



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## PŘÍSTUPOVÝ BOD PROPRIETÁRNÍCH BEZDRÁTOVÝCH SÍTÍ

ACCESS POINT OF WIRELESS NETWORKS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Jeřábek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

BRNO 2017

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Ondřej Jeřábek

**ID:** 174321

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Přístupový bod proprietárních bezdrátových sítí

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s koncepcí přístupových bodů pro proprietární bezdrátové sítě a navrhňte blokovou strukturu (tj. komunikační moduly, řídicí část, napájecí část) takového přístupového bodu. Zařízení musí sdružovat následující komunikační rozhraní: USB ve funkci Virtual COM Port, ethernet 10BASE-T nebo vyšší a volitelnou konfiguraci pro rádiové pásmo 863,0 - 870,0 MHz (modulace FSK), rádiové pásmo 2400,0 - 2483,5 MHz (technologie CSS), rádiové pásmo 3200,0 - 7000,0 MHz (technologie UWB). Navrhňte a realizujte desky plošných spojů celého zařízení.

Zařízení oživte a naprogramujte obslužný firmware pro řídicí mikrokontrolér. Provedte detailní testování veškerých funkcí vyvíjeného zařízení, včetně měření.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] Semtech SX1211: Ultra Low Power (3mA RX) RF Transceiver 862-960MHz [online]. [cit. 2016-06-01]. Dostupné z: <http://www.semtech.com/wireless-rf/rf-transceivers/sx1211/>.

[2] NXP Microcontrollers and Processors: ARM Technology-Based Solutions [online]. [cit. 2016-06-01]. Dostupné z: <http://www.nxp.com/products/microcontrollers-and-processors/arm-processors:ARM-ARCHITECTURE>.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 30.5.2017

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

**Konzultant:** Ing. Ondřej Tomášek

**prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá návrhem a realizací modulárního, proprietárního, bezdrátového zařízení. Toto zařízení bude zprostředkovávat bezdrátovou komunikaci mezi počítačem (popř. serverem) a výrobky firmy Cutter Systems spol. s r.o. Typ komunikace je volen pomocí vyměnitelných modulů. V práci bude popsán hardwarový návrh zařízení a také vývoj firmwaru pro obslužný mikrokontroler. K propojení s počítačem (popř. serverem) slouží rozhraní Ethernet 100 Mb/s, nebo USB ve funkci virtual COM port.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Bezdrátová komunikace, USB, ARM, PoE, Ethernet

## **ABSTRACT**

This work deal with development and realization modular, proprietary wireless access point. The main function will be realization wireless connection between computer (or server) and devices from company Cutter Systems spol. s r.o. Type of wireless communication is selected by changeable modules. This work describes hardware design of this device, and firmware development for main microcontroller unit. Communication with computer (or server) provides Ethernet 100 Mb/s interface or USB as Virtual COM port function.

## **KEYWORDS**

Wireless communication, USB, ARM, PoE, Ethernet

Jeřábek, O. *Přístupový bod proprietárních bezdrátových sítí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 41 s., 12 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Přístupový bod proprietárních bezdrátových sítí jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu práce doc. Ing. Tomášovi Frýzovi, Ph.D. a odbornému konzultantovi z firmy Cutter Systems spol. s r.o. Ing. Ondřeji Tomáškoví za odbornou asistenci a konzultaci při vývoji této bakalářské práce.

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>VIII</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>X</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Teoretický rozbor</b>	<b>2</b>
1.1 Bezdrátová komunikace.....	2
1.2 Proprietární bezdrátové sítě .....	4
1.3 Komunikační sběrnice .....	5
1.4 Systém PoE .....	7
<b>2 Hardwarový Návrh</b>	<b>9</b>
2.1 Napájení .....	10
2.2 MCU .....	15
2.3 Paměti .....	16
2.4 Bezdrátové moduly .....	17
2.5 Ethernet.....	23
2.6 USB.....	23
2.7 Signalizace .....	24
<b>3 Firmware</b>	<b>25</b>
3.1 Úkol firmwaru.....	25
3.2 Bootloader.....	25
3.3 Hlavní firmware .....	26
3.4 Funkcionality firmwaru .....	29
<b>4 Měření</b>	<b>35</b>
4.1 SX modul .....	35
4.2 Nanotron modul .....	36
4.3 Decawave modul.....	37
4.4 Další měření .....	37
<b>5 Závěr</b>	<b>39</b>
<b>Literatura</b>	<b>40</b>

<b>Seznam symbolů, veličin a zkratek</b>	<b>41</b>
<b>A Návrh zařízení</b>	<b>42</b>
A.1 Schéma zapojení napájecí části.....	42
A.2 Schéma zapojení paměťové a komunikační části .....	43
A.3 Schéma zapojení modulární části .....	44
A.4 Schéma zapojení ethernetové části .....	45
A.5 Ethernet Reader v3.0 – top (horní strana).....	46
A.6 Ethernet Reader v3.0 – bottom (spodní strana) .....	46
A.7 Schéma zapojení SX modulu ufl v1.0 .....	47
A.8 SX modul ufl v1.0 – top (horní strana).....	48
A.9 SX modul ufl v1.0 – bottom (spodní strana) .....	48
A.10 Schéma zapojení decawave modulu ufl v1.2.....	49
A.11 Decawave modul ufl v1.2 – top (horní strana) .....	50
A.12 Decawave modul ufl v1.2 – vrstva 2 (vnitřní) .....	50
A.13 Decawave modul ufl v1.2 – vrstva 3 (vnitřní) .....	50
A.14 Decawave modul ufl v1.2 – bottom (spodní strana).....	51
A.15 Schéma zapojení nanotron modulu ufl v1.1 .....	51
A.16 Nanotron modul ufl v1.1 – top (horní strana).....	52
A.17 Nanotron modul ufl v1.1 – bottom (spodní strana) .....	52
<b>B Seznam součástek</b>	<b>53</b>
<b>C Zdrojový kód</b>	<b>53</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Modulace FSK [3].....	3
Obrázek 2 CSS upchirp, downchirp [4].....	4
Obrázek 3 Příklad komunikace po sběrnici SPI [7].....	6
Obrázek 4 Struktura dat na lince UART (sudá parita).....	6
Obrázek 5 Průběh inicializační sekvence při připojení PD [6].....	8
Obrázek 6 Použitý typ krabičky.....	9
Obrázek 7 Bloková struktura Ethernet Readeru .....	10
Obrázek 8 Bloková struktura napájecí části .....	10
Obrázek 9 Napájecí konektory a Ethernet PoE konektor .....	11
Obrázek 10 LPC4078 v pouzdře LQFP 144-pin .....	15
Obrázek 11 Paměti FLASH a EEPROM .....	16
Obrázek 12 Slot na microSD kartu a paměť SRAM .....	17
Obrázek 13 Dutinková lišta .....	17
Obrázek 14 Kolíková lišta .....	18
Obrázek 15 SMA – U.FL pigtail .....	18
Obrázek 16 Umístění SMA konektorů .....	18
Obrázek 17 Zapojení oscilátoru pro generování hodinového signálu .....	19
Obrázek 18 SX modul.....	21
Obrázek 19 Nanotron modul.....	22
Obrázek 20 Decawave modul se stínícím krytem a keramickou anténou .....	23
Obrázek 21 Úvodní webová stránka Ethernet Readeru .....	29
Obrázek 22 Konfigurace síťového připojení Ethernet Readeru .....	30
Obrázek 23 Nastavení konfigurace modulů pomocí programu CommTest .....	31
Obrázek 24 Tabulka RSSI .....	32
Obrázek 25 Nastavení parametrů pro wakeup paket .....	33
Obrázek 26 Stav zařízení s naměřenými hodnotami .....	34
Obrázek 27 Spektrum vysílaného signálu SX modulu .....	35
Obrázek 28 Detail spektra vysílaného signálu SX modulem .....	36
Obrázek 29 Spektrum vysílaného signálu Nanotron modulu .....	36
Obrázek 30 Spektrum vysílaného signálu Decawave modulu.....	37



Obrázek 31 Vyzařování aktivního Ethernet Readeru ..... 38

# SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Třídy napájených zařízení PoE.....	7
Tabulka 2 Volba nabíjecích proudů.....	14
Tabulka 3 Popis řídicích pinů SX modulu.....	20
Tabulka 4 Signalizace a její význam .....	24

# ÚVOD

Hlavním cílem této práce bude navrhnout, vyrobit a naprogramovat proprietární, modulární bezdrátové zařízení (dále jen Ethernet Reader) pro zprostředkování komunikace mezi počítačem, případně serverem, a výrobky firmy Cutter Systems spol. s r.o. za účelem aktualizace firmwaru, konfigurace zařízení, testování nových výrobků a případné logování dat a odesílání na server.

Toto zařízení bude disponovat dvojicí slotů pro osazení dvou typů bezdrátových modulů. V konkrétním případě budou k dispozici 3 typy modulů pro komunikaci na frekvenci 860-870 MHz s modulací FSK, 2400-2483,5 MHz s modulací CSS a 3200-7200 MHz s modulací UWB. Moduly budou vyměnitelné, což umožňuje široký výběr konfigurací a případnou budoucí rozšiřitelnost o další typy. Pro připojení k počítači či serveru poslouží konektor micro USB ve funkci virtual COM port, nebo ethernetový konektor.

Napájení celého zařízení bude provedeno prostřednictvím konektoru Power Jack, ale lze využít i standardu PoE, nebo micro USB. Volitelně bude možné osadit nabíjecí zálohovací baterii pro stálé napájení i v případě výpadku hlavního napájecího zdroje.

První kapitola obsahuje teoretický popis použitých technologií s jejich základními principy. Následující kapitola poté rozdělí navrhované zařízení do bloků a popíše jejich návrh. Druhá polovina práce se věnuje převážně vývoji firmwaru pro obslužný mikrokontroler. Závěrem bude provedeno několik měření navrhnutého zařízení a ověření funkčnosti. Na úplném konci lze najít přílohu se schématy a návrhem desek plošných spojů.

# 1 TEORETICKÝ ROZBOR

Tato část se zabývá teoretickým popisem použitých technologií. Vzhledem k obsáhlosti práce nebudou doslovně popsány všechny technologie. Popis většiny z nich je volně dostupný na internetu online.

## 1.1 Bezdrátová komunikace

### 1.1.1 Úvod a rozdělení

V dnešní době je snaha používat u zařízení co nejméně kabelů a veškeré komunikace případně i napájení řešit bezdrátově. Bezdrátovou komunikací myslíme propojení dvou zařízení bez fyzického spojení např. metalickým nebo optickým kabelem.

Bezdrátovou komunikaci můžeme dělit dle způsobu komunikace na 3 hlavní části. Optickou, zvukovou (sonickou) a rádiovou. Vzhledem k tomu, že v této práci je použita rádiová bezdrátová komunikace, bude popis soustředěn převážně na tuto část.

Rádiová komunikace spočívá ve vysílání a přijímání elektromagnetické vlny šířící se v prostoru. Zpráva se na tuto vlnu přenesení ve vysílači vhodnou modulací (změnou parametrů signálu). Na straně přijímače se daný signál zachytí, demoduluje a zpráva je získána zpět.

Modulace můžeme rozlišit na dva základní typy:

- **Analogová modulace** – o tomto typu modulace hovoříme v případě, že modulační signál nesoucí zprávu může nabývat nekonečného počtu stavů. Takovéto modulace se označují jako amplitudová modulace (AM), fázová modulace (PM) a frekvenční modulace (FM). [2]
- **Digitální modulace** – o tomto typu modulace hovoříme v případě, kdy modulační signál je digitální s konečným počtem stavů. Takovému ovlivňování nosné vlny se říká klíčování (Shift Keying) a modulace se označují jako amplitudové klíčování (ASK), fázové klíčování (PSK) a frekvenční klíčování (FSK). [2]

Modulace se dají také kombinovat. Například QAM (kvadraturně amplitudová modulace) využívá kombinaci amplitudové a fázové modulace. Obdobně existuje také digitální obdoba QASK.

Dále lze modulace dělit podle toho, jakým způsobem využívají frekvenční pásmo na:

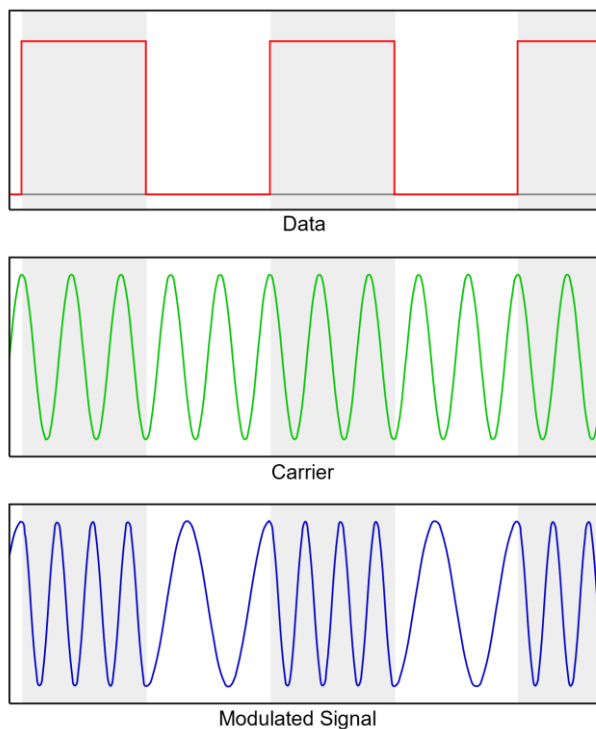
- **Modulace s jednou nosnou** (Single carrier modulation) – Do této kategorie spadají všechny výše popsané modulace
- **Modulace s více nosnými** (Multi-carrier modulation)

Pro zvýšení přenosových rychlostí se používají více stavové modulační metody, které dokáží přenést vyšší počet bitů zároveň v jednom symbolu, při použití stejné šířky pásma. Nevýhodou jsou jejich vyšší nároky na přijímač a kvalitu přenosového kanálu. Mezi tyto modulační metody patří např. 4-PSK nebo 16-PSK.

V kapitolách 1.1.2 až 1.1.4 budou blíže popsány způsoby komunikace použité u této práce.

### 1.1.2 Modulační metoda FSK

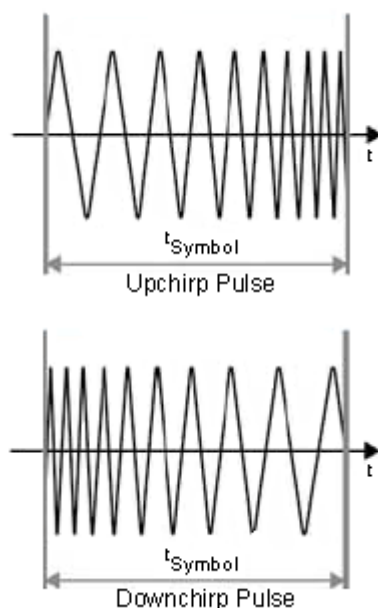
Jedná se o frekvenční modulaci s jednou nosnou. Způsob přenosu dat využívá frekvenční klíčování (FSK) kdy se mění frekvence nosného signálu v závislosti na vysílaných datech. Jako příklad může posloužit binární FSK (Obrázek 1). Demodulace může být provedena pomocí tzv. Goertzelova algoritmu.



Obrázek 1 Modulační metoda FSK [3]

### 1.1.3 Technologie CSS

(Chirp Spread Spectrum) Tento typ bezdrátové technologie je patentován firmou Nanotron Technologies GmbH a používá techniky rozprostřeného spektra. Komunikace probíhá pomocí širokopásmových lineárně frekvenčně modulovaných pulsů. Pokud frekvence vytvořeného pulsu lineárně roste nazývá se upchirp. V případě že frekvence pulsu klesá downchirp (Obrázek 2). Výhodou tohoto způsobu komunikace je odolnost vůči Dopplerovu jevu, rušení, nízká spotřeba energie, jednoduchá implementace na křemíkovém čipu. [4]



Obrázek 2 CSS upchirp, downchirp [4]

### 1.1.4 Technologie UWB

Jedná se o bezdrátovou technologii (Ultra-wideband), která podobně jako CSS nepoužívá jednu nosnou frekvenci, ale zabírá větší šířku pásma ( $> 500$  MHz). Teoreticky takovýto způsob komunikace neovlivňuje stávající úzkopásmová vysílání, nebo vysílání s jednou nosnou nacházející se ve stejném frekvenčním pásmu. Především se používá pro vysokorychlostní přenosy na malé vzdálenosti, ale také pro radarová měření. Modulace informace na takovýto přenos využívá pulzně-poziční, nebo časovou modulaci. Lze ale modulovat i zakódováním polarity nebo amplitudy pulzu.

## 1.2 Proprietární bezdrátové sítě

Jedná se o specifický druh bezdrátových sítí, který se vyznačuje jedinečností řešení konkrétního výrobce a většinou není kompatibilní s návrhy jiných výrobců řešící obdobný, nebo stejný problém. Často se jedná o know-how jednotlivých firem.

Pro komunikaci se převážně využívají tzv. nelicencovaná frekvenční pásma, která lze využívat dle ČTÚ s určitými omezeními (především vysílacím výkonem) volně bez poplatků. Mezi tyto frekvenční pásma patří např. 433 MHz, 863–870 MHz, 2400 - 2483,5 MHz.

