správných zdrojů velice podstatná a je nutné sledovat, zda jsou popisované parametry aktuální, kdy již jeden nebo dva roky staré materiály nemusejí představovat aktuální stav dané technologie. Dále je složité sjednotit dostupné vlastnosti komunikačních technologií, které všechny sice zastupují oblast širokopásmových sítí s nízkou spotřebou, ale v reálném světě se každá ze společností snaží soustředit na vymezenou část aplikace, vzhledem k tomu se následně snaží upravit vlastnosti jednotlivých technologií. Právě individualizace a zaměření parametrů sítě má za následek oddálení jednotlivých technologií od konkurenčních řešení a napomáhá uplatnění v praxi.



## 6 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zhodnocení a následné srovnání vybraných širokopásmových sítí s nízkou spotřebou. K dosažení stanoveného cíle, bylo zapotřebí v teoretické části nastudování a zpracování poznatků o internetu věcí, šíření bezdrátového signálu, charakteristice širokopásmových síťových technologií a o hardwarových prostředcích. V praktické části práce bylo nejprve provedeno zhodnocení vybraných síťových technologií za pomoci bodovací metody vícekriteriální analýzy variant a zvolených kritérií v podobě komunikace, nasazení, dokumentace, podpoře platform třetích stran a konfigurace systému. Na zhodnocení navazuje vytvoření prototypu senzoru přenášející naměřená data za pomoci sítě, která byla vybrána na základě provedené analýzy.

Výsledek zhodnocení s ohledem na vybraná kritéria poukázal na velmi podobné bodové hodnocení technologií Sigfox a LoRa přesto, že obě síťové technologie mají různé silné stránky a odlišné charakteristiky. Nakonec byla, jako nejlepší kompromisní řešení vícekriteriální analýzy variant, vybrána síťová technologie Sigfox, která byla využita pro přenos dat z vytvořeného prototypu. Důvodem proč Sigfox a LoRa skončily s podobným výsledkem je dlouholetá působnost na našem území, dostupná dokumentace a ověřená schopnost bezproblémového provozu. Sigfox má silnou základnu v prostředí vytvořené infrastruktury, snadném zavedení a konfiguraci koncových zařízení, naopak LoRa dominuje v parametrech samotného přenosu dat s velkým datovým obsahem a neomezeným počtem zpráv za den.

Důležité je poznamenat, že samotné porovnání je omezeno pouze na šest vybraných širokopásmových sítí, a to z důvodu značné obtížnosti s dohledáním parametrů jednotlivých technologií, aplikaci zejména v privátním sektoru a z větší části působení v zahraničí. Navíc vzhledem k rapidnímu rozvoji v posledních letech je velká část dostupných zdrojů neaktuální a ve většině případů irelevantní. Postupem času se jednotlivý poskytovatelé snaží svůj produkt specificky zaměřit, což opět samotné srovnání značně stěžuje.

Závěr práce obsahuje ekonomické zhodnocení stavby prototypu a s ním související srovnání s komerčním řešením. V případě vytvořeného prototypu je cena nižší než u obou porovnávaných produktů, a to zejména z důvodu, že v případě prototypu není počítáno s navýšením ceny představující práci a využití nástrojů souvisejících se samotnou výrobou.

Po stránce funkcionality je prototyp díky použití vývojové desky Arduino a velkému množství dostupných rozšiřujících modulů zcela obstojným řešením, v některých případech převyšující standardní komerční návrhy, které převážně monitorují pouze jednu veličinu a neposkytují tak multifunkční využití.

Praktickým přínosem této diplomové práce je posouzení aktuálního stavu širokopásmových sítí s nízkou spotřebou a následné zhodnocení vybraných technologií. Vytvoření prototypu představuje ukázkou senzoru, který je schopen pracovat jako modelový prvek senzorické širokopásmové sítě s nízkou spotřebou. Samotné řešení tohoto prototypu je základem pro možnosti dalších úprav a vylepšení, s ohledem na individuální a specifické požadavky obsahující vysokou úroveň variability.

## 7 Seznam použitých zdrojů

- [1.] 5 Applications of IoT in Agriculture - Making Agriculture Smarter. *Biz4intellia* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.biz4intellia.com/blog/5-applications-of-iot-in-agriculture/>
- [2.] *A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT* [online]. 2017, (3) [cit. 2020-03-10]. ISSN 2405-9595.
- [3.] ANDRESS, Jason. *The basics of information security: understanding the fundamentals of InfoSec in theory and practice*. Boston: Elsevier/Syngress, Syngress is an imprint of Elsevier, 2014. ISBN 978-012-8007-440.
- [4.] Application of IoT In Automotive Industry | Future of Automobiles: Learn how Internet of Things (IoT) solutions are marking its presence in the Automotive sector. *Biz4intellia* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.biz4intellia.com/blog/iot-applications-in-automotive-industry>
- [5.] ASGHAR, Usman, Michael LÜTJEN, Ann-Kathrin ROHDE, Jörn LEMBKE, Michael FREITAG, Anna LARMO, Tuomas TIRRONEN a and Johan TORSNER. Wireless Pick-by-Light: Usability of LPWAN to Achieve a Flexible Warehouse Logistics Infrastructure. *Dynamics in Logistics* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2018, 2018-02-17, 164(3), 273-283 [cit. 2020-03-10]. Lecture Notes in Logistics. DOI: 10.1007/978-3-319-74225-0\_37. ISBN 978-3-319-74224-3. ISSN 03062619. Dostupné z: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-74225-0\\_37](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-74225-0_37)
- [6.] AUFRANC, Jean-Luc. A Closer Look at Ingenu RPMA Alternative to LoRa or Sigfox LPWAN Standards & RPMA. *Cnx-software* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.cnx-software.com/2016/11/20/a-closer-look-at-ingenu-rpma-alternative-to-lora-or-sigfox-lpwan-standards-rpma-development-kit>
- [7.] BAHGA, Arshdeep a Vijay MADISETTI. *Internet of Things (A Hands-on-Approach)*. Atlanta: Arshdeep Bahga and Vijay Madisetti, 2014. ISBN 978-0996025515.
- [8.] BARRETT, Steven Frank a Daniel J. PACK. *Microcontrollers Fundamentals for Engineers and Scientists*. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2006. ISBN 1-598-29058-4.
- [9.] BÁRTA, David. Transformace městských služeb pomocí internetu věcí. *Scmagazine* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://www.scmagazine.cz/casopis/03-15/transformace-mestskych-sluzeb-pomoci-internetu-veci>

- [10.] BEHR, Albert. 5 compelling cases of LPWAN for process industries. *Processingmagazine* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.processingmagazine.com/process-control-automation/article/15587729/5-compelling-cases-of-lpwan-for-process-industries>
- [11.] BEYENE, Yihenew Dagne, Riku JANTTI, Olav TIRKKONEN, Kalle RUTTIK, Sassan IRAJI, Anna LARMO, Tuomas TIRRONEN a and Johan TORSNER. NB-IoT Technology Overview and Experience from Cloud-RAN Implementation. *IEEE Wireless Communications* [online]. 2017, 24(3), 26-32 [cit. 2020-03-10]. DOI: 10.1109/MWC.2017.1600418. ISSN 1536-1284. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7955908>
- [12.] BOUHA, Nasreddine a Imad SALEH. *Internet of Things: Evolutions and Innovations*. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2017. ISBN 978-1-78630-151-2.
- [13.] BRAUN, Andrew. History of IoT: A Timeline of Development. *Iottechtrends* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.iottechtrends.com/history-of-iot>
- [14.] BUCKBEE, Michael. Data Security: Definition, Explanation and Guide. *Varonis* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.varonis.com/blog/data-security/>
- [15.] BUNTZ, Brian. Everything You Need to Know About IoT Applications. *Iotworldtoday* [online]. 2017 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.iotworldtoday.com/2017/09/20/top-20-industrial-iot-applications/>
- [16.] BURIAN, Pavel. *Internet inteligentních aktivit*. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-5137-5.
- [17.] CARROLL, Brandon James. *Bezdrátové sítě Cisco: autorizovaný výukový průvodce*. Brno: Computer Press, 2011. ISBN 978-80-251-2884-8.
- [18.] COX, James F. *Fundamentals of Linear Electronics: Integrated & Discrete Circuitry*. Clifton Park: Delmar Publishers, 2001. ISBN 9780827368514.
- [19.] DAMINI. An Introduction to Electromagnetic Relay. *Theelectricalguy* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://www.theelectricalguy.in/an-introduction-to-electromagnetic-relay/>
- [20.] Data sheet - MIOTY Starter Kit witch Azure. *Crautomation* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.crautomation.com/imgsensoren/Fraunhofer-BTI-Mioty.pdf>
- [21.] DAVIES, Alex. Behr Technologies joins crowded low-power wireless market with MIOTY. *Rethinkresearch* [online]. 2018 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://rethinkresearch.biz/articles/beh-technologies-joins-crowded-low-power-wireless-market-with-mioty/>