Existují výrobci čipů, případně modulů specializujících se na komunikaci v daných frekvenčních pásmech. Samotná implementace je tedy relativně jednoduchá. Mezi tyto výrobce patří např. firma Semtech, Nanotron, nebo Decawave. Poslední dvě jmenované firmy nabízí i řešení s možností bezdrátového měření vzdálenosti.

## 1.3 Komunikační sběrnice

Pro přenos dat mezi dvěma zařízeními se mimo bezdrátovou komunikaci používají také sběrnice. Využívá se většinou několika vodičů přenášejících různé informace např. data a hodinový signál. Celkově se dají dělit dle přenosu dat na synchronní a asynchronní.

- **Synchronní přenos dat** – přenos dat je synchronizován pomocí hodinových pulzů, které říkají kdy má zařízení na sběrnici data odesílat nebo vzorkovat. Výhodou je malá chybovost a jednoduchá implementace, nevýhodou nutnost dalšího vodiče přenášející hodinový signál.
- **Asynchronní přenos dat** – pro přenos dat nepotřebuje hodinový signál. Data jsou na sběrnici vysílána v pravidelných časových intervalech. Na začátku vysílání je vložena synchronizace, která řekne přijímacímu zařízení kdy má data vzorkovat.

Další způsob dělení sběrnic je podle počtu přenášených dat na sériové a paralelní.

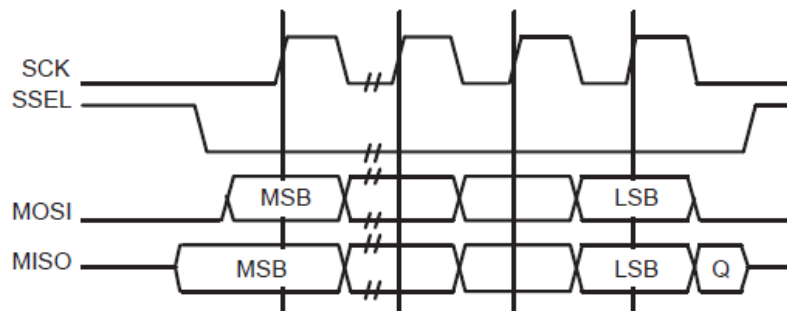
- **Sériová sběrnice** – přenáší data postupně tzn. data jsou rozdělena na jednotlivé bity, případně skupiny bitů, které reprezentují jeden stav na sběrnici a ty se přenesou postupně za sebou. Výhodou je nižší cena, úspora místa a nižší počet vodičů.
- **Paralelní sběrnice** – přenáší data najednou, tzn. celá informace je přenesena pomocí několika vodičů zároveň. Nevýhoda je nutnost použít tolik vodičů, jaká je délka přenášené informace a v neposlední řadě také rychlost, která je omezena přeslechly mezi jednotlivými vodiči.

### 1.3.1 Sběrnice SPI

(Serial peripheral interface) jedná se o sériovou synchronní sběrnici, která ke svému přenosu dat využívá dva datové signály (MOSI, MISO), jeden hodinový (SCLK) a povolující signál (SS). Tato sběrnice se především používá na krátké vzdálenosti uvnitř zařízení mezi jednotlivými periferiemi. Výhoda je jednoduchost a relativně nízký počet vodičů, který ale roste s počtem připojených zařízení na sběrnici (každé zařízení má svůj vlastní signál SS). Struktura sběrnice vyžaduje jedno řídicí zařízení (master) a minimálně jedno řízené zařízení (slave). Délka vysílaných dat je buďto 8 nebo 16 bitů a vysílání probíhá tak, že na zvolenou hranu hodinového signálu se data od obou zařízení vzorkují a na opačnou hranu se mění. Hardwarově se tento proces uvnitř zařízení řeší pomocí posuvných registrů.

Význam jednotlivých vodičů je následující:

- **MOSI** – (master out slave in) jak celý název napovídá, data jsou přenášena od řídicího zařízení k řízenému
- **MISO** – (master in slave out) tento vodič přenáší data od řízeného zařízení k řídicímu
- **SCLK (SCK)** – hodinový signál synchronizující data na sběrnici.
- **SS** – (slave select) povolující signál určující, které zařízení na sběrnici má komunikovat. (také označováno CS – chip select)



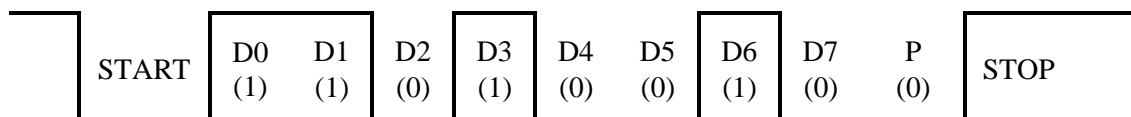
Obrázek 3 Příklad komunikace po sběrnici SPI [7]

### 1.3.2 UART

(Universal asynchronous receiver-transmitter) jedná se o asynchronní sériovou sběrnici určenou pro komunikaci mezi dvěma zařízeními. Na rozdíl od SPI tato sběrnice nemá hodinový signál. To znamená, že jak vysílač, tak přijímač musí mít shodnou rychlost vysílání / přijímání zvanou Baud Rate, jinak dochází k chybám a data nejsou přijata správně. Totéž platí o celkové struktuře dat. Sběrnice komunikuje pomocí dvou datových vodičů, které propojují vždy vysílací pin TX s přijímacím pinem RX.

Struktura vysílaných dat je následující:

- Start bit (START) – Zahajuje vysílání
- Datové bity (D) – 5 až 9 datových bitů (záleží na konfiguraci)
- Paritní bit (P) – slouží pro jednoduchou detekci chyby (není povinný)
- Stop bit (STOP)– 1 až 2 ukončovací bity (v závislosti na konfiguraci)



Obrázek 4 Struktura dat na lince UART (sudá parita)

### 1.3.3 USB

(Universal serial BUS) Jedná se o univerzální sériovou asynchronní sběrnici umožňující propojit dvě zařízení mezi sebou. Standard definuje USB zařízení (device) a USB hostitele (host). Komunikace probíhá po diferenciálních párech D+ a D-. Řízení komunikace má na starost výhradně USB hostitel a zařízení odesílá data pouze na vyžádání hostitele. Sběrnice USB poskytuje danému zařízení i napájecí napětí 5 V pomocí napájecích vodičů. Proud je ve výchozím stavu omezen na 100 mA, ale na vyžádání může USB dodat i více. Specifikace USB Power Delivery umožňuje použití i vyšších proudů a napětí pro přenos výkonu až 100 W.

USB definuje několik komunikačních rychlostí. Low-Speed (1,5 Mbit/s), Full-Speed (12 Mbit/s), Hi-Speed (480 Mbit/s) a SuperSpeed (5 - 10Gbit/s). Rychlost SuperSpeed je podporována od USB 3.0, který využívá upravenou verzi konektoru s více vodiči.



Komunikační protokol USB sběrnice je relativně rozsáhlý a jeho popis sahá nad rámec této bakalářské práce.

## 1.4 Systém PoE

Systém PoE (Power over Ethernet) se hojně používá v širokém spektru síťových zařízení. Umožňuje po jednom ethernetovém kabelu přenášet spolu s komunikací také napájení pro koncové zařízení. Toto zařízení tudíž nepotřebuje žádný další napájecí zdroj

Dle normy IEEE 802.3af systém PoE definuje dvě zařízení.

### 1. Power sourcing equipment (PSE)

Jedná se o zařízení poskytující napájení. Může se jednat o ethernetové rozbočovače, přepínače, nebo přímo PoE injektory, které se vkládají do ethernetového vedení. Dle normy IEEE 802.3af je maximální dodávaný výkon omezen na 15,4 W

### 2. Powered device (PD)

Jedná se o napájené zařízení jako např. bezdrátové přístupové body, IP telefony, IP kamery atd. Dle normy IEEE 802.3af může být maximální příkon těchto zařízení 12,95W.

K distribuci napájení se používá dle normy IEEE 802.3af standardní ethernetový kabel Category 3 (CAT-3), Category 5 (CAT-5) nebo vyšší. Existují dva typy zapojení, které musí všechny PSE a PD podporovat.

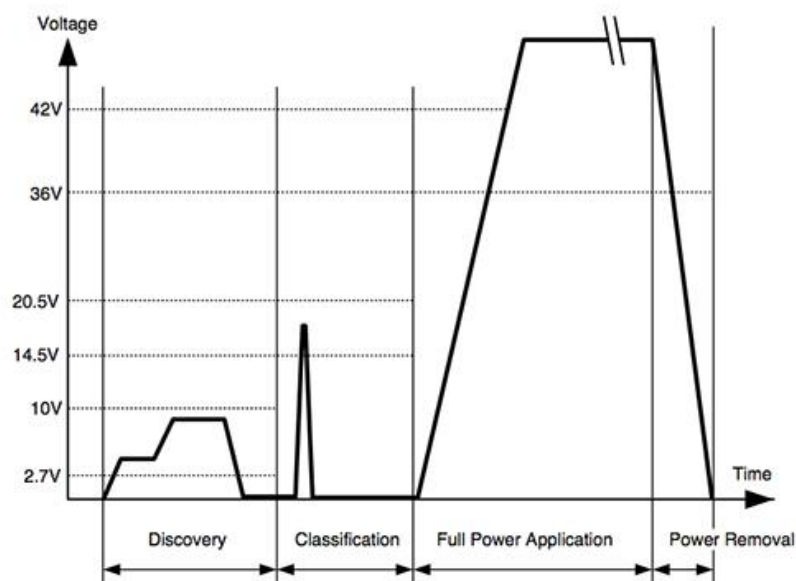
První způsob využívá dvojici nepoužitých kroucených párů u standardu 10BaseT a 100BaseT. Na tyto páry se přivede napájení, konkrétně na piny 4 a 5 kladný pól a na 7 a 8 pól záporný.

Druhý způsob přivádí napájení na střed vinutí oddělovacích transformátorů u signálových párů. Jeden pól se nachází na pinech 3 a 6 a druhý na pinech 1 a 2. U oddělovacího transformátoru PD se opět ze středů vinutí napájení odebírá.

Podle maximálního příkonu se dělí napájená zařízení (PD) do několika kategorií viz Tabulka 1. Identifikace kategorie provádí PSE před připojením napájení pomocí inicializační sekvence. Tato sekvence se skládá s několika kroků viz Obrázek 5. V prvním kroku PSE zjišťuje, zda je na jeho výstupu připojeno PD. V druhém kroku probíhá identifikace třídy zařízení pro zjištění maximálního příkonu. Pokud je identifikace úspěšná, sepne PSE plné napájení.

Tabulka 1 Třídy napájených zařízení PoE

Třída	Maximální příkon [W]
Class 0 (výchozí)	15,4
Class 1	4
Class 2	7
Class 3	15,4
Class 4	rezervováno



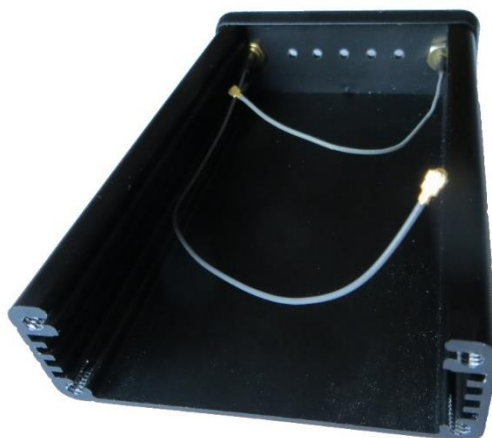
Obrázek 5 Průběh inicializační sekvence při připojení PD [6]

V roce 2005 byl definován standard PoE+, který umožňuje přenášet vyšší výkony až do 25,5 W a je zpětně kompatibilní se standardem PoE. Rozdíl je v nutnosti použití Ethernetového kabelu Category 5 nebo vyšší a také možnost využití obou způsobů připojení současně (volných párů vodičů i napájení skrz středy vinutí oddělovacích transformátorů).

## 2 HARDWAROVÝ NÁVRH

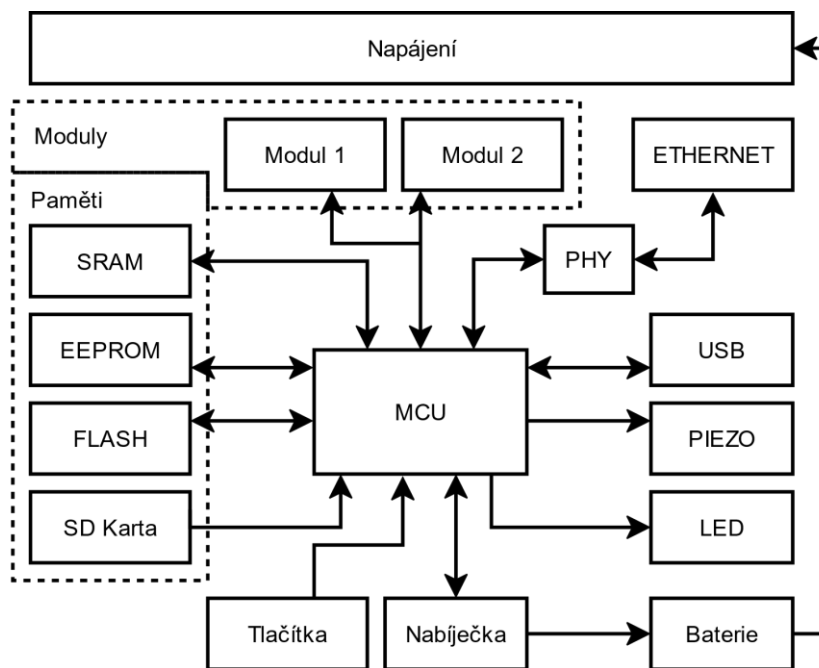
Hlavním důvod pro vytvoření tohoto zařízení byla absence modulárního systému pro bezdrátové testování a nastavování firemních výrobků. Vzhledem k tomu, že některé výrobky používají více typů bezdrátové komunikace s odlišnou technologií a na jiných frekvencích, bylo nutné pro kompletní otestování používat kombinace více zařízení podporujících tyto typy komunikací. Proto byla jedním z hlavních požadavků modulárnost zařízení s možností změny typu komunikace pomocí modulů. Současně také možnost použití alespoň dvou těchto modulů současně.

Jako první část je výběr krabičky, do které bude plošný spoj navrhován. Byla zvolena hliníková krabička s plastovými bočnicemi a odnímatelnou vrchní částí. Výhoda této krabičky je robustnost a vhodnost jejího použití i ve ztížených podmínkách. Také má po vnitřních stranách vyfrézovány drážky pro jednoduché vsunutí plošného spoje.



Obrázek 6 Použitý typ krabičky

Samotné zařízení je pro jednodušší popis rozděleno do jednotlivých bloků (Obrázek 7). Z blokového schématu je zřejmé, že veškeré ovládání a komunikaci zajišťuje mikrokontroler (MCU). V případě nedostatku interní paměti RAM má MCU k dispozici navíc jednu externí SRAM. K ukládání konfigurace a nastavení zařízení slouží paměť EEPROM. Paměť typu FLASH je určena pro přehrávání firmwaru k dočasnému uložení nové verze nebo pro logování (zaznamenávání) dat. SD karta, v případě osazení, má zastávat obsáhlejší zaznamenávání např. ladících výpisů či velkého objemu dat. Avšak tato funkce bude méně využívána a je zde především z důvodu univerzality. Tlačítka budou sloužit k restartování zařízení, uvedení zařízení do továrního nastavení nebo zapnutí/vypnutí v případě provozu z baterie. LED diody slouží podobně jako piezoelektrický měnič k indikaci aktuálního stavu. V případě osazení nabíječky může MCU řídit nabíjení a volit nabíjecí proud. Nabíjecí obvod mezitím bude zpětně předávat informace o aktuálním stavu nabíjení. Pro „drátovou“ komunikaci jsou k MCU připojeny periferie Ethernet a USB. Bezdrátovou komunikaci zajišťují dva vyměnitelné moduly. Celé zařízení také musí mít napájecí blok pro generování vhodného napájecího napětí.

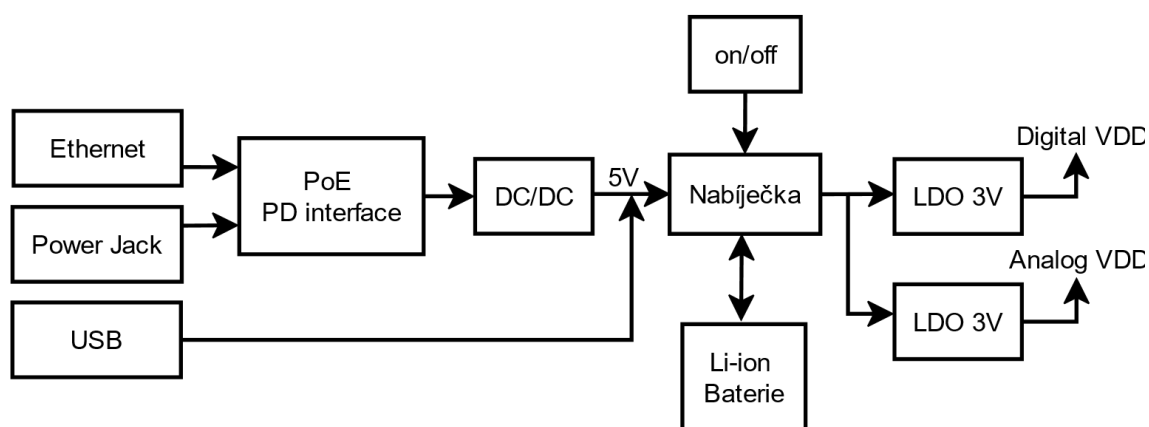


Obrázek 7 Bloková struktura Ethernet Readeru

## 2.1 Napájení

S přihlédnutím na použití zařízení byla snaha vytvořit napájení co nejvíce univerzální. Blokové schéma napájení je zobrazeno na Obrázek 8. Celkové schéma zapojení napájecí části je v příloze A.1. Část s Ethernetovým konektorem pro PoE je v příloze A.4.

Jako klasický vstup napájení byl použit konektor Power Jack pro připojení napájecího adaptéru s nominálním napětím 12 V stejnosměrných. V případě použití jako zařízení pro lokalizaci umístěné mimo dosah zdroje 12 V, nebo síťových 230 V pro připojení adaptéru, lze použít systém napájení PoE. Pokud bude zařízení používáno na testovací účely a připojeno k počítači, vystačí si s napájením z USB portu.



Obrázek 8 Bloková struktura napájecí části



Obrázek 9 Napájecí konektory a Ethernet PoE konektor

### 2.1.1 PoE PD interface

Konstrukce Ethernet Readeru byla navrhována tak, aby splňovala standard PoE+, i když pro napájení nejsou potřeba vysoké výkony. Pro vstup napájení je použit ethernetový konektor SI-52008, který je přímo uzpůsoben pro tento standard. Má vyvedeny středy vinutí signálového transformátoru a také volné páry. Napájení z tohoto konektoru je přivedeno na usměrňovací můstky, aby v případě současného použití napájení skrz volné páry a pomocí středu vinutí, nebo prohozením párů nedošlo ke zkratu. Z usměrňovacích můstků vede napájení do obvodu LM5073. Vstup je chráněn 58 V transilem proti přepětí.

Obvod LM5073 od firmy Texas Instruments slouží jako PD driver, který zajišťuje identifikační sekvenci a plynulý rozběh celého zařízení. Je uzpůsoben přímo pro použití s DC-DC měničem a ovládá jeho zapnutí po dokončení inicializace. Dle dokumentace obvodu LM5073 [6] je maximální proud odebíraný ze systému PoE interně omezen na 400 mA, avšak lze jej změnit rezistorem R9. Velikost tohoto rezistoru se vypočítá podle vzorce (1)

$$R_{DCCL}[k\Omega] = \frac{100 \text{ mA}}{I_{DC}[mA]} \cdot 127 \text{ k}\Omega \quad (1)$$

kde  $R_{DCCL}$  je hodnota rezistoru R9 v  $k\Omega$  a  $I_{DC}$  je požadovaný maximální proud v mA (maximum je dle katalogu 800 mA). Při pohledu do schématu není tento rezistor osazen a tím je výchozí proud nastaven na 400 mA. Rezistor R4 připojený na vstup RCLASS slouží pro nastavení třídy zařízení při identifikaci PoE. Tento rezistor také není osazen, čímž je zařízení identifikováno jako třída 0 s maximálním příkonem 15,4 W.

Kondenzátor C6 připojený k pinu PGOOD zajišťuje zpoždění pro deaktivaci DC-DC měniče při ztrátě Power Good stavu. Toto může být zapříčiněno napětíovou špičkou, nebo poklesem napájení na lince PoE, například při výpadku napájení a následném sepnutí záložního zdroje. Dobu, po kterou bude DC-DC měnič ještě aktivní určuje kapacita tohoto kondenzátoru, která se vypočítá dle vztahu (2):

$$C_{PGOOD} = 20 \cdot t_{PGdelay} \quad (2)$$

kde  $C_{PGOOD}$  určuje kapacitu kondenzátoru C6 v nF a  $t_{PGdelay}$  je délka zpoždění v ms. Dosazením do tohoto vzorce pro prodlevu 5 ms bude činit kapacita kondenzátoru:

$$C_{PGOOD} = 20 \cdot t_{PGdelay} = 20 \cdot 5 = 100 \text{ nF}$$

Napájení z konektoru Power Jack je taktéž připojeno k obvodu LM5073, avšak na vstup FAUX, který slouží pro detekci externího napájení a pokud je jeho napětí vyšší než 9 V, LM5073 sepne napájení bez identifikační sekvence charakteristické pro PoE. Zapojení je použito doporučené katalogové.

### 2.1.2 DC-DC měnič

Vzhledem k tomu, že napětí PoE může dosahovat dle standardu až 56 V, je použití lineárního stabilizátoru krajně nevhodné. Řešení se nachází v použití spínaného DC-DC měniče, který má mnohem vyšší účinnost a je schopen přenést vyšší výkon. Výstupní napětí jsem volil s ohledem na nabíjecí obvod pro Li-ion baterii, který pro svou správnou funkci vyžaduje napájecí napětí minimálně 4,35 V. Nejvhodnější typ DC-DC měniče schopný pracovat s napětím až 60 V byl obvod LM2594HV. Výhodou je také verze s fixním výstupním napětím pro 5 V (LM2594HV-5) a 12 V (LM2594HV-12), které nemusí obsahovat externí rezistorový dělič pro zpětnou vazbu.

Zvolena byla varianta s fixním napětím 5 V. Schéma zapojení je v příloze A.1 a vychází z katalogového. Výstupní filtrační kondenzátor je výhodné použít tantalový s nízkým ESR. Dioda D6 je zde použita schottkyho SK26 schopná snést proud až 2 A.

### 2.1.3 Nabíječka

Obvod nabíječky je uzpůsoben tak, že se v případě jeho nadbytečnosti nemusí osazovat a lze jej přemostit rezistorem 0R, což zlevní konstrukci zařízení.

Jako vhodný čip se jevil BQ24079RGT. Jedná se o nabíjecí obvod, který umožňuje automaticky nabíjet Li-ion baterie s minimem externích součástí. Velice výhodnou vlastností je, že napájecí větev jde skrz tento obvod a ten volí zdroj napájení automaticky (baterie/externí napájecí vstup), nebo v závislosti na aktuálně nastavených konfiguračních pinech.

Rezistor R15 připojený mezi GND a vstup ILIM nastavuje maximální proud procházející obvodem (nabíjecí + odebíraný zařízením). Výpočet odporu tohoto rezistoru se provede následovně:

$$R_{ILIM} = \frac{K_{ILIM}}{I_{IN-MAX}} \quad (3)$$

kde  $R_{ILIM}$  je hodnota rezistoru R15 v  $\Omega$ ,  $I_{IN-MAX}$  je maximální proud vtékající do nabíjecího obvodu v A a  $K_{ILIM}$  činí dle technické dokumentace 1525 A $\Omega$  pro proudy 200-500 mA, nebo 1610 A $\Omega$  pro proudy 500-1500 mA. Jako limitní proud jsem zvolil 800 mA. Výpočet tedy bude vypadat následovně:

$$R_{ILIM} = \frac{K_{ILIM}}{I_{IN-MAX}} = \frac{1610}{0,8} = 2012,5 \Omega \doteq 2200 \Omega$$

Rezistor R16 připojený na ISET slouží k nastavení nabíjecího proudu ve fast-charge módu (mód rychlého nabíjení, bližší informace v technické dokumentaci obvodu [8]). Měřením úbytku na tomto rezistoru se dá dopočítat aktuální nabíjecí proud. Maximální nabíjecí proud zvolené baterie (výběr popsán v kapitole 2.1.4) je dle katalogového listu 1300 mA. Z důvodu bezpečnosti nebo použití jiného typu byl zvolen

proud 600 mA. Výpočet hodnoty rezistoru R16 pro tento proud se provede následovně:

$$R_{ISET} = \frac{K_{ISET}}{I_{CHRG}} \quad (4)$$

$$R_{ISET} = \frac{890}{0,6} = 1483 \Omega \doteq 1500 \Omega$$

$R_{ISET}$  vyjadřuje hodnotu rezistoru R16 v  $\Omega$ ,  $I_{CHRG}$  je zvolený nabíjecí proud ve fast-charge módu a  $K_{ISET}$  je dle katalogu 890 A $\Omega$ .

Rezistor R24 připojený na vstupu TMR nabíječky slouží k nastavení času bezpečnostního časovače pro jednotlivé fáze nabíjení (pre-charge a fast-charge), aby se předešlo poškození baterie. Po uplynutí tohoto času se nabíjení ukončí. Rezistor ponechám stejný jako v doporučeném zapojení tedy 47 k $\Omega$ . Jednotlivé časy se vypočítají dle vzorců:

$$t_{PRECHG} = K_{TMR} \cdot R_{TMR} \quad (5)$$

$$t_{MAXCHG} = K_{TMR} \cdot R_{TMR} \quad (6)$$

kde  $t_{PRECHG}$  je doba nabíjecí fáze pre-charge v sekundách,  $t_{MAXCHG}$  určuje celkovou dobu nabíjení v sekundách,  $K_{TMR}$  je konstanta, která činí dle dokumentace 48 s/k $\Omega$  a  $R_{TMR}$  určuje rezistor R24 v k $\Omega$ . Dosazením do vzorců (5) a (6) za  $R_{TMR}$  použitých 47 k $\Omega$  lze vypočítat jednotlivé časy:

$$t_{PRECHG} = K_{TMR} \cdot R_{TMR} = 48 \cdot 47 = 2256 \text{ s} \rightarrow 37,6 \text{ min}$$

$$t_{MAXCHG} = 10 \cdot K_{TMR} \cdot R_{TMR} = 10 \cdot 48 \cdot 47 = 22560 \text{ s} \rightarrow 6,27 \text{ hod}$$

Nízká logická úroveň na pinu 15 povoluje napájení zařízení z baterie. Pokud není přítomno na nabíjecím obvodu externí napájecí napětí, automaticky dojde k přepnutí na záložní baterii. Pokud se na tomto pinu nachází vysoká logická úroveň, napájení z baterie je zakázáno a při výpadku externího napájení se celé zařízení vypne. Ve výchozím stavu R13 zajišťuje vysokou úroveň na tomto pinu, čímž je tato funkcionality zakázána. Avšak kromě R13 je zde připojeno také tlačítko a výstup MCU. V případě vypnutého zařízení stisk tlačítka přivede pin 15 na nízkou úroveň, což vyvolá sepnutí napájení z baterie a zapnutí zařízení. MCU si tento pin poté už drží v nízké úrovni sám, dokud nedostane požadavek na vypnutí.

Vstupy EN1 a EN2 slouží pro určení nabíjecího proudu. Význam jednotlivých kombinací je popsán v Tabulka 2. Nabíjecí proud může být také omezen teplotou nabíjené baterie. K hlídání teploty slouží 10 k $\Omega$  NTC termistor připojený na vstup TS.

Tabulka 2 Volba nabíjecích proudů

EN2	EN1	Nabíjecí proud
0	0	100 mA (nebo dle nastavení $I_{LIM}$ )
0	1	500 mA (nebo dle nastavení $I_{LIM}$ )
1	0	$I_{LIM}$
1	1	Stand-By (pouze napájení z baterie)

Nabíjecí obvod obsahuje také výstupy PGOOD a CHG indikující aktuální stav nabíječky. Tyto piny jsou připojeny k MCU.

### 2.1.4 Baterie

Nabíjecí baterie byla zvolena lithium-iontového typu (Li-ion). Výhoda těchto baterií spočívá v relativně velké kapacitě i při zachování malých rozměrů. Důležitým parametrem při výběru činila malá výška a co nejvyšší kapacita. Výška baterie nesměla přesáhnout 3,5 mm, aby se vlezla do meziprostoru mezi desku plošných spojů a krabičku. Vyhovující typ byl kus LP304778 od Cellevia batteries prodáváný firmou TME. Baterie obsahuje i zabudovanou ochranu proti zkratu a podbití. Udávaná kapacita 1300 mAh udrží celé zařízení napájet přibližně 3 hodiny při odhadované celkové spotřebě 400 mA. Baterie zde slouží jen jako záloha v případě výpadku hlavního zdroje energie, proto je tato výdrž dostačující.

Napětí baterie je vedeno také na odporový dělič tvořený rezistory R1 a R2, který toto napětí sníží na polovinu. Díky tomu bude vhodné pro měření A/D převodníkem v MCU. Proud tímto děličem musí být co nejnižší, aby baterii zbytečně nevybíjel.

Firmware v MCU bude napětí baterie hlídat a v případě napájení z baterie a poklesu napětí pod 3,2 V vypne z bezpečnostních důvodů zařízení, protože při této hodnotě přestávají plně fungovat lineární LDO stabilizátory popsané v kapitole 2.1.5.

### 2.1.5 LDO Stabilizátory

Výstupní napětí z nabíječky se může pohybovat od 5 V (při napájení z externího zdroje) do cca 2,8 V, kdy vypíná interní ochrana baterie. Toto napětí je nutné tedy stabilizovat. Vzhledem k předpokládanému použití externího oscilátoru generujícího přesnou frekvenci pro některé z bezdrátových modulů, je vhodné jeho analogové napájení oddělit od napájení digitálních částí. Proto byly použity lineární LDO stabilizátory pro digitální a pro analogovou část zvlášť. Jejich výstupní napětí bylo voleno v ohledu na použité součásti. Vyhovující je napětí 3 V, také z důvodu korektní funkce stabilizátorů i při nižších napětích baterie.

Stabilizátory ADP124 mají nízký úbytek 130 mV při zátěži 0,5 A. Vyrábí se v nastavitelných i fixních variantách výstupního napětí. Pro tyto účely byla zvolena fixní varianta ADP124ARHZ-3.0-R7 s výstupním napětím 3 V. Zapojení je použito katalogové.



## 2.2 MCU

Volba MCU závisí především na použitém počtu periférií, požadovaném výkonu, spotřebě a také paměťové náročnosti. V tomto případě je nutný především výkon pro zpracování ethernetového připojení, USB a obsluhu bezdrátových modulů. Z toho vyplývá také spotřeba zařízení, která úměrně roste s požadovaným výkonem. Množství periférií připojené k MCU také zvyšuje paměťovou náročnost ať už po stránce paměti programové tak i datové. Pro splnění těchto požadavků je vhodné použít mikrokontrolery z rodiny ARM.

Z výše uvedených parametrů byl vybrán mikrokontroler LPC4078 od firmy NXP v pouzdře 144-pin LQFP (Obrázek 10). Jedná se o 32 bitový mikrokontroler postavený na jádře ARM Cortex-M4 s Harvardskou architekturou. Výhoda je přítomnost FPU, která výrazně urychluje aritmetické operace s čísly s plovoucí řadovou čárkou. CPU může pracovat až na frekvenci 120 MHz

MCU obsahuje 512 kB programové paměti FLASH a 96 kB paměti RAM, kterou lze rozšířit pomocí EMI (External memory controller) o externí SRAM nebo SDRAM. Interní periférie SD card interface, zajišťuje komunikaci s SD kartami na hardwarové úrovni, čímž zmenšuje softwarovou režii nutnou pro obsluhu komunikace.

Mezi další periférie patří Ethernet MAC interface podporující 10 nebo 100 Mbit/s PHY zařízení zahrnující standardy 10 Base-T, 100 Base-TX, 100 Base-FX a 100 Base-T4, USB device controller umožňující komunikaci rychlostí full-speed (12 Mb/s), UART pro asynchronní a SPI pro synchronní sériovou komunikaci.

Bližší popis jednotlivých periférií lze najít v dokumentaci tohoto MCU [7].

Pro napájení je použita větev 3 V s blokovacími kondenzátory 100 nF na napájecích vstupech MCU. Dále je zde připojen hodinový krystal 32,863 kHz pro interní RTC. Jako hlavní zdroj taktovacího kmitočtu slouží oscilátor generující hodinový signál 38,4 MHz pro moduly Decawave. Tento signál je dělen děličkou dvěma na 19,2 MHz, protože vstup externího hodinového signálu v MCU zvládne pracovat maximálně s frekvencí 25 MHz. Bližší popis oscilátoru je v kapitole 2.4.2.



Obrázek 10 LPC4078 v pouzdře LQFP 144-pin

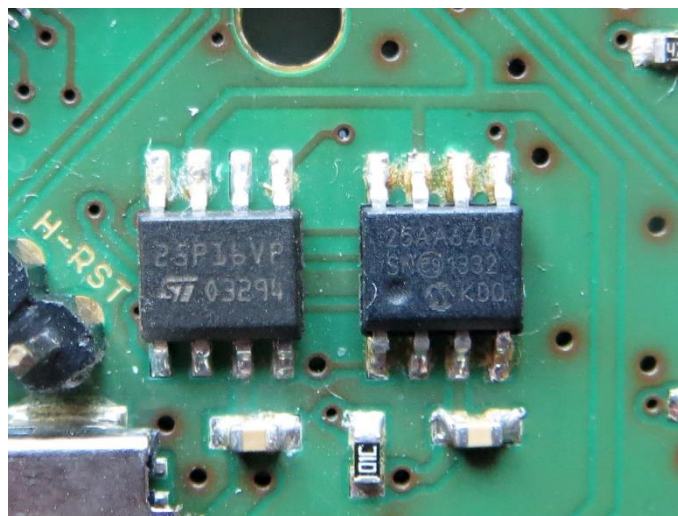
## 2.3 Paměti

K MCU je připojeno několik typů pamětí sloužící k různým účelům. Jejich zapojení je zřejmé ze schématu v příloze A.2.