- [22.] Dedicated IoT Satellite Service Hiber Starts Commercial Trials on Global Scale. *Businesswire* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.businesswire.com/news/home/20191105006008/en/Dedicated-IoT-Satellite-Service-Hiber-Starts-Commercial>
- [23.] EC-GSM-IoT Network Synchronization with Support for Large Frequency Offsets. *Arxiv* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/1809.08579.pdf>
- [24.] ELECTROMAGNETIC RELAY: WORKING PRINCIPLES AND TESTING KNOW-HOW. *Integraengineering* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.integraengineering.in/blog/electromagnetic-relays>
- [25.] ENISA. *Baseline Security Recommendations for IoT: in the context of Critical Information Infrastructures* [online]. 2017 [cit. 2020-03-10]. DOI: 10.2824/03228. Dostupné z: [https://www.enisa.europa.eu/publications/baseline-security-recommendations-for-iot/at\\_download/fullReport](https://www.enisa.europa.eu/publications/baseline-security-recommendations-for-iot/at_download/fullReport)
- [26.] Extended Coverage – GSM – Internet of Things (EC-GSM-IoT). *Gsma* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.gsma.com/iot/mobile-iot-technology-ec-gsm-iot/>
- [27.] FLÜGGE, Barbara. *Smart mobility - connecting everyone: trends, concepts and best practices*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. Samostudium. ISBN 978-365-8156-213.
- [28.] FREČER, P. *Radiokomunikační monitor pro ISM pásmo 868 MHz*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Aleš Povalač.
- [29.] FRENZEL, Lou. The Connected World Awaits. *Electronicdesign* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/technologies/iot/article/21799479/the-connected-world-awaits>
- [30.] GEMMELL, Dal. Helium – Solving the IoT Connectivity Problem: New network, new protocol. *Learning about LongFi* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://blog.helium.com/learning-about-longfi-4b7b36c9bf54>
- [31.] GUPTA, Nikita. Humidity Sensor: Basics, Usage, Parameters and Applications. *Electronicsforu* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.electronicsforu.com/resources/electronics-components/humidity-sensor-basic-usage-parameter>
- [32.] Helium – Solving the IoT Connectivity Problem. *Nanalyze* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.nanalyze.com/2019/08/helium-iot-connectivity-problem/>

- [33.] How IoT devices & smart home automation is entering our homes in 2020. *Businessinsider* [online]. 2020 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.businessinsider.com/iot-smart-home-automation>
- [34.] HWANG, Yitaek. Cellular IoT Explained – NB-IoT vs. LTE-M vs. 5G and More. *Iotforall* [online]. 2020 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.ietfforall.com/cellular-iot-explained-nb-iot-vs-lte-m/>
- [35.] CHIN, Spencer. LoRa hits the Smart Home. *Fierceelectronics* [online]. 2020 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.fierceelectronics.com/electronics/lora-hits-smart-home>
- [36.] IKPEHAI, Augustine, Bamidele ADEBISI, Khaled M. RABIE, Kelvin ANOH, Ruth E. ANDE, Mohammad HAMMOUDEH, Haris GACANIN a Uche M. MBANASO. Low-Power Wide Area Network Technologies for Internet-of-Things: A Comparative Review. *IEEE Internet of Things Journal* [online]. 2019, 6(2), 2225-2240 [cit. 2020-03-10]. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2883728. ISSN 2327-4662. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8550722/>
- [37.] Interfacing DS18B20 1-Wire Digital Temperature Sensor with Arduino. *Lastminuteengineer* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://lastminuteengineers.com/ds18b20-arduino-tutorial/>
- [38.] Internet věci prakticky. *Iot-portal* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.ietf-portal.cz/2016/12/13/internet-veci-prakticky/>
- [39.] Introducing Telegram Splitting Technology. *Behrtech* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://behrtech.com/mioty/>
- [40.] IOT TRANSFORMING THE FUTURE OF AGRICULTURE. *Iotsworldcongress* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.ietfsworldcongress.com/iot-transforming-the-future-of-agriculture/>
- [41.] JOSEPH, Tom. What is the Arduino Uno? *Tomsonelectronics* [online]. 2018 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.tomsonelectronics.com/blogs/news/arduino-uno-specification>
- [42.] JOST, Danny. What is a Humidity Sensor? *Fierceelectronics* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.fierceelectronics.com/sensors/what-a-humidity-sensor>
- [43.] KHVOYNITSKAYA, Sandra. The history and future of the internet of things. *Itransition* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.itransition.com/blog/ietf-history>
- [44.] KOUICEM, Djamel Eddine, Abdelmadjid BOUABDALLAH a Hicham LAKHLEF. Internet of things security: A top-down survey. *Computer Networks* [online]. 2018, 141, 199-221 [cit. 2020-03-10]. DOI:

- 10.1016/j.comnet.2018.03.012. ISSN 13891286. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1389128618301208>
- [45.] LA ROSA, ALEXANDER. LPWAN as a communication base for IoT. *Pandorafms* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://pandorafms.com/blog/what-is-lpwan/>
- [46.] LoRaWAN Specification v1.1. *Lora-alliance* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawanr-specification-v11>
- [47.] Low Power Ultra Long Range Transceiver. *Nb-fi* [online]. 2018 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://nb-fi.org/wp-content/uploads/2018/02/NB-Fi-Transceiver-specification-2.pdf>
- [48.] LOW-POWER WIDE-AREA NB-FI NETWORK. *Waviot* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://waviot.com/technology/waviot-lpwa-network>
- [49.] LUETH, Knud Lasse. Why the Internet of Things is called Internet of Things: Definition, history, disambiguation. *IoT-analytics* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://iot-analytics.com/internet-of-things-definition>
- [50.] MALTSEVA, Diana. The top six IoT applications in logistics: IoT and blockchain tech are revolutionizing the logistics industry. *Theinnovationenterprise* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://channels.theinnovationenterprise.com/articles/how-the-internet-of-things-will-revolutionize-the-logistics-industry>
- [51.] MCCLELLAND, Calum. LPWAN - The Benefits of LPWAN Technology vs. Other IoT Connectivity Options. *Leverage* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.leverage.com/blogpost/lpwan-benefits-vs-iot-connectivity-options>
- [52.] MEIER, Reto. A Garden that Cares for Itself. *Medium* [online]. 2017 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://medium.com/google-developers/building-a-garden-that-cares-for-itself-9918a3d3be72>
- [53.] MORGAN, JACKSON. Light Sensors: Units, Uses, and How They Work. *Endaq* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://blog.endaq.com/how-light-sensors-work>
- [54.] NORDLÖF, Johanna a Petter LAGUSSON. *A Study of Low-Power Wide-Area Networks and an In-Depth Study of the LoRaWAN Standard* [online]. STOCKHOLM, 2017 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1141920/FULLTEXT01.pdf>. Disertační práce. KTH Industrial Engineering and Management.
- [55.] OTIS, Brian a Jan RABAEY. *Ultra-Low Power Wireless Technologies for Sensor Networks*. New York: Springer, 2007. ISBN 978-0-387-30930-9.

- [56.] PASQUA, Eugenio. LPWAN emerging as fastest growing IoT communication technology: 1.1 billion IoT connections expected by 2023, LoRa and NB-IoT the current market leaders. *Iot-analytics* [online]. 2018 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://iot-analytics.com/lpwan-market-report-2018-2023-new-report/>
- [57.] PECHAČ, Pavel a Stanislav ZVÁNOVEC. *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*. Praha: BEN, 2007. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [58.] QUINNELL, RICHARD. Low power wide-area networking alternatives for the IoT. *Edn* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.edn.com/low-power-wide-area-networking-alternatives-for-the-iot/>
- [59.] RAJ, Pethuru a Anupama C. RAMAN. *Intelligent Cities Enabling Tools and Technology*. Florida: CRC Press, 2015. Samostudium. ISBN 978-1-4822-9998-4.
- [60.] RAY, BRIAN. What is LTE-M? *Link-labs* [online]. 2017 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.link-labs.com/blog/what-is-lte-m>
- [61.] ROTH, Yoann Simon, Jean-Baptiste DORÉ, L. ROS a Vincent BERG. The Physical Layer of Low Power Wide Area Networks: Strategies, Information Theory's Limit and Existing Solutions. *Researchgate* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/327814537>
- [62.] ROUSE, Margaret. Internet of things (IoT). *Techtarget* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT>
- [63.] RUSSELL, Brian a Drew VAN DUREN. *Practical Internet of Things Security*. Birmingham: Packt Publishing, 2016. Samostudium. ISBN 978-1-78588-963-9.
- [64.] RYABCHUK, Paul. How Can the Automotive Industry Use Internet of Things (IoT) Technology?. *Intellias* [online]. 2018 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.intellias.com/how-can-the-automotive-industry-use-internet-of-things-iot-technology/>
- [65.] SALES. 8 Uses, Applications, and Benefits of Industrial IoT in Manufacturing. *Newgenapps* [online]. 2017 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.newgenapps.com/blog/8-uses-applications-and-benefits-of-industrial-iot-in-manufacturing>
- [66.] Send big data to tiny (nano) satellites via LoRa or LoRaWAN. *Hiber* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://hiber.global/hiberband-via/>
- [67.] SENIČAR, Vanja, Borka JERMAN-BLAŽIČ a Tomaž KLOBUČAR. *Privacy-Enhancing Technologies—approaches and development: in the context of Critical Information Infrastructures* [online]. 2003, 25(2), 147-158 [cit. 2020-03-10]. DOI: 10.1016/S0920-5489(03)00003-5. ISSN 09205489. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0920548903000035>