Paměť SRAM slouží u MCU k rozšíření kapacity interní RAM v případě jejího nedostatku. Byl zvolen typ AS6C1008 s kapacitou 1 Mb (Obrázek 12). Paměť je připojena pomocí paralelní sběrnice k bloku EMI (External Memory Controller) v MCU. V případě, že paměť nebude v konečné aplikaci potřeba, nemusí se osazovat, čímž se sníží také výsledná výrobní cena.

Paměť EEPROM společně s pamětí FLASH jsou připojeny pomocí SPI sběrnice. Účel paměti EEPROM je pro ukládání konfigurace zařízení a sériového čísla. Byl zvolen typ 25AA640 s dostatečnou kapacitou 64 kb. Paměť FLASH slouží pro ukládání většího množství dat z logování nebo přehrávání firmwaru. Zvolený typ M25P16 od firmy Micron Technology disponuje 16 Mb paměti.

Pokud by i přesto paměť nedostačovala, je k MCU připojen slot na microSD kartu. Využívá se interní SD card interface, který dokáže automaticky zprostředkovávat komunikaci s SD kartou (generování hodinového signálu, odesílání a příjem příkazů a dat, generování kontrolního součtu atd.).



Obrázek 11 Paměti FLASH a EEPROM



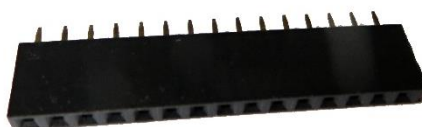
Obrázek 12 Slot na microSD kartu a paměť SRAM

## 2.4 Bezdrátové moduly

Jak bylo v úvodu popsáno, požadavkem byl návrh tří typů modulů pro tři typy bezdrátové komunikace. Na hlavní desce budou přítomny dva sloty pro připojení dvou typů modulů současně.

### 2.4.1 Připojení

Sloty pro moduly musí být univerzální a kompatibilní se všemi třemi typy. Jako univerzální konektor byla zvolena nízkoprofilová dutinková lišta umožňující uchycení modulu v co nejnižší výšce nad hlavní řídicí deskou (Obrázek 13). Celková výška i s osazenými moduly nesmí překročit velikost krabičky do které bude zařízení zasazeno. Na dutinkové liště musí být přítomny všechny signály pro bezproblémové ovládání jakéhokoliv typu modulu. Plošné spoje modulů budou osazeny kolíkovými lištami (Obrázek 14), které jsou protikusem k výše zmíněné dutinkové liště.



Obrázek 13 Dutinková lišta



Obrázek 14 Kolíková lišta

Vzhledem k tomu, že všechny moduly komunikují po sběrnici SPI, na konektoru musí být vyvedeny signály MOSI, MISO a SCK. Pro volbu, se který zařízením se bude na sběrnici komunikovat je nutný signál CS, který zároveň spíná výstup MISO přes buffer SN74LVC1G125DBVR k MCU. V případě nutnosti restartovat modul např. před inicializací, musí být přítomen také reset. Indikace důležitých stavů, jako je příjem dat, zajišťuje přerušovací signál IRQ. Na konektoru se vyskytuje dalších 5 signálů, které každý modul využívá k jinému účelu, nebo jsou nevyužity. Systém jejich ovládání bude definován ve firmwaru MCU v závislosti na aktuálně osazeném modulu. Nanotron modul a Decawave modul potřebují ke své činnosti také zdroj hodinového signálu, který bude generovaný na desce Ethernet Readeru. Popis generování hodin obsahuje kapitola 2.4.2. Nakonec nejdůležitější věc, která musí být na konektoru přítomna je napájecí větev 3 V a také GND. Napájení k jednotlivým modulům lze pomocí MCU zapnout, nebo vypnout.

Připojení antén bude realizováno pomocí SMA-U.FL pigtailu (Obrázek 15). Umístění dvou SMA konektorů je na čelní straně krabičky viz Obrázek 16.



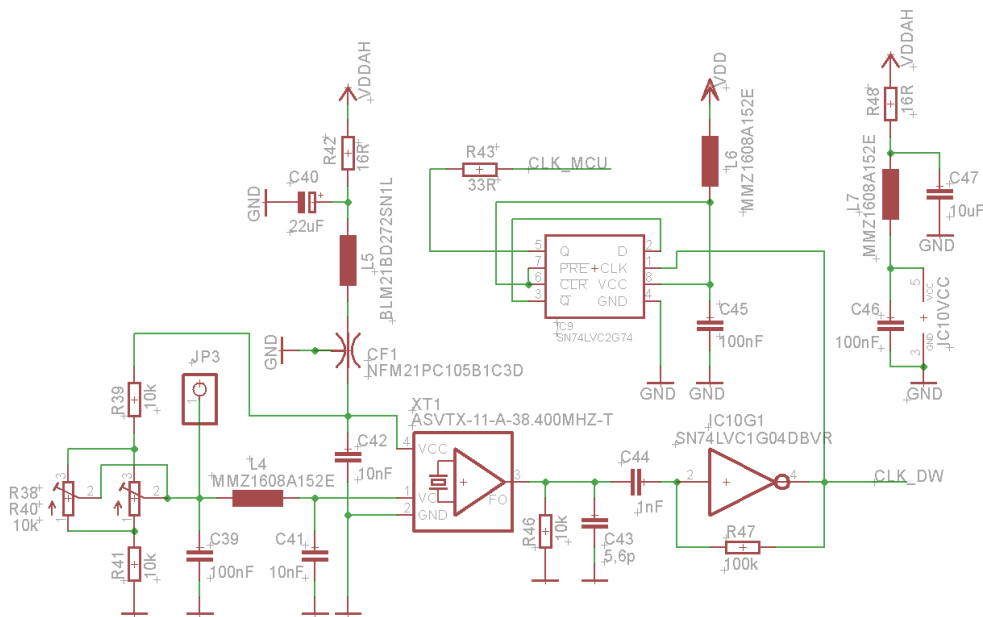
Obrázek 15 SMA – U.FL pigtail



Obrázek 16 Umístění SMA konektorů

## 2.4.2 Generování hodinového signálu

Tento oscilátor slouží především pro generování přesného hodinového signálu 38,4 MHz pro moduly Decawave. Schéma zapojení je v příloze A.3. Oscilátor je tvořen obvodem ASVTX-11-A-38.400MHZ. Tento obvod má napěťový vstup, který mu umožňuje fungovat jako VCO. V tomto případě byl na vstup připojen trimr pro jemné doladění. Výstup oscilátoru je veden skrz tvarovací obvod na vstup invertoru, který vytvoří na svém výstupu obdélníkový signál vhodných úrovní pro taktování modulů Decawave. Zároveň klopný obvod typu D tvořený SN74LVC2G74 a zapojený jako dělička, dělí tento hodinový signál dvěma a následně ho vede do MCU.



Obrázek 17 Zapojení oscilátoru pro generování hodinového signálu

Moduly používající Nanotron potřebují ke své činnosti hodinový signál 32 MHz. Tento signál generuje samotný MCU na výstupu CLKOUT při vhodném nastavení. Schmittův klopný obvod zajistí správné úrovně a posílení signálu, takže nemusí být zatěžován výstup MCU.

## 2.4.3 SX modul

Tento modul umožňuje vysílat na frekvenci v rozsahu 863 MHz – 870 MHz. Frekvence je volitelná a lze nastavovat softwarově. Pro realizaci tohoto rozsahu frekvencí s danou modulací byl zvolen čip SX1211 od firmy Semtech.

Samotný čip podporuje bezdrátovou komunikaci v rozsahu 863-870 MHz, 902-928 MHz, nebo 950-960 MHz v závislosti na softwarovém nastavení a použitých periferních součástkách. Pro výstupní vysokofrekvenční signál lze volit mezi OOK a FSK modulací. Čip taktéž provádí měření síly signálu (RSSI). Přenosová rychlost dosahuje až 200 kb/s a výkon výstupního signálu až 12,5 dBm. Výhodou je malé pouzdro TQFN s rozměry 5x5 mm.

Komunikaci mezi čipem a základní deskou Ethernet Readeru obstarává sběrnice SPI

společně s řídicími signály `nss_data`, `nss_config`, `irq_0`, `irq_1` a `reset`. Význam signálů `irq_0` a `irq_1` se mění na nastaveném pracovním módu čipu. Tabulka 3 popisuje význam řídicích signálů pro nastavení v buffered módu pro tento typ aplikace.

Tabulka 3 Popis řídicích pinů SX modulu

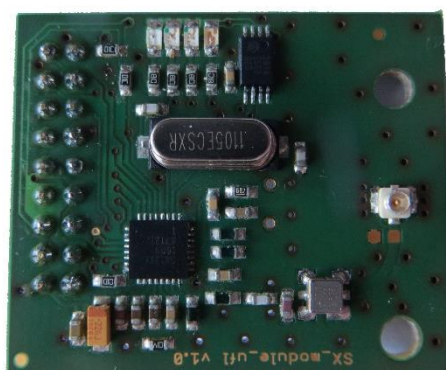
Řídicí signál	Směr	Význam
<code>nss_data</code>	Vstup	CS (chip select) signál SPI sběrnice pro odesílání/čtení dat určených pro bezdrátový přenos.
<code>nss_config</code>	Vstup	CS (chip select) signál SPI sběrnice pro konfiguraci registrů v čipu SX1211
<code>irq_0</code>	Výstup	Signál pro generování externího přerušení řídicího MCU v případě příjmu synchronizačního burstu. V tomto okamžiku je možné vyčíst sílu signálu (RSSI).
<code>irq_1</code>	Výstup	Signál indikující úspěšný příjem bezdrátového packetu

Schéma zapojení je v příloze A.7 a vychází z doporučeného katalogového. Hodnoty součástek jsou také voleny dle doporučeného katalogového zapojení pro frekvence 868 MHz. Jako výstupní SAW filtr byl zvolen model B39871B3715U410, který má v požadovaném frekvenčním rozsahu útlum maximálně 4 dB. Šířka pásma tohoto filtru je 2 MHz

Výsledný layout součástek na DPS se přibližuje také doporučenému katalogovému. SMD součástky velikosti 402 byly nahrazeny velikostí 603 z důvodu lepšího pájení v případě ručního osazování.

Na modulu je také přítomna jedna EEPROM paměť 25AA010 o velikosti 1 kb pro uložení konfigurace pro konkrétní modul. Do konfigurace patří například nastavené napětí VCO, které je vhodné softwarově doladit na správný rozsah udávaný v katalogu. Díky tolerancím součástek se může jeho výsledná hodnota lišit.

Pro indikaci komunikace a stavu na linkách slouží čtveřice LED diod připojených na řídicí signály `irq_0`, `irq_1` a `nss_data`. Poslední LED indikuje přítomnost napájení modulu.



Obrázek 18 SX modul

## 2.4.4 Nanotron modul

Pro realizaci bezdrátové komunikace na frekvencích 2400–2483,5 MHz slouží čip NA5TR1 od firmy Nanotron. Bezdrátová komunikace využívá technologie CSS (Chirp spread spectrum), která je patentovaná touto firmou. Pomocí této technologie lze provádět mimo bezdrátové komunikace také měření vzdálenosti. Rychlost přenosu dat může dosahovat až 1 Mb/s. Čip umožňuje také měřit sílu signálu RSSI. Pro komunikaci lze využít přístup FDMA využívající 7 vysílacích pásem, z nichž 3 se vzájemně nepřekrývají. Výstupní vysílací výkon je 0 dBm (1 mW).

Komunikaci s MCU zajišťuje sběrnice SPI s jedním CS signálem. Dále je na konektor vyvedeno externí přerušení spolu se signálem D3, jehož účel je konfigurovatelný v samotném čipu. Piny HGM a PAEN/EN slouží pro řízení výstupního front-end čipu. HGM pro nastavení zesílení a PAEN/EN pro zapnutí/vypnutí tohoto čipu.

Schéma zapojení modulu je v příloze A.15 a vychází z doporučeného zapojení výrobce. Jediný rozdíl je v nahrazení výstupního BALUN obvodu RF front-end zesilovačem CC2590 s vysílacím výkonem až 14 dBm. Celkový vysílací výkon modulu může dosahovat tedy až 14 dBm. Krystalový 32 MHz oscilátor není využit a používá se externí hodinový signál generovaný MCU z Ethernet Readeru. Napájecí napětí 2,7 V je získáno pomocí lineárního nastavitelného stabilizátoru ADP125ARHZ-R7 ze vstupních 3 V. Pro správné napětí je třeba dopočítat napěťový dělič. Vzhledem k tomu, že požadujeme co nejmenší proud, budou rezistory co nejvyšší. Dokumentace doporučuje použít rezistor  $R_1$  o hodnotě 200 k $\Omega$  a menší. Proto vyjdeme ze vztahu (7) a dopočítáme si hodnotu  $R_2$  následovně:

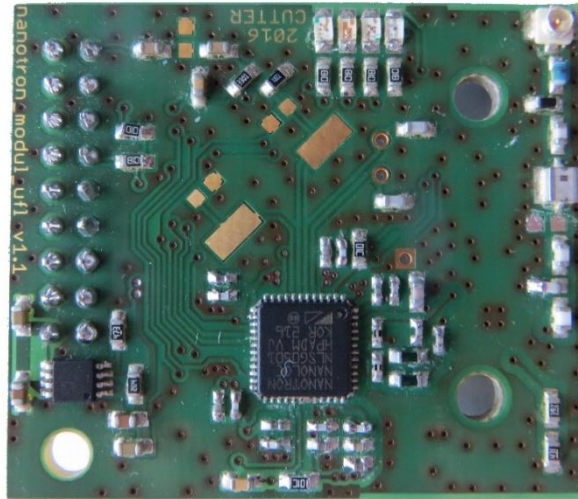
$$R_2 = \frac{R_1 \cdot U_2}{U_1 - U_2} \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{200 \cdot 0,5}{2,7 - 0,5} = 45,45 \text{ k}\Omega \doteq 47 \text{ k}\Omega$$

kde  $R_2$  je spodní rezistor děliče ( $R_{39}$  ve schématu),  $R_1$  označuje horní rezistor děliče, který jsme zvolili 200 k $\Omega$  z důvodu co nejnižšího proudu ( $R_{44}$  ve schématu),  $U_2$  je napěťová reference stabilizátoru (v tomto případě 0,5 V dle dokumentace) a  $U_1$

požadované výstupní napětí stabilizátoru.

Na modulu je osazena čtveřice LED diod indikujících provoz na signálech CS, IRQ a TX\_RX. Poslední LED dioda svítí při přítomnosti napájecího napětí modulu.



Obrázek 19 Nanotron modul

### 2.4.5 Decawave modul

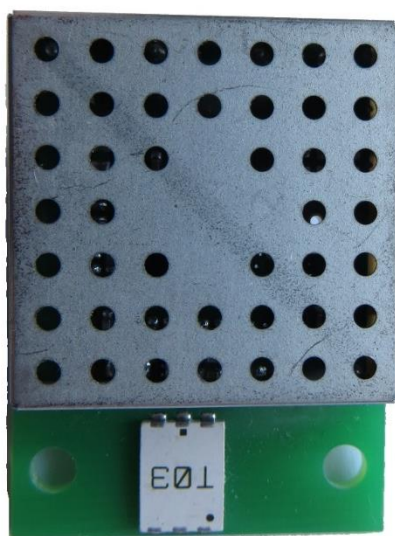
Komunikaci na frekvenci 3200-7200 MHz zajišťuje Decawave modul osazený čipem DW1000, který využívá technologii UWB (Ultra wide band). Přenosové rychlosti mohou dosahovat až 6,8 Mb/s. Podobně jako Nanotron modul podporuje tento čip měření vzdálenosti s přesností až 10 cm.

Komunikaci s MCU zajišťuje sběrnice SPI s jedním CS signálem. Kromě resetovacího signálu se na výstupním konektoru nachází externí přerušování a signály W\_SYNC a WAKEUP. Signál W\_SYNC slouží k synchronizaci časových značek při použití více Decawave modulů pro přesnou lokalizaci. WAKEUP pin slouží k probuzení modulu ze sleep, nebo deep sleep režimu.

Schéma zapojení vychází z doporučeného zapojení výrobce a je uvedeno v příloze A.10. Krystalový oscilátor není využit a používá se zdroj externích hodin z Ethernet Readeru. Na schématu jsou také čtyři LED diody připojené k GPIO pinům čipu DW1000. Tyto piny jsou softwarově konfigurovatelné a umožňují si zvolit jakou funkci budou plnit. Předpokládá se využití pro detekci přijetí hlavičky, odesílání paketu a příjem paketu.

Návrh plošného spoje modulu bude jako jediný využívat 4 vrstvou technologii z důvodu doporučení v dokumentaci tohoto čipu.





Obrázek 20 Decawave modul se stínícím krytem a keramickou anténou

## 2.5 Ethernet

Schéma zapojení ethernetové části je v příloze A.4. Samotná periferie ethernetu v použitém MCU neobsahuje fyzickou vrstvu modelu OSI a musí být realizována pomocí externího PHY čipu. Propojení mezi MCU a PHY používá RMII (Reduced Media Independent Interface).

Jakožto PHY byl zvolen LAN8720A. Výhodou je malé pouzdro QFN24 a kompatibilita se standardem 10BASE-T a 100BASE-T. Tento obvod je napojen přímo k MCU dle doporučeného zapojení výrobce. Ethernetový konektor byl zvolen SI-52008 s integrovaným transformátorem a podporou PoE. LED diody na konektoru jsou napojeny k PHY, který řídí jejich svit v závislosti na aktuálním stavu.