- [68.] SHANNON, Sarah. IoT and the Changing Face of Healthcare. *Comparethecloud* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.comparethecloud.net/articles/healthcare-iot/>
- [69.] SHAWN. Arduino GPS Modules: Which one to use? Guide and Comparisons. *Seeedstudio* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/11/06/arduino-gps-modules-which-one-to-use-guide-and-comparisons/>
- [70.] SHAWN. What is Barometric Pressure Sensor and Arduino Guide to get started. *Seeedstudio* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/12/30/what-is-barometric-pressure-sensor-and-arduino-guide-to-get-started/>
- [71.] SigFox for M2M & IoT. *Electronics-notes* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/sigfox/what-is-sigfox-basics-m2m-iot.php>
- [72.] Sigfox Opens Radio Specifications for Connected IoT. *Iotevolutionworld* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.iotevolutionworld.com/m2m/articles/441269-sigfox-opens-radio-specifications-connected-iot.htm>
- [73.] SONG, Yonghua, Jin LIN, Ming TANG a Shufeng DONG. An Internet of Energy Things Based on Wireless LPWAN. *Engineering* [online]. 2017, 3(4), 460-466 [cit. 2020-03-10]. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.04.011. ISSN 20958099. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2095809917306057>
- [74.] SparkFun Luminosity Sensor Breakout - TSL2561. *Sparkfun* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/retired/12055>
- [75.] SPI library: A Brief Introduction to the Serial Peripheral Interface (SPI). *Arduino* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/reference/SPI>
- [76.] SUNDMAEKER, Harald. Vision and Challenges for Realising the Internet of Things. *Internet-of-things-research* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: [http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/IoT\\_Clusterbook\\_March\\_2010.pdf](http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/IoT_Clusterbook_March_2010.pdf)
- [77.] Temperature Sensors: Types, Working & Operation. *Elprocus* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/temperature-sensors-types-working-operation/>
- [78.] TERRA, John. Everything You Need to Know About IoT Applications. *Simplilearn* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.simplilearn.com/iot-applications-article>

- [79.] The Pros and Cons of Different LPWAN Networks for Your IoT Application. *Altium* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://resources.altium.com/p/the-pros-and-cons-of-different-lpwan-networks-for-your-iot-application>
- [80.] THORNTON, SCOTT. What is the Arduino Uno? *Microcontrollertips* [online]. 2017 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.microcontrollertips.com/microcontrollers-vs-microprocessors-whats-difference/>
- [81.] VYUŽITÍ RÁDIOVÉHO SPEKTRA. *Český telekomunikační úřad* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://spektrum.ctu.cz/>
- [82.] WAVIoT Smart Water Meter SWM-1. *Iotglobalnetwork* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.iotglobalnetwork.com/products/single/id/848/waviot-smart-water-meter-swm-1>
- [83.] Webová a mobilní aplikace ZOOCO. *Zooco* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.zooco.io/cs/aplikace/>
- [84.] Weightless-P. *Iotglobalnetwork* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.iotglobalnetwork.com/products/single/id/914/weightless-p>
- [85.] WEI, Min, Seung Ho HONG, Musharraf ALAM, Kalle RUTTIK, Sassan IRAJI, Anna LARMO, Tuomas TIRRONEN a and Johan TORSNER. An IoT-based energy-management platform for industrial facilities. *Applied Energy* [online]. 2016, 164(3), 607-619 [cit. 2020-03-10]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.107. ISSN 03062619. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261915015883>
- [86.] What Is Medical IoT? *Arm* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.arm.com/glossary/medical-iot>
- [87.] What Is Weightless. *Weightless* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://www.weightless.org/about/what-is-weightless>
- [88.] Worldwide Smart Cities Spending Guide. *Idc* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: [https://www.idc.com/tracker/showproductinfo.jsp?prod\\_id=1843](https://www.idc.com/tracker/showproductinfo.jsp?prod_id=1843)
- [89.] YIDA. Arduino Communication Peripherals: UART, I2C and SPI. *Seeedstudio* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/11/07/arduino-communication-peripherals-uart-i2c-and-spi/>
- [90.] YIDA. UART vs I2C vs SPI – Communication Protocols and Uses. *Seeedstudio* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/09/25/uart-vs-i2c-vs-spi-communication-protocols-and-uses/>

## 8 Přílohy

Příloha 1 - Knihovny a vytvořené proměnné.....	123
Příloha 2 - Funkce setup se základní inicializací.....	124
Příloha 3 - První část funkce loop.....	124
Příloha 4 - Druhá část funkce loop .....	125
Příloha 5 - První část funkce pro odeslání zprávy .....	125
Příloha 6 - Druhá část funkce pro odeslání zprávy .....	126
Příloha 7 - Graf naměřených hodnot vlhkosti v prostředí Beebotte .....	126
Příloha 8 - Graf naměřených hodnot teploty v prostředí Beebotte .....	127
Příloha 9 - Graf naměřených hodnot svítivosti v prostředí Beebotte .....	127
Příloha 10 - Graf naměřených hodnot tlaku v prostředí Beebotte .....	127

```
#include <Wire.h>
#include <BH1750.h>
#include <cactus_io_BME280_I2C.h>
#include <SoftwareSerial.h>

//nastaveni pinu pro komunikaci pres TX a RX piny modulu
SoftwareSerial sigfox(4, 5);

//luxmetru a tlakomeru
BH1750 luxmetr;
BME280_I2C bme(0x76);

//vytvorene promenne pro merene hodnoty
int8_t humidity = 0;
float temperature = 0;
int16_t lum = 0;
float pressure = 0;

//vedlejsi promenne pro dalsi vyuziti
int16_t temp2, pres2;
int16_t tm = 0;
```

Příloha 1 - Knihovny a vytvořené proměnné

```

void setup() {
  //inicializace
  Serial.begin(9600);

  //inicializace komunikacni linky
  sigfox.begin(9600);

  //inicializace senzoru
  luxmetr.begin();
  bme.begin();
  //dovoluje kalibraci senzoru teploty
  bme.setTempCal(-1);

  //inicializace systemove diody s pinem 13
  pinMode(13, OUTPUT);
}

```

### Příloha 2 - Funkce setup se základní inicializací

```

void loop() {
  //vypnutí diody na počátku
  digitalWrite(13, LOW);

  // získání hodnot ze senzoru
  bme.readSensor();
  humidity = bme.getHumidity();
  temperature = bme.getTemperature_C();
  lum = luxmetr.readLightLevel();
  pressure = bme.getPressure_MB();

  //optimalizace teploty a tlaku pro odeslání
  temp2 = (temperature * 100);
  pres2 = ((pressure - 900) * 100);

  //testovací výpis naměřené hodnoty
  Serial.print(humidity); Serial.print(" % ");
  Serial.print(temperature); Serial.print(" C ");
  Serial.print(lum); Serial.print(" lx ");
  Serial.print(pressure); Serial.println(" hPa");

  //testovací výpis s upravenou teplotou a tlakem
  Serial.print(humidity); Serial.print(" % ");
  Serial.print(temp2); Serial.print(" C ");
  Serial.print(lum); Serial.print(" lx ");
  Serial.print(pres2); Serial.println(" hPa");

  //testovací výpis v HEX formátu - jednotlivé hodnoty
  Serial.print("Values in HEX: ");
  Serial.print(humidity, HEX); Serial.print(" ");
  Serial.print(temp2, HEX); Serial.print(" ");
  Serial.print(lum, HEX); Serial.print(" ");
  Serial.println(pres2, HEX);
}

```

### Příloha 3 - První část funkce loop

```

//odeslani az pri 3 mereni pro presnejsi hodnoty
if (tm == 2){
  //volani funkce pro odeslani hodnot
  sendMessage();
  //delay po odeslani
  delay(500);
  //reset pocitadla
  tm = 0;
  //delay po odeslani 15 minut - interval mereni
  delay(900000);
}
else{
  //pricteni urcene hodnoty po mereni
  tm = tm + 1;
  // delay po mereni
  delay(1000);
}
}
}