## 2.6 USB

Použitý mikrokontroler v sobě obsahuje USB device blok, který dokáže realizovat komunikaci rychlostí Full speed (12 Mb/s). Pro připojení se využívá micro USB konektoru, jelikož má relativně malé rozměry a v dokumentaci udávaný nejvyšší počet cyklů připojení a odpojení ze všech USB konektorů. Detekci připojení zde tvoří napěťový dělič, který slouží zároveň pro měření napájecího napětí. V případě napájení z USB a výskytu vysokých úbytků na propojovacím kabelu, bude snížen nabíjecí proud baterie, nebo nabíjení úplně zakázáno.

Schéma zapojení je v příloze A.2. Tranzistor Q2 zvedá linku D+ do vysoké úrovně přes rezistor 1,5 k $\Omega$  v případě, kdy je potřeba provést reinicializaci zařízení.

## 2.7 Signalizace

Pro zobrazení a hlášení stavů je k dispozici několik LED diod a také piezoelektrický reproduktor. Pětice LED diod bude umístěna na čelním panelu mezi konektory antén, jak bylo vidět na Obrázek 16 v kapitole 2.4.1. Další signalizační dioda bude skrytá uvnitř zařízení a využití nalezne především při odlaďování firmwaru.

Jednotlivé významy signalizace pomocí LED diod, nebo piezo-reproduktoru udává Tabulka 4

Tabulka 4 Signalizace a její význam

Signalizace	Barva	Význam
LED1 (vlevo)	Zelená	<b>Signalizace stavu napájení:</b> Nesvíí – <i>Zařízení vypnuto</i> Svíí – <i>Zapnuto, externí napájení, baterie se nenabíjí</i> Blikání s dlouhým svitem a krátkým pohasnutím – <i>Zapnuto, externí napájení, nabíjení baterie</i> Blikání s krátkým svitem a dlouhým pohasnutím – <i>Zapnuto, napájení z baterie</i> Blikání se střídou 1:1 - <i>Zapnuto, napájení z baterie, baterie téměř vybita</i>
LED2	Zelená	<b>Signalizace aktivního TCP/UDP spojení:</b> Nesvíí – <i>Nepřipojeno</i> Svíí – <i>Spojení aktivní</i> Bliká – <i>Probíhá přenos dat</i>
LED3	Červená	<b>Signalizace chybového stavu:</b> Svíí – <i>Nastala chyba. (V případě aktualizace firmwaru signalizuje aktivní bootloader)</i> Bliká – <i>Vybitá baterie</i>
LED4	Žlutá	<b>Signalizace stavu modulu 1:</b> Nesvíí – <i>Modul neosazen/vypnut</i> Svíí – <i>Modul osazen aktivní</i> Bliká – <i>Aktivní bezdrátová komunikace</i>
LED5 (vpravo)	Žlutá	<b>Signalizace stavu modulu 2:</b> Nesvíí – <i>Modul neosazen/vypnut</i> Svíí – <i>Modul osazen aktivní</i> Bliká – <i>Aktivní bezdrátová komunikace</i>
Piezoelektrický reproduktor	-	<b>Signalizace varovných a informačních stavů:</b> krátké pípnutí – <i>Zapnutí/restart zařízení</i> dlouhé pípnutí – <i>Odpojení/připojení externího zdroje</i> dlouhé pípnutí opakující se co 10 sekund a doprovázeno blikáním červené LED – <i>vybitá baterie</i>

## 3 FIRMWARE

Při psaní firmwaru byly použity interní knihovny firmy Cutter Systems spol. s r.o., které jsou jejím vlastnictvím, a tedy nemohou být zveřejněny. Dále projekt využívá volně dostupné knihovny LPC Open od firmy NXP. Tyto knihovny jsou dostupné ke stažení na webu firmy NXP ([www.nxp.com](http://www.nxp.com))

Celý firmware byl psán v jazyce C a ve vývojovém prostředí LPCXpresso, které lze stáhnout na stránkách firmy NXP.

Jelikož je samotný firmware relativně obsáhlý byla vygenerována dokumentace stručně popisující soubory, funkce, struktury a další součásti. Dokumentace se nachází pod názvem *Firmware\_documentation.rtf* ve složce spolu s firmwarem na příloženém CD. Tato dokumentace je vygenerována strojově s pomocí programu Doxygen.

### 3.1 Úkol firmwaru

Hlavním úkolem firmwaru v mikrokontroleru bude routování (přeposílání) paketů z drátového rozhraní (Ethernet, USB atd.) na bezdrátové a zpět za účelem zajištění komunikace mezi počítačem, nebo případně serverem a zařízeními využívajícími bezdrátovou komunikaci od firmy Cutter Systems spol. s r.o.

Mezi další funkcionality firmwaru bude patřit měření síly signálu (RSSI) a šumu v pozadí pomocí SX modulů, probouzení bateriových zařízení ze spánku, měření napájecích napětí, měření teploty, zajištění komunikace po USB nebo Ethernetu, nahrávání a ukládání konfigurace, přehrávání firmwaru atd.

### 3.2 Bootloader

Po připojení napájení se začne mikrokontroler vykonávat kód od adresy 0, kde začíná samotný program definovaný funkcí *main* v souboru *main\_bootloader.c*. Hlavním úkolem této části kódu je spuštění hlavního firmwaru, nebo jeho případné přehrávání, pokud je k dispozici jiná verze.

Na začátku funkce je provedena inicializace základních funkcionalit pro chod mikrokontroleru. Patří mezi ně převážně inicializace hodinového signálu a nastavení taktovací frekvence CPU. Aby nedocházelo ke kolizím na sběrnících a nespécifikovanému chování periférií je provedena konfigurace jednotlivých pinů s nastavením jejich definovaných úrovní. Nyní je možné pokračovat ve vykonávání následujících úkolů.

V první části se zjišťuje, zda se nachází v paměti mikrokontroleru hlavní firmware. Pokud ano, dojde ke skoku na začátek tohoto firmwaru a ten se začne vykonávat. V případě že firmware přítomen není, je rozsvícena červená LED a zavolána funkce *bootloader*, která provede pokus o jeho vyhledání v externí paměti FLASH. Poté se tento kód přepokopíruje z externí do interní paměti FLASH mikrokontroleru a spustí se. Pokud by nebyl firmware přítomen i v externí paměti, což je téměř nepravděpodobný stav, provede se rozsvícení zelené LED a program uvízne v nekonečné smyčce. Jediná možnost, jak v tomto stavu nahrát nový firmware, je pouze s využitím programátoru.

## 3.3 Hlavní firmware

### 3.3.1 Inicializace

Hlavní firmware začíná funkcí *main* v souboru *main.c*. Podobně jako u bootloADERu je v první části provedena inicializace pinů s nastavením jejich konfigurace a výchozích stavů. Stáhnutím pinu nabíječky SYSOFF do logické nuly dojde k povolení napájení z baterie. Tím se zajistí, aby zařízení zůstalo napájeno i v případě, že není přítomen externí zdroj.

Následná inicializace a spuštění watchdogu je provedena pouze pro Release build tohoto firmwaru. Watchdog je speciální čítač, který v případě dosažení nastavené hodnoty provede reset mikrokontroleru. V průběhu běhu hlavní smyčky je periodicky nulován. Slouží jako pojistka v případě, že by firmware zůstal zaseknutý v některé ze smyček, nebo se dostal do nespécifikovaného stavu. V tomto případě je maximální hodnota čítače nastavena na jednu sekundu.

Dále je provedeno nastavení externího zdroje hodinového signálu pro násobičku, která zvýší jeho frekvenci až na 96 MHz. Tento hodinový signál je poté použit pro taktování CPU a ostatních periférií.

Následuje inicializace interních a externích periférií jako je paměť FLASH, EEPROM, UART, SPI, ADC, a také načtení uložených konfigurací. To má na starost funkce *load\_configuration*, která provádí vyčítání dat z paměti EEPROM pro každou konfiguraci zvlášť. Data jsou zabezpečena kontrolním součtem CRC. V případě poškození dat je načteno výchozí nastavení.

Za zmínku stojí inicializace periférie Ethernet a USB. Vždy je aktivní pouze jedna z periférií v závislosti na konfiguraci. Pokud je v konfiguraci USB povoleno a zároveň je připojen USB kabel (napětí na USB konektoru je vyšší než 4 V) dojde k nastavení PHY do power down módu a zakázání Ethernetu. Pokud však konfigurace USB periférii zakazuje, nebo není kabel připojen, je aktivní právě Ethernet. Toto chování je záměrné z důvodu dosud nezjištěné chyby v knihovnách. Pokud obě zařízení běží současně, dochází buďto k nefunkčnosti ethernetového připojení, nebo k pádu zařízení do tzv. Hard Faultu (přerušení z důvodu výskytu kritické chyby). Pravděpodobně tento problém způsobuje využívání stejného úseku paměti RAM, či jednoho kanálu DMA řadiče. Řešení tohoto problému by zahrnovalo detailní prostudování obou knihoven a jejich funkcionalit.

Před inicializací modulů se provádí ještě testování LED diod, které jsou na jednu sekundu rozsvíceny a zkouška piezoelektrického reproduktoru.

Samotná detekce a inicializace modulů se započne voláním funkce *modules\_init*. Zdrojový kód této funkce se nachází v souboru *modules.c*. Proces inicializace spočívá v zapnutí napájení do obou slotů. Poté se provádí detekce prvního modulu pokusem o vyčtení předem známých registrů v čipu. Srovnáním vyčtených hodnot s očekávanými se rozhodne, o který modul se jedná. Následuje konkrétní nastavení funkcionalit pinů mikrokontroleru připojených k modulu a jeho samotná inicializace. Totéž se provede i pro druhý modul. V případě že ve slotu není detekován žádný modul je napájení pro tento slot vypnuto. Pokud je ale modul ve slotu detekován a v konfiguraci tento slot zakazuje, provede se jeho nastavení do power down režimu (režim snížené spotřeby). Napájení daného slotu zůstane zachováno, aby nedocházelo k ovlivňování sběrnice SPI.

Po dokončení inicializaci se povolí nabíjení baterie a pokračuje vykonáváním hlavní smyčky.

### 3.3.2 Hlavní smyčka

Hlavní smyčka je nekonečná smyčka, běžící stále dokola. V této smyčce jsou prováděny veškeré obsluhy periférií, příjem paketů, routování, obsluha měření a také v případě potřeby vypnutí zařízení nebo spuštění bootloaderu pro přehrání firmwaru.

Taktéž je v této smyčce vykonávána obsluha funkcí jako je test komunikace, odesílání wakeup burstů, vysílání majáku, nebo restartování modulů v případě jejich zaseknutí.

### 3.3.3 Příjem paketů

Příjem dat a obsluhu periférií zajišťují periodicky volané funkce v hlavní smyčce, které zde budou blíže popsány.

#### USB

Pro obsluhu USB je volána funkce *USB\_CDC\_handle*. Tato funkce zajišťuje obsluhu USB D protokolu a funkcionalitu virtual COM port. Pro tyto účely jsou využívány knihovny *usb\_lib\_cdc\_uart*, které jsou součástí LPC Open. Funkce *usb\_pck\_handle* má na starosti přijímání paketů posílaných skrz virtual COM port. Kód této funkce je součástí souboru *extcomm.c*. Zde jsou inicializovány buffery pro příjem a odeslání paketů. Poté se testuje, zda byl přijat paket. Pokud ano přejde se na zpracování paketu následované případným odesláním odpovědi.

#### Ethernet

Obsluha Ethernetu je realizována voláním funkce *networking\_handle*. Tato funkce má na starost kompletní obsluhu ethernetového spojení i s potřebnými protokoly. Pro obsluhu je využíváno knihoven LPC Open a Lwip, k zajištění a realizaci TCP/UDP spojení. Taktéž je zde zahrnuta obsluha jednoduchého webového serveru. Funkce v případě přijetí paketu sama provádí zpracování popsané v kapitole 3.3.4.

#### UART

Funkce *uart\_sys\_pck\_handle* slouží k příjmu paketů prostřednictvím systémového UARTu. Předpokládáné využití tohoto portu pro komunikaci je minimální z důvodu konektoru umístěného uvnitř zařízení. Předpokládá se užití spíše pro vývojové účely. Ale i přesto je zde příjem a odesílání paketů ošetřeno. Kód funkce se nachází v souboru *extcomm.c*. Zde jsou podobně jako u USB vyhrazeny buffery pro příjem a odesílání paketů. Poté je prováděna detekce přijatého paketu, která v případě úspěšnosti předá paket ke zpracování funkci *packet\_handle*. V případě nutnosti dojde k odeslání odpovědi.

#### Moduly

Zpracování přijatých paketů z bezdrátových modulů mají na starosti funkce *module1\_handle* a *module2\_handle*. Tyto funkce jsou identické. Liší se jen slotem se kterým pracují. Kód funkce je popsán v souboru *extcomm.c*. Zde dochází k odlišnému zpracování paketů v závislosti na aktuálně vloženém modulu.

Pro SX modul je volána funkce *sx\_pck\_handle*, která má podobně jako u UARTu

vyhrazené buffery pro příjem a odesílání a v případě detekování paketu provede jeho zpracování a odeslání odpovědi.

Pro Nanotron modul je volána funkce *nanotron\_task*, která sdružuje obsluhu více funkcionalit dohromady (příjem paketů, synchronizaci hodin mezi nanotrony popř. měření vzdálenosti atd.) V případě příjmu paketu je volána funkce *APLCallback* ze souboru *nanotron.c*. Zde je v závislosti na typu paketu provedeno jeho zpracování.

Pro modul typu Decawave byla v průběhu vypracovávání této práce připravována knihovna. Proto práce s tímto modulem není plně implementována. Avšak je zde připraven prostor pro budoucí doplnění této funkcionality.

### 3.3.4 Zpracování paketů

Všechny příchozí pakety po Ethernetu, USB, nebo od bezdrátových modulů musí mít specifický tvar, který je definován použitým protokolem (dále jen Cutter protokol). Použitý protokol zde nemůže být popsán, jelikož se jedná o firemní tajemství.

Zpracování všech paketů je prováděno v interní knihovně *packet\_handle.c*. Systémové požadavky určené tomuto zařízení jsou zpracovány přímo touto knihovnou a odpověď na ně je odeslána v rámci obsluhy dané periferie. Pro obsluhu ostatních požadavků slouží funkce v souboru *extcomm.c*. Konkrétně se jedná o funkce *dev\_handle*, *dev\_broadcast\_handle* a *packet\_route*.

Funkce *dev\_handle* je volána ze systémové knihovny v případě, že adresa přijatého paketu je shodná s adresou zařízení a jedná se o požadavek na funkcionalitu zařízení. V této funkci je rozlišeno, o jaký typ požadavku jde. V případě, že se jedná o požadavek na interní službu je zavolána funkce *is\_dev\_handle*, která má na starosti zápis, vyčítání a ukládání konfigurace. Taktéž zajišťuje vyčtení stavu zařízení a obsluhu servisních požadavků jako např. spuštění komunikačního testu, navrácení jeho výsledků, vyčtení tabulky RSSI, vypnutí zařízení atd. Pokud se jedná o jiný neznámý požadavek, zařízení odpoví chybovou zprávou.

Funkce *dev\_broadcast\_handle* je volána ze systémové knihovny v případě, že adresa přijatého paketu odpovídá broadcastové adrese. Packet je tedy určen pro všechna zařízení. Ethernet Reader tyto pakety žádným konkrétním způsobem nezpracovává a ani na ně neodpovídá. Pomocí těchto paketů bývají nejčastěji odesílány majáky se stavovými informacemi, nebo časová synchronizace pro RTC.

Funkce *packet\_route* je volána ze systémové knihovny pro všechny ostatní pakety, které nejsou zpracovány předchozími dvěma funkcemi. Tato funkce je volána i v případě, že se jedná o paket určený tomuto zařízení, ale s informací o stavu a ne požadavkem. Pokud zařízení čeká na odpověď jsou všechny pakety směrovány odsud do funkce *answer\_handle* zajišťující detekci odpovědi a její zpracování. V opačném případě je packet přeposlán do modulů pro bezdrátový přenos, nebo na některé z drátových rozhraní. Směr přeposílání je volen v závislosti na periférii, která jej přijala. Do budoucna je plánováno pro přeposílání paketů použít také routovací tabulku.

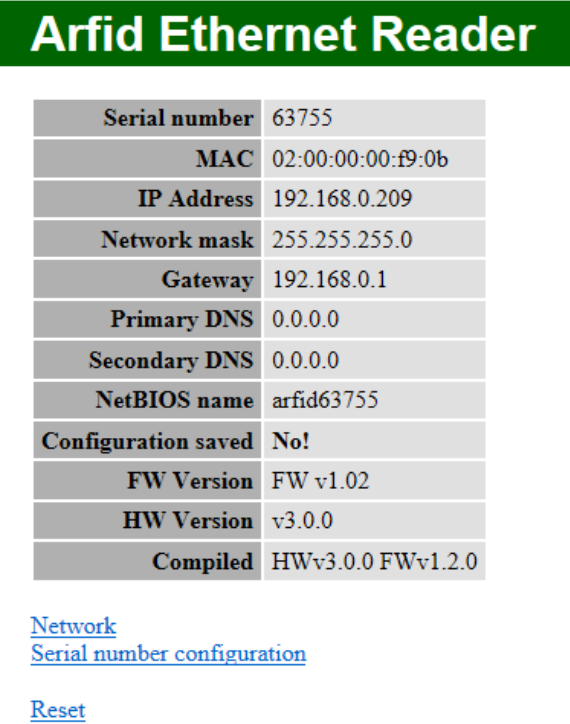
## 3.4 Funkcionality firmwaru

### 3.4.1 Test komunikace

Tuto funkcionalitu lze spustit pomocí servisního požadavku, s parametry obsahující adresu zařízení se kterým bude test probíhat, délku dat v jednom paketu, celkový počet paketů odeslaných během testu a timeout odpovědi na tento paket. Periodicky volaná funkce *ctest\_handle* zajišťuje postupné generování dat a odesílání paketů. Po přijetí odpovědi na vyslaný paket jsou porovnána přijatá data a pokud se shodují je inkrementován počet úspěšně přijatých paketů. Pokud data nesouhlasí, nebo paket nepříjde do časového intervalu definovaného nastaveným timeoutem dojde k inkrementaci počítadla chybných paketů. Výsledek komunikačního testu lze zjistit odesláním servisního požadavku pro vyčtení. Tato funkcionalita byla vytvořena převážně pro testování nových vyráběných zařízení.