```

#### Příloha 4 - Druhá část funkce loop

```

bool sendMessage() {
  //vytvoreni promenne pro stav odeslani
  bool stat = false;

  //vytvoreni promenne pro zpetny vystup z modulu
  char outputSig;

  //zapnuti systemove diody - hlaseni komunikace
  digitalWrite(13, HIGH);

  //vlozeni namerenych hodnot do bufferu - formatovani potrebnych cifer
  char message[12];
  sprintf(message, "%02X%04X%04X%04X", humidity, temp2, lum, pres2);

  //vypsani kontrolniho retezce do seriove linky
  Serial.print("Message in HEX: ");
  Serial.println(message);

  //delay po vypsani kontroly
  delay(500);

  //zacatek prikazu AT pro odeslani do Sigfox
  sigfox.print("AT$SF=");

  //retezec hodnot 8 16 16 16
  sigfox.print(message);

  //ukonceni retezce
  sigfox.print("\r");
}

```

#### Příloha 5 - První část funkce pro odeslání zprávy

```

//cekani na odezvu modulu o odeslani zpravy
while (!sigfox.available())
{
  Serial.println("Waiting for response");
  delay(1000);
}

//kontrola zda vse probehlo OK
while (sigfox.available())
{
  delay(1000);
  outputSig = sigfox.read();
  if (outputSig == 'O') stat = true;
}

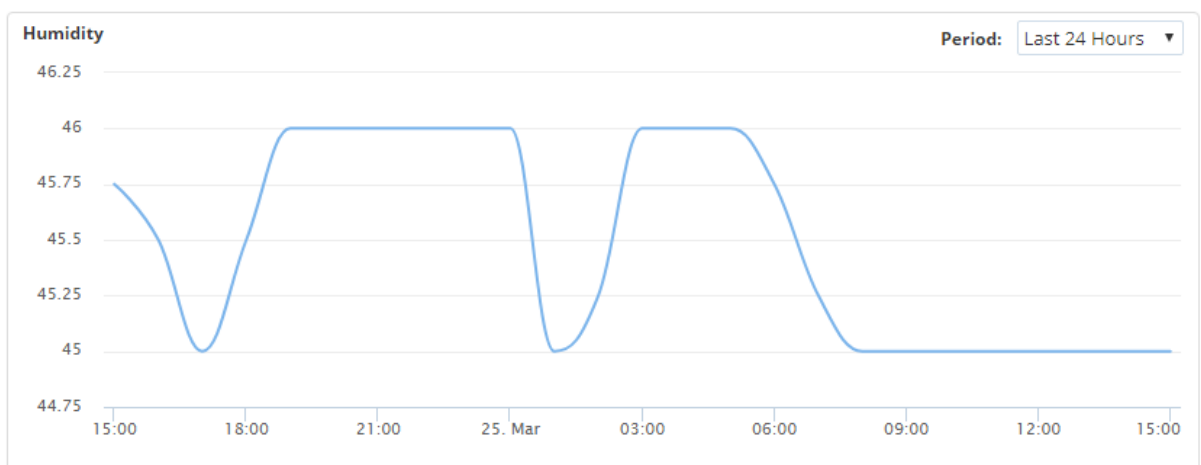
//kontrolni vypis stavu zpravy do seriove linky
if(stat){
  Serial.println("Message sent to the Sigfox network.");
}
else{
  Serial.print("Something went wrong.");
}

//vypnuti oznamovaci diody o odeslani
digitalWrite(13, LOW);

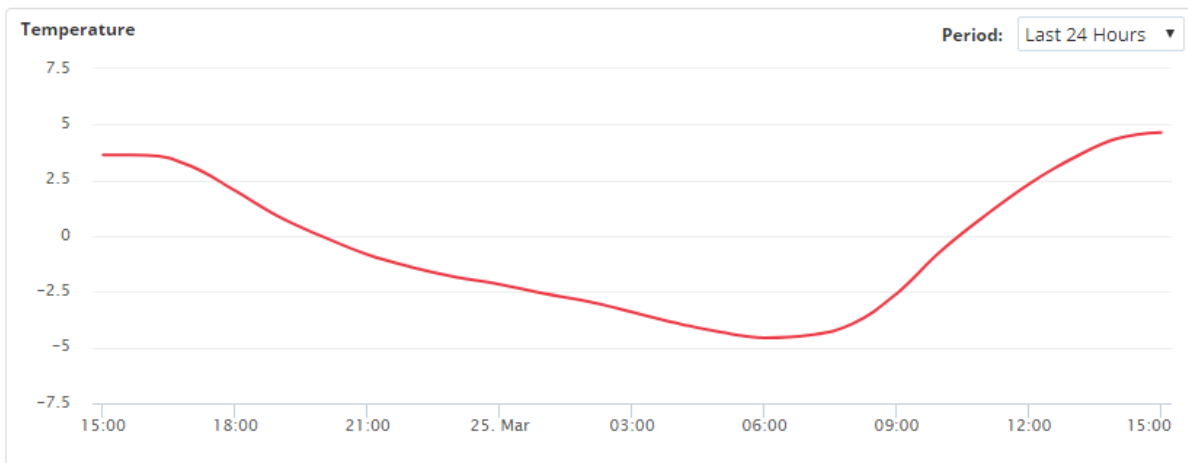
//navraceni hodnoty
return stat;
}

```

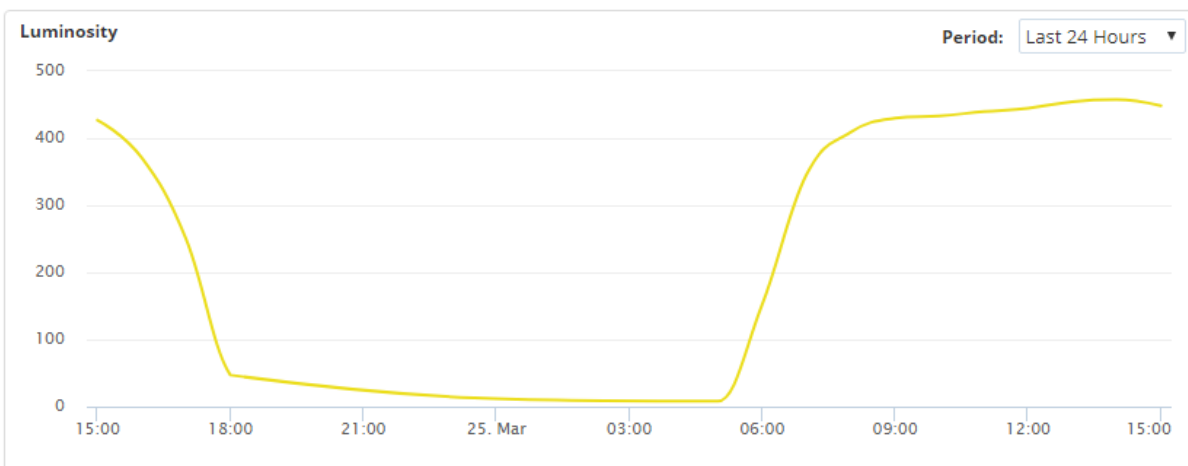
**Příloha 6 - Druhá část funkce pro odeslání zprávy**



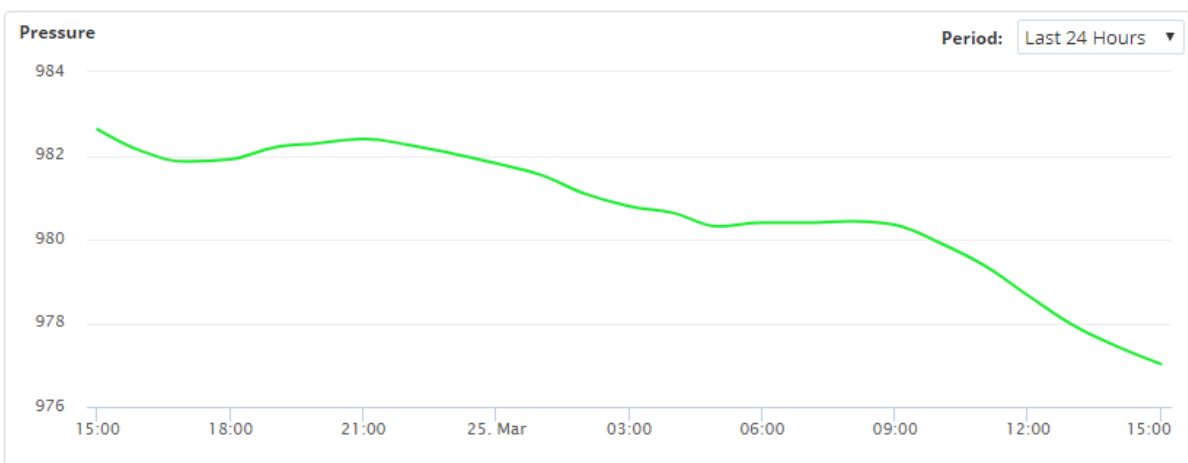
**Příloha 7 - Graf naměřených hodnot vlhkosti v prostředí Beebotte**



**Příloha 8 - Graf naměřených hodnot teploty v prostředí Beebotte**



**Příloha 9 - Graf naměřených hodnot svítivosti v prostředí Beebotte**



**Příloha 10 - Graf naměřených hodnot tlaku v prostředí Beebotte**