### 3.4.2 Webová konfigurace

Jak už bylo zmíněno v kapitole 3.3.3 funkce *networking\_handle* zajišťuje také chod jednoduchého webového serveru. Po zadání IP adresy do webového prohlížeče a zadání přihlašovacích údajů je zobrazena úvodní webová stránka. Na této stránce lze vidět aktuálně nastavené parametry síťového připojení, přidělenou IP adresu, verzi firmwaru a hardwaru a název zařízení v síti. (viz Obrázek 21)



Serial number	63755
MAC	02:00:00:00:f9:0b
IP Address	192.168.0.209
Network mask	255.255.255.0
Gateway	192.168.0.1
Primary DNS	0.0.0.0
Secondary DNS	0.0.0.0
NetBIOS name	arfid63755
Configuration saved	No!
FW Version	FW v1.02
HW Version	v3.0.0
Compiled	HWv3.0.0 FWv1.2.0

[Network Serial number configuration](#)

[Reset](#)

Obrázek 21 Úvodní webová stránka Ethernet Readeru

Odsud lze také přejít na stránky síťové konfigurace (viz Obrázek 22), nebo konfigurace sériového čísla. Taktéž lze provést restart zařízení. Do budoucna je

plánováno rozšířit webovou stránku o nastavení parametrů jednotlivých modulů, která je dostupná pouze skrz program CommTest firmy Cutter System spol. s r.o.

**Arfid Ethernet Reader**

**Network state**

TCP connected	No
Server connected	No

**Network configuration**

DHCP Enabled	<input checked="" type="checkbox"/>
My IP Address	<input type="text" value="10.6.37.55"/>
Network mask	<input type="text" value="255.0.0.0"/>
Default IP Address	<input type="text" value="10.6.37.55"/>
Default Network mask	<input type="text" value="255.0.0.0"/>
Gateway	<input type="text" value="0.0.0.0"/>
Primary DNS	<input type="text" value="0.0.0.0"/>
Secondary DNS	<input type="text" value="0.0.0.0"/>
NetBIOS name (base)	<input type="text" value="arfid63755"/>
TCP - Remote IP	<input type="text"/>
TCP - Remote Port	<input type="text" value="0"/>
TCP - Local Port	<input type="text" value="10000"/>
UDP - Remote IP	<input type="text"/>
UDP - Remote Port	<input type="text" value="0"/>
UDP - Remote IP 2	<input type="text"/>
UDP - Remote Port 2	<input type="text" value="0"/>
UDP - Local Port	<input type="text" value="0"/>

Obrázek 22 Konfigurace síťového připojení Ethernet Readeru

### 3.4.3 Konfigurace zařízení a modulů

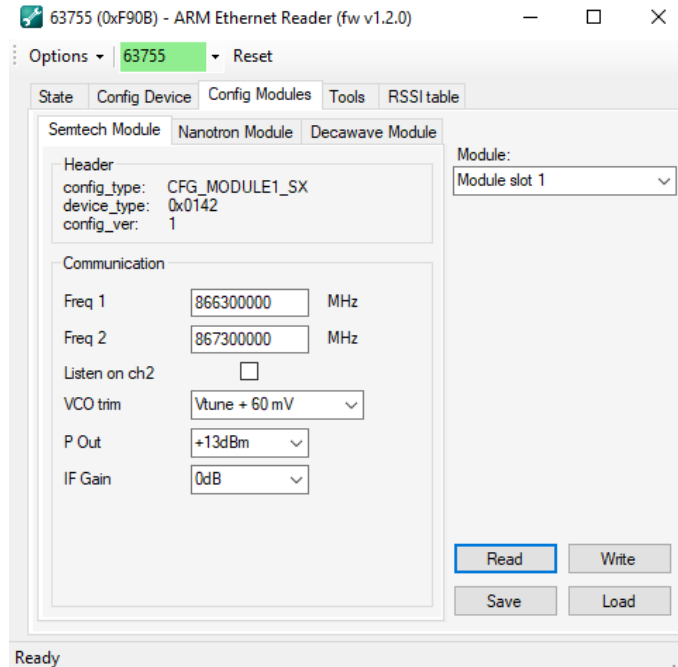
Konfigurace zařízení je možná přes nástroj CommTest firmy Cutter System spol. s r.o. Tento nástroj umožňuje testovat komunikaci se zařízeními a také upravovat jejich nastavení, sériová čísla atd. Samotná obsluha konfigurace zahrnuje její vyčítání, zápis, uložení a načtení. Tyto jednotlivé funkce jsou vykonány v případě přijetí servisního požadavku s definovanými parametry.

Při vyčítání a zápisu jsou data překopírována buď z načtené konfigurace v paměti RAM do odchozího paketu, nebo z příchozího paketu do paměti RAM. Zapsaná konfigurace je poté aplikována, avšak není uložena a po restartu zařízení dojde k její ztrátě.

Aby zapsaná konfigurace byla zachována je nutné ji uložit. K tomu slouží funkce



*save\_configuration*, která uloží konkrétní zapsanou konfiguraci do paměti EEPROM. Po restartu zařízení je volána funkce *load\_configuration* jejímž účelem je uložené nastavení opět načíst.



Obrázek 23 Nastavení konfigurace modulů pomocí programu CommTest

### 3.4.4 Měření RSSI

Měření RSSI (Received signal strength intensity) funguje prozatím pouze u SX modulů. Spočívá ve vyčtení registru s naměřenou hodnotou při přijímání paketu. Toho je docíleno díky vyvolání přerušení při zachycení synchronizační sekvence SX modulem. Po přijetí paketu je hodnota uložena do tabulky spolu se sériovým číslem pomocí funkce *rss\_i\_table\_add* v souboru *rss\_i.c*.

Tato funkce prochází tabulku a hledá pozici s nejnižším RSSI, nejbližší volnou pozici a také samotné sériové číslo zařízení. V případě, že je sériové číslo v tabulce nalezeno, dojde k aktualizaci hodnoty RSSI a timeoutu. Pokud ne, je vytvořen nový záznam na dostupné volné pozici. Může nastat i případ, kdy v tabulce není žádné volné místo. V tomto případě je přepsán záznam s nejnižším RSSI.

Samotná tabulka může mít až 100 záznamů. Každý záznam reprezentuje jedno zařízení s jeho sériovým číslem, silou signálu a timeoutem. Přítomna je vždy dvojici hodnot síly signálu a timeoutu, pro každý modul zvlášť. Tak lze například při použití dvou SX modulů zjistit na jaké frekvenci zařízení vysílá a s jakou silou signálu. Hodnota RSSI se může pohybovat od 1 do 138, kdy vyšší číslo značí vyšší sílu signálu. Hodnota 0 indikuje neúspěšné vyčtení RSSI. Timeout v tabulce je nastaven na 10 sekund. Pokud do této doby není přijat od zařízení žádný paket je zařízení z tabulky odstraněno.

Celou tabulku RSSI lze vyčíst pomocí servisního požadavku. Jelikož je ale příliš velká na to, aby se vešla do jednoho paketu, je její vyčítání prováděno po částech specifikovaných počátečním indexem a délkou dat.

63755 (0xF90B) - ARM Ethernet Reader (fw v1.2.0)

Options ▾ 63755 ▾ Reset

State Config Device Config Modules Tools RSSI table

RSSI Table

	SN	RSSI 1	RSSI 2	Timeout 1	Timeout 2
1	69 778	138	0	10	0
2	63 753	138	0	9	0
3	69 997	138	0	10	0
4	63 616	138	0	9	0
5	63 673	138	0	8	0
6	63 655	137	0	10	0
7	69 724	132	0	9	0
8	68 132	132	0	10	0
9	55 501	129	0	9	0
1	72 992	129	0	9	0
1	31 111	128	0	9	0
1	30 806	126	0	7	0

Lenght: 6 Aut. Vychítání  1000 [ms] Load Table

Ready

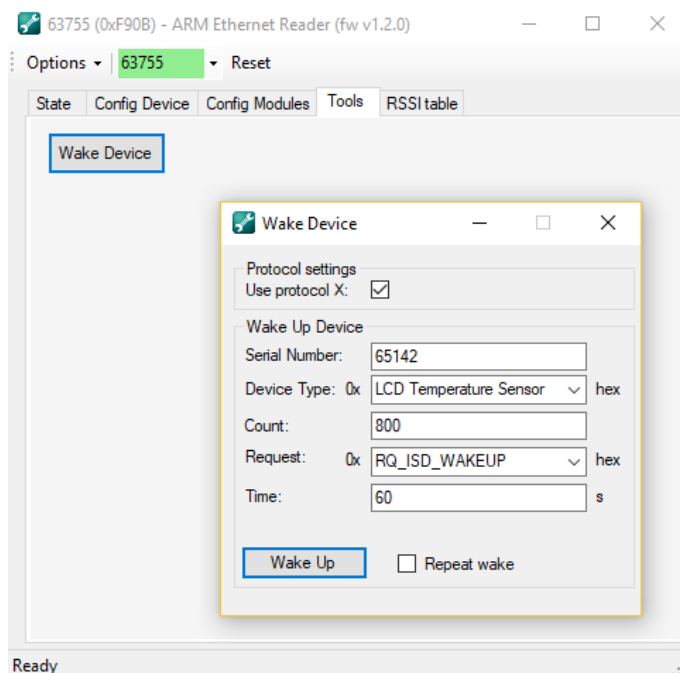
Obrázek 24 Tabulka RSSI

### 3.4.5 Probouzení zařízení

Zařízení napájená bateriově z důvodu šetření energie mají čip pro bezdrátovou komunikaci po většinu času v úsporném režimu. V tomto režimu není schopen přijímat žádné pakety. Avšak za určitý časový interval provedou na krátkou dobu jeho probuzení. Aby bylo možno se zařízením komunikovat je nutné jej nastavit do „probuzeného stavu“ takzvaným wakeup paketem. Tento paket se ale musí trefit přesně do oblasti, kdy je daný čip probuzen. Toho se docílí opakovaným odesíláním velkého množství wakeup paketů, tzv. wakeup burst.

Toto chování má na starost funkce `send_wakeup_burst` definovaná v souboru `extcomm.c`. První zavolání této funkce se provede přijetím systémového požadavku na probuzení s parametry jako je délka dat, samotná data, zdrojová a cílová adresa a počet odeslaných paketů celkem. Funkce si tyto hodnoty uloží a odešle první paket. Poté je periodicky volána v hlavní smyčce s nulovými parametry a odesílá pakety obsahující dříve uložené informace, dokud není dosaženo požadovaného počtu paketů.

Adresované zařízení se v případě přijetí wakeup paketu přepne do probuzeného stavu, kde je komunikační čip trvale aktivní a je s ním nyní možná normální bezdrátová komunikace.



Obrázek 25 Nastavení parametrů pro wakeup paket

### 3.4.6 Řízení napájení a měření veličin

Samotný firmware provádí v pravidelných intervalech kontrolu a řízení napájení, a také měření fyzikálních veličin jako jsou vstupní napětí, nabíjecí proud nebo teplota zařízení.

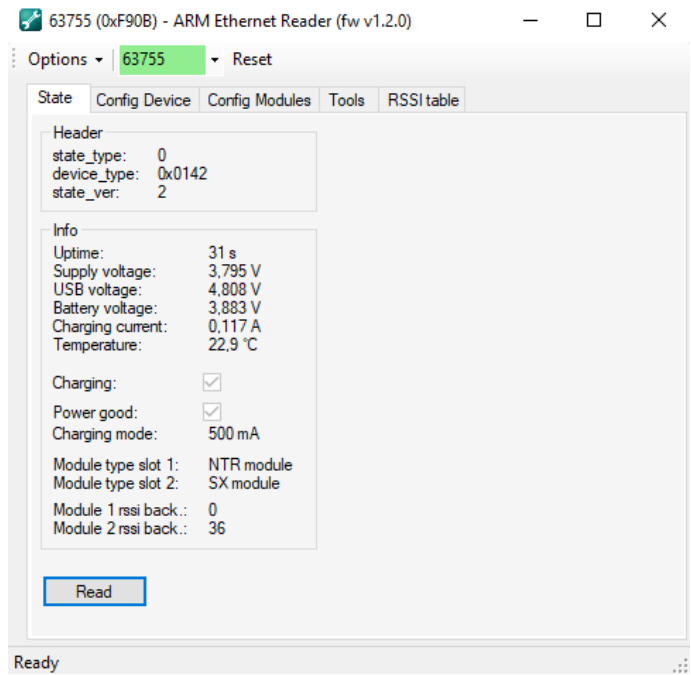
Napětí a proudy jsou měřeny pomocí integrovaného analogově-digitálního převodníku (A/D převodník) uvnitř mikrokontroleru. Po jeho inicializaci při zapnutí zařízení je spuštěno kontinuální měření na předem definovaných pinech. Poté každých 100 ms dochází pomocí funkce *pwr\_meas\_vals* v souboru *power\_ctrl.c* vyčtení převedených hodnot, jejich přepočítání na požadovanou veličinu, a také průměrování. Měří se napájecí napětí, tj. napětí před spínaným DC-DC měničem dodávané z konektoru Power Jack nebo PoE, dále napětí na USB konektoru, napětí baterie a nabíjecí proud.

Pro získání aktuální teploty je využito teplotní čidlo dallas DS18B20 komunikující pomocí sběrnice 1-Wire. Měření se provádí každých 10 sekund.

Všechny změřené hodnoty jsou ukládány do stavové struktury zařízení a lze je vyčíst zasláním servisního požadavku.

Řízení napájení má na starost funkce *pwr\_handle* volaná v sekundových intervalech. Uvnitř se provádí kontrola stavu nabíjecího obvodu spolu s nabíjecí baterií. V případě, že není přítomno externí napájení (indikováno pinem CHRG\_PWR\_GOOD) hlídá se napětí baterie. Pokud napětí klesne pod hodnotu 3,25 V, začne být tento stav signalizován blikáním červené a zelené LED. Blikání doprovází také pípání piezoelektrického reproduktoru. Při poklesu pod hodnotu 3,1 V dojde k vypnutí zařízení zavoláním funkce *pwr\_suicide*.

Kontrolováno je též napětí na USB portu z důvodu detekce připojení konektoru a vyvolání restartu zařízení s novou inicializací (viz problém s inicializací periférií USB a Ethernet popsány v kapitole 3.3.1).



Obrázek 26 Stav zařízení s naměřenými hodnotami

## 4 MĚŘENÍ

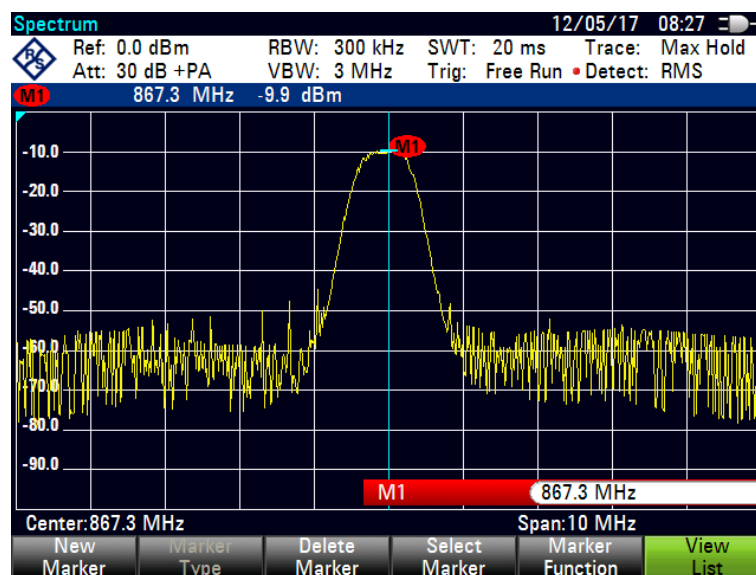
V rámci práce bylo provedeno měření vysílaného spektra jednotlivých modulů pomocí spektrálního analyzátoru a zařízení zvaného TEM Cell, do kterého byl Ethernet Reader vložen.

### Použitá zařízení:

- Analyzátor spektra Rhode & Schwarz FSH8
- TemCell TESCOM TC5060A
- Propojovací koaxiální kabel

### 4.1 SX modul

Pro měření SX modulu byla do firmwaru naprogramována smyčka, která neustále dokola odesílala pakety skrz tento modul. Vysílací frekvence je nastavena na 867,3 MHz. Spektrální analyzátor měří vysílané spektrum pomocí funkce Max hold. Výsledné spektrum zobrazuje Obrázek 27. Z něj lze vyčíst vysílací výkon, který činil -9,9 dBm. V případě bližšího detailu na spektrum nosné vlny lze rozlišit modulaci FSK (Obrázek 28) a dvě frekvence reprezentující vysílání bitů s hodnotami 1 a 0



Obrázek 27 Spektrum vysílaného signálu SX modulu



Obrázek 28 Detail spektra vysílaného signálu SX modulem

## 4.2 Nanotron modul

Podobně jako v předchozím bodě i zde byla ve firmwaru naprogramována smyčka, která neustále odesílala pakety. Avšak spektrální analyzátor byl nastaven do frekvenčního pásma ISM, konkrétně 2,4 – 2,48 GHz, kde tento modul vysílá. Spektrum vysílaného signálu je zobrazeno na Obrázek 29. Zde si lze všimnout velké šířky pásma vysílaného signálu, jelikož nanotron pro komunikaci využívá technologii rozptřebeného spektra. Viditelné klesání výkonu s rostoucím kmitočtem je způsobeno především parametry použité antény.



Obrázek 29 Spektrum vysílaného signálu Nanotron modulu

### 4.3 Decawave modul

Jak již dříve bylo zmíněno, bezdrátová komunikace pro tento modul není plně implementována z důvodu počátečního vývoje knihovny. I přesto byla do firmwaru pro měření dopsána smyčka, která odesílala náhodná data zatím bez implementace Cutter Protokolu. Změřené spektrum vysílaného signálu zobrazuje Obrázek 30. Zde si lze všimnout rozprostření signálu s šířkou pásma přesahující 500 MHz. Tento modul tedy splňuje udávané katalogové parametry o využívání technologie UWB.

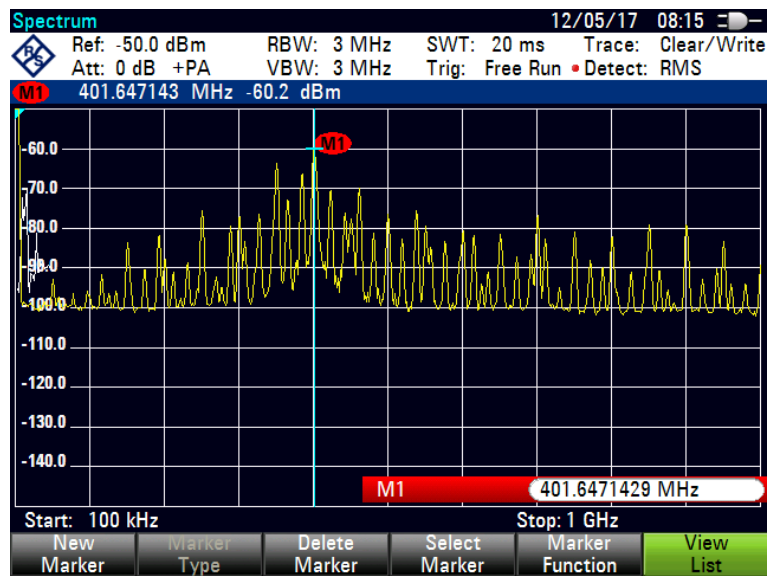


Obrázek 30 Spektrum vysílaného signálu Decawave modulu

### 4.4 Další měření

Při měření pomocí spektrálního analyzátoru byla zjištěna zřejmě nedokonalost návrhu plošného spoje. Vlivem některého z prvků na plošném spoji dochází k nepříjemnému vyzařování do okolí na frekvenci kolem 400 MHz (viz Obrázek 31). Toto rušení proniká i do modulů a konkrétně u SX modulu velice snižuje jeho přijímací schopnosti. Podezření padá na některý z prvků pracujících s hodinovým signálem nebo špatný návrh vedení tohoto signálu.

Dalším postupným experimentováním bylo zjištěno, že při vypnutí generování 32 MHz hodinového signálu z mikrokontroleru se situace mírně zlepšila. Taktéž příjem paketů pomocí SX modulu byl mnohem úspěšnější. Proto je tedy generování tohoto signálu ve výchozím nastavení vypnuto a moduly typu Nanotron jsou osazeny krystaly, které chybějící signál doplňují.



Obrázek 31 Vyzařování aktivního Ethernet Readeru



## 5 ZÁVĚR

Návrh proprietárního bezdrátového zařízení byl úspěšně dokončen i se třemi vyměnitelnými moduly. Celý koncept byl odeslán do výroby, kde došlo k realizaci desek plošných spojů a jejich osazení součástkami. Bezdrátové moduly sedí přesně do slotů, jak bylo prvotně plánováno. Ethernet Reader je umístěn do hliníkové krabičky popisované na začátku kapitoly 2, pro kterou byl navrhován.

Bohužel při vizuální kontrole se přišlo na chybné umístění slotu micro SD karty. Pouzdro paměti SRAM je příliš vysoké, takže zčásti zakrývá otvor pro její vložení. Další drobná chyba je prohození barev stavových LED diod u Ethernetového konektoru, avšak na jeho funkčnost nemá žádný vliv. Použitý spínaný typ DC-DC měniče také není úplně ideální, jelikož při nabíjení se proud pohybuje na hranici jeho použitelného dlouhodobého maxima, což má za následek vyšší zahřívání. Co se týče PoE PD driveru LM5073, ten byl v průběhu vypracování práce vyrazen z prodeje a nyní už se nevyrábí. Proto další revize plošného spoje bude muset projít úpravami řešícími tyto nedostatky.

Problém s vyzářováním zařízení do okolí odhalený při měření je hůře řešitelný a bude vyžadovat rozsáhlejší analýzu celého plošného spoje spolu s použitými součástkami.

Aktuálně navržená hardwarová verze zařízení je i přes tyto drobné nedostatky plně funkční a schopná bezproblémového provozu.

Vyvinutý firmware pro mikrokontroler umožňuje komunikovat s bezdrátovými zařízeními pomocí SX a Nanotron modulu. Taktéž umožňuje nastavovat parametry této komunikace v konfiguraci, kterou lze následně uložit do paměti EEPROM a zachovat tak i po odpojení napájení. SX modul umožňuje měřit sílu signálu přijatých paketů čehož je využito pro sestavení RSSI tabulky až pro 100 zařízení. Pro připojení k počítači slouží buďto Ethernetový port nebo USB konektor. V případě připojení pomocí Ethernetového konektoru, lze provádět konfiguraci sítě a sériového čísla přes webové rozhraní. Taktéž je možné využít obsáhlejší konfiguraci zařízení a zobrazení stavu pomocí programu CommTest.

Mezi další funkce, které firmware nabízí je testování bezdrátové komunikace s vybraným zařízením, nebo odesílání tzv. wakeup burstu určeného pro probouzení bateriových zařízení.

V následujících verzích jsou plánována ještě mnohá další rozšíření, jako implementace routovací tabulky pro „chytřejší“ přeposílání paketů, doplnění odesílání paketů i skrz Decawave modul, podpora měření vzdálenosti, rozšíření webové stránky o konfigurace modulů, vyřešení problémů se současným fungováním USB a Ethernetu atd.

Vzhledem k tomu, že hardware Ethernet Readeru je univerzální a také značně naddimenzován, je možné jej do budoucna použít na testování či vývoj nových bezdrátových modulů a složitějších aplikací náročnějších jak na paměť, tak výpočetní výkon.

# LITERATURA

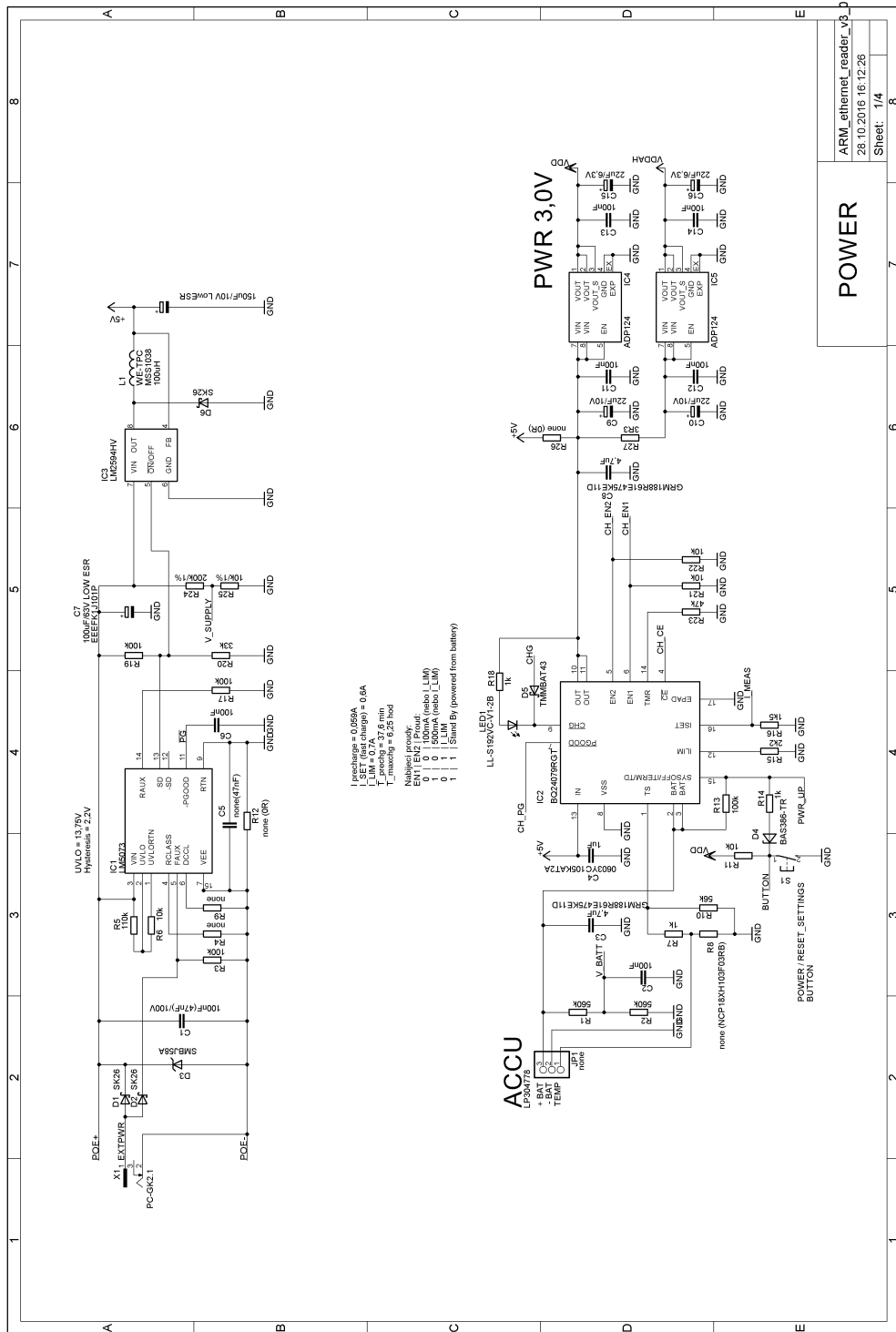
- [1] Princip činnosti Power Over Ethernet. HW.cz [online]. 2004 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/produkty/ethernet/princip-cinnosti-power-over-ethernet.html>
- [2] JAREŠ, Petr. Moderní modulační metody a jejich aplikace [online]. České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: [http://data.cedupoint.cz/oppa\\_e-learning/2\\_KME/163.pdf](http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/163.pdf)
- [3] Frequency-shift keying. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency-shift\\_keying](https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency-shift_keying)
- [4] Chirp Spread Spectrum (CSS). Nanotron Technologies [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: [http://nanotron.com/EN/CO\\_techn-css.php](http://nanotron.com/EN/CO_techn-css.php)
- [5] Ultra-wideband. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Ultra-wideband>
- [6] LM5073 100V Power Over Ethernet PD Interface with Aux Support [online]. Texas Instruments, 2013 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1767232.pdf>
- [7] LPC408x/407x User manual [online]. NXP semiconductors, 2014 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: [https://www.nxp.com/documents/user\\_manual/UM10562.pdf](https://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10562.pdf)
- [8] BQ2407x 1.5-A USB-Friendly Li-Ion Battery Charger and Power-Path Management IC [online]. Texas Instruments, 2015 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24079.pdf>
- [9] SX1211 Transceiver: Ultra-Low Power Integrated UHF Transceiver [online]. Semtech Corporation, 2013 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://www.semtech.com/images/datasheet/sx1211.pdf>
- [10] NanoLOC NTRX Transciever (NA5TR1) datasheet [online]. Nanotron Technologies, 2007 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/73752.pdf>
- [11] DWM1000 IEEE 802.15.4 2011 UWB Transceiver Module [online]. DecaWave, 2015 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.decawave.com/sites/default/files/resources/dwm1000-datasheet-v1.3.pdf>
- [12] LAN8720A/LAN8720Ai: Small Footprint RMII 10/100 Ethernet Transceiver with HP Auto-MDIX Support [online]. Microchip Technology, 2012 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/8720a.pdf>
- [13] NXP Semiconductors. NXP Semiconductors [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.nxp.com/>
- [14] Doxygen. Doxygen [online]. 2016 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.stack.nl/~dimitri/doxygen/>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

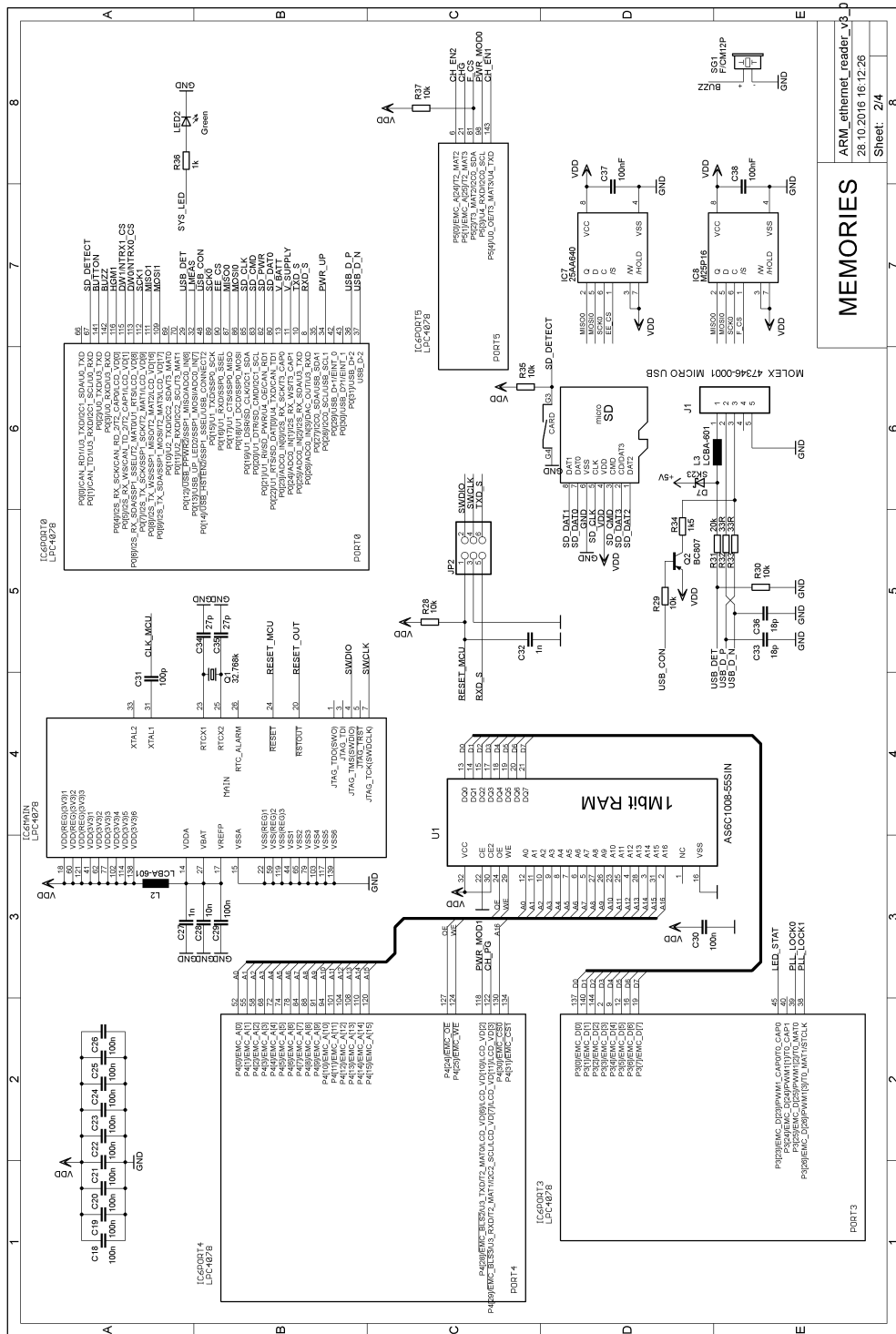
<i>I</i>	Elektrický proud
<i>U</i>	Elektrické napětí
<i>R</i>	Elektrický odpor
<i>t</i>	Čas
<i>C</i>	Elektrická kapacita
<i>K</i>	Konstanta (význam popsán v textu)
AM	Amplitudová modulace
ASK	Amplitude-shift keying, klíčování amplitudovým posuvem
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
FM	Frekvenční modulace
FSK	Frequency-shift keying, klíčování frekvenčním posuvem
MCU	Microcontroller unit, mikrokontroler
OOK	on-off keying, klíčování zapnutím vypnutím
PD	Powered device, napájené zařízení
PoE	Power over Ethernet
PSE	Power sourcing equipment, zařízení dodávající energii
PSK	Phase-shift keying, klíčování fázovým posuvem
RAM	Random Access memory, paměť s náhodným přístupem
RSSI	Received Signal Strength Intensity, síla přijímaného signálu
SPI	Serial peripheral interface, sériové periferní rozhraní
UART	Universal asynchronous receiver – transmitter, univerzální asynchronní přijímač/vysílač
USB	Universal serial BUS, univerzální sériová sběrnice
UWB	Ultra-wideband, ultra-širokopásmové (ve vztahu k vysílání)

# A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

## A.1 Schéma zapojení napájecí části



## A.2 Schéma zapojení paměťové a komunikační části

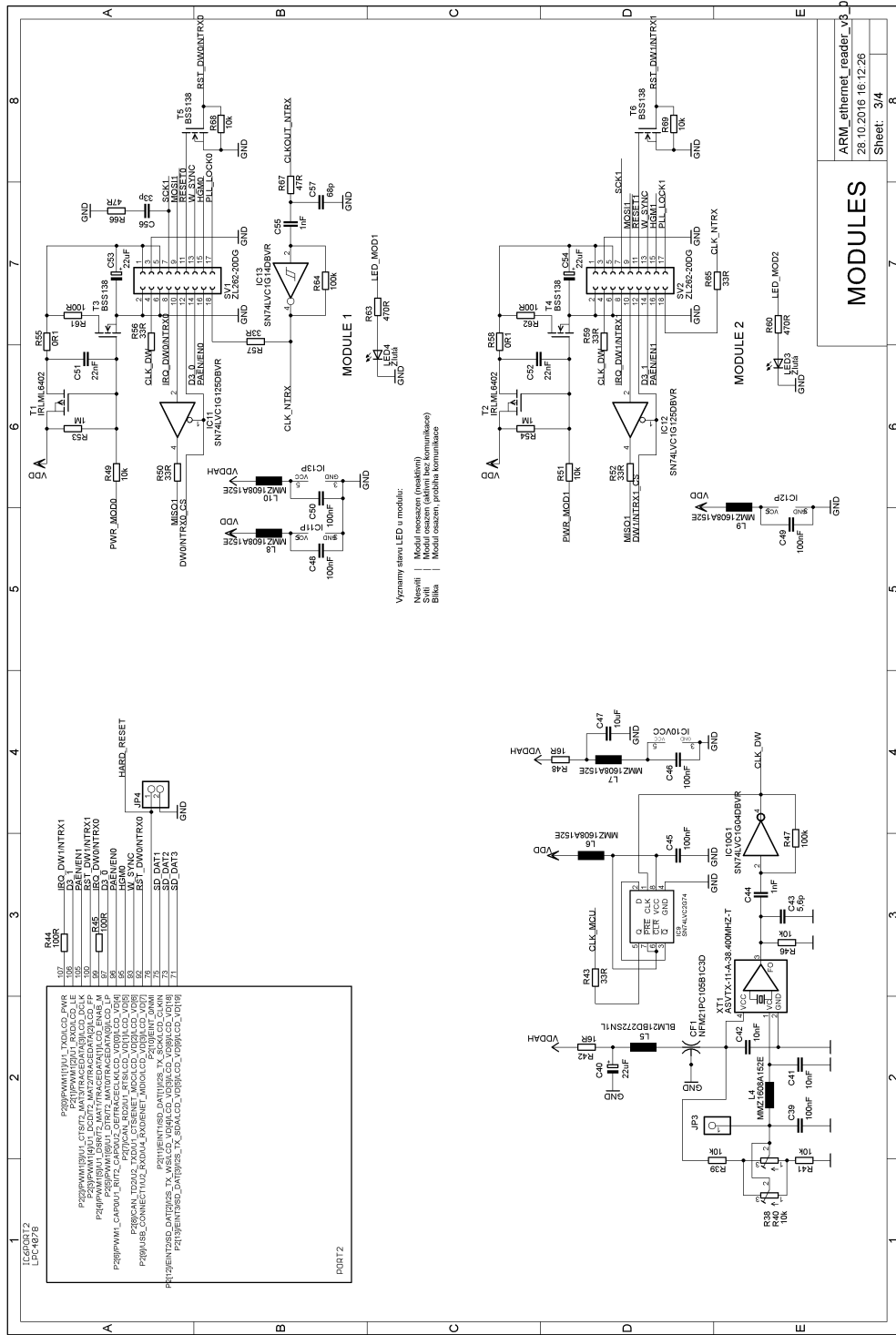


MEMORIES

ARM\_ethernet\_reader\_v3  
28.10.2016 16:12:26

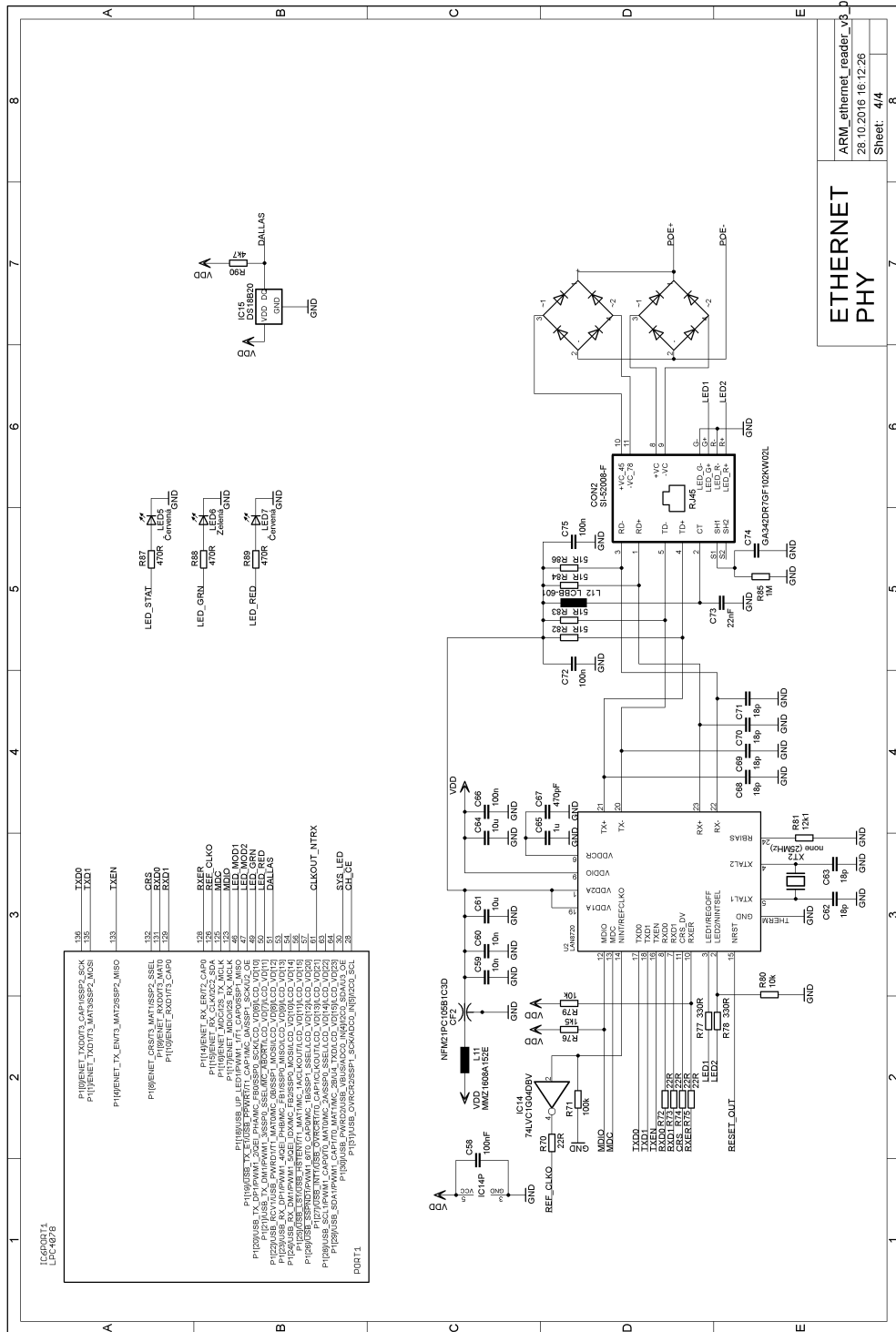
Sheet: 2/4

# A.3 Schéma zapojení modulární části

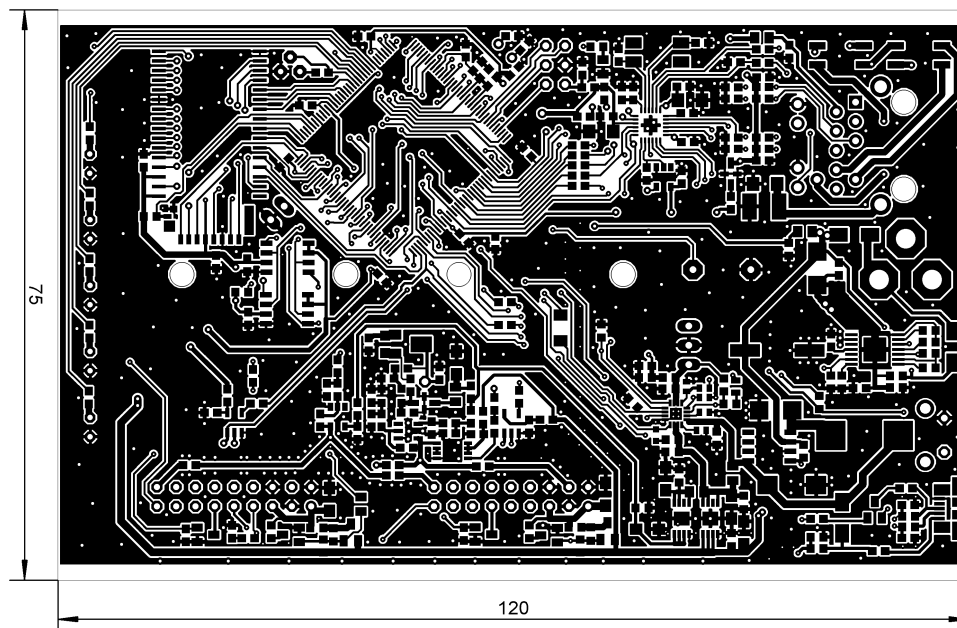


ARM\_ethernet\_reader\_v3  
28.10.2016 16:12:26  
Sheet: 3/4

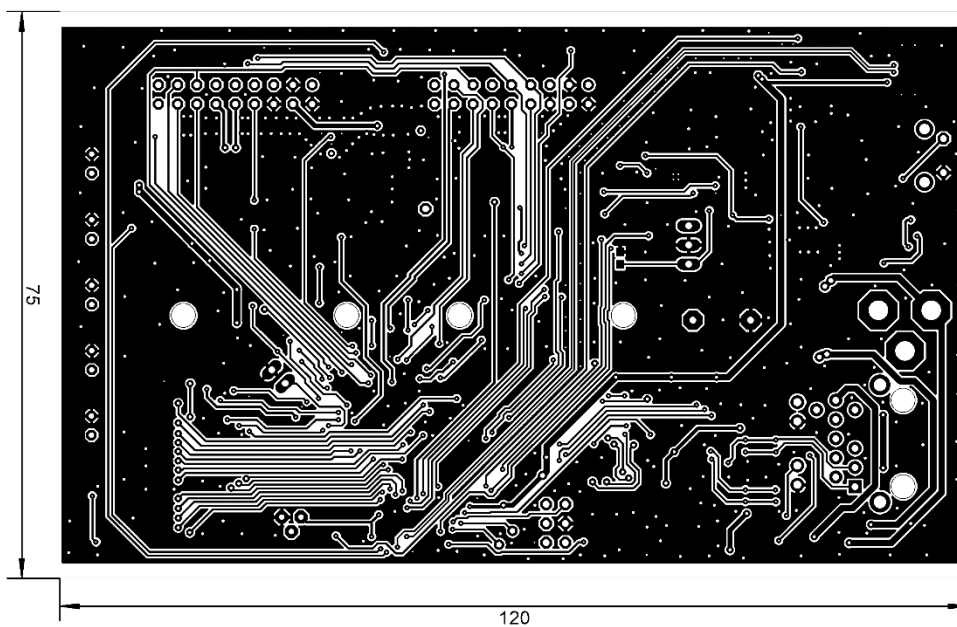
# A.4 Schéma zapojení ethernetové části



## A.5 Ethernet Reader v3.0 – top (horní strana)

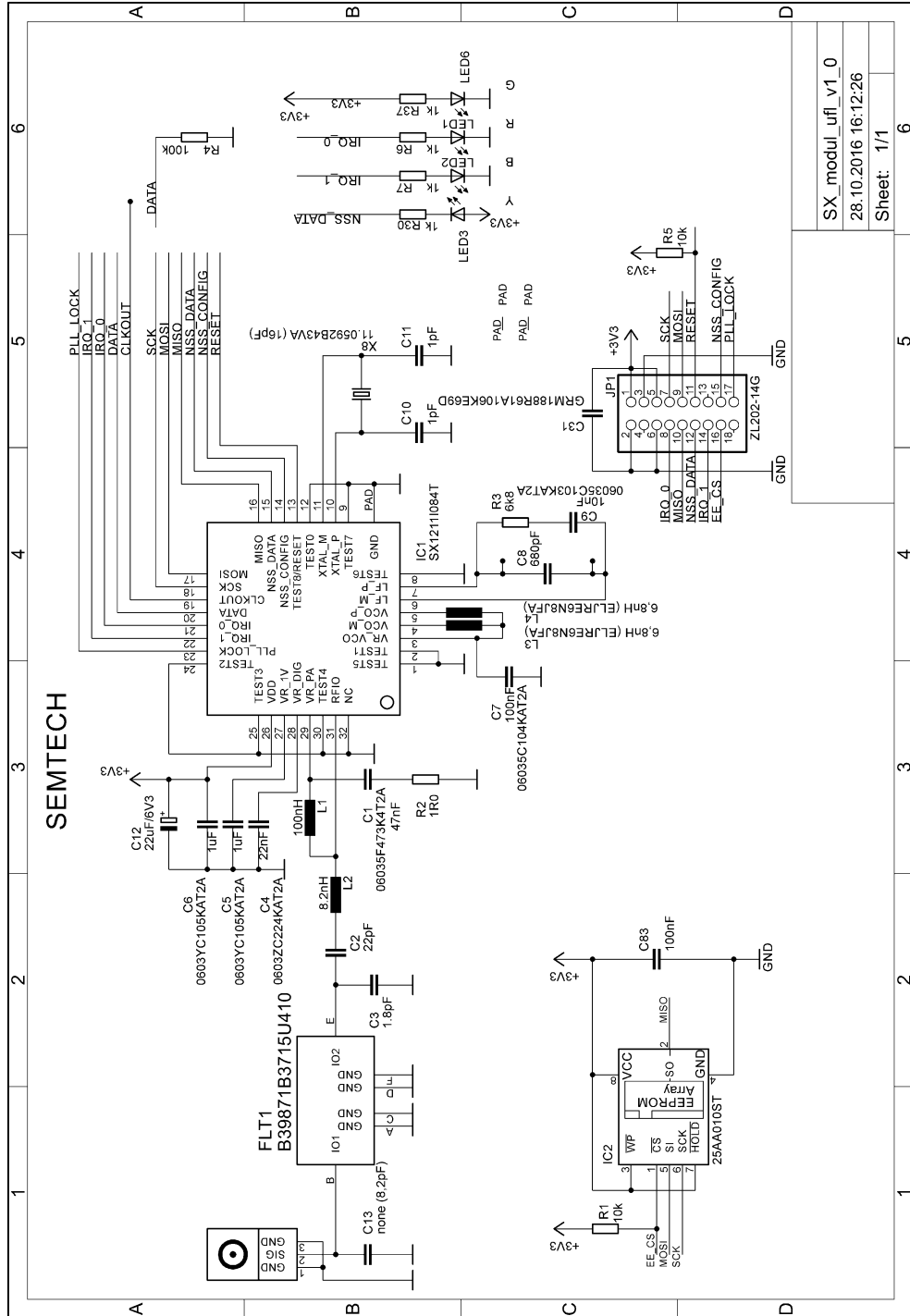


## A.6 Ethernet Reader v3.0 – bottom (spodní strana)



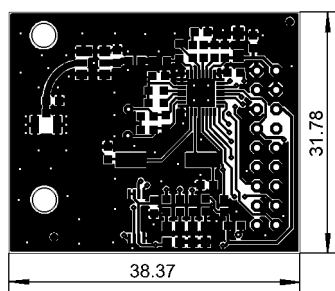


# A.7 Schéma zapojení SX modulu ufl v1.0

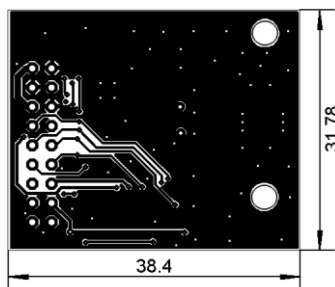


SX\_modul\_ufl\_v1\_0  
28.10.2016 16:12:26  
Sheet: 1/1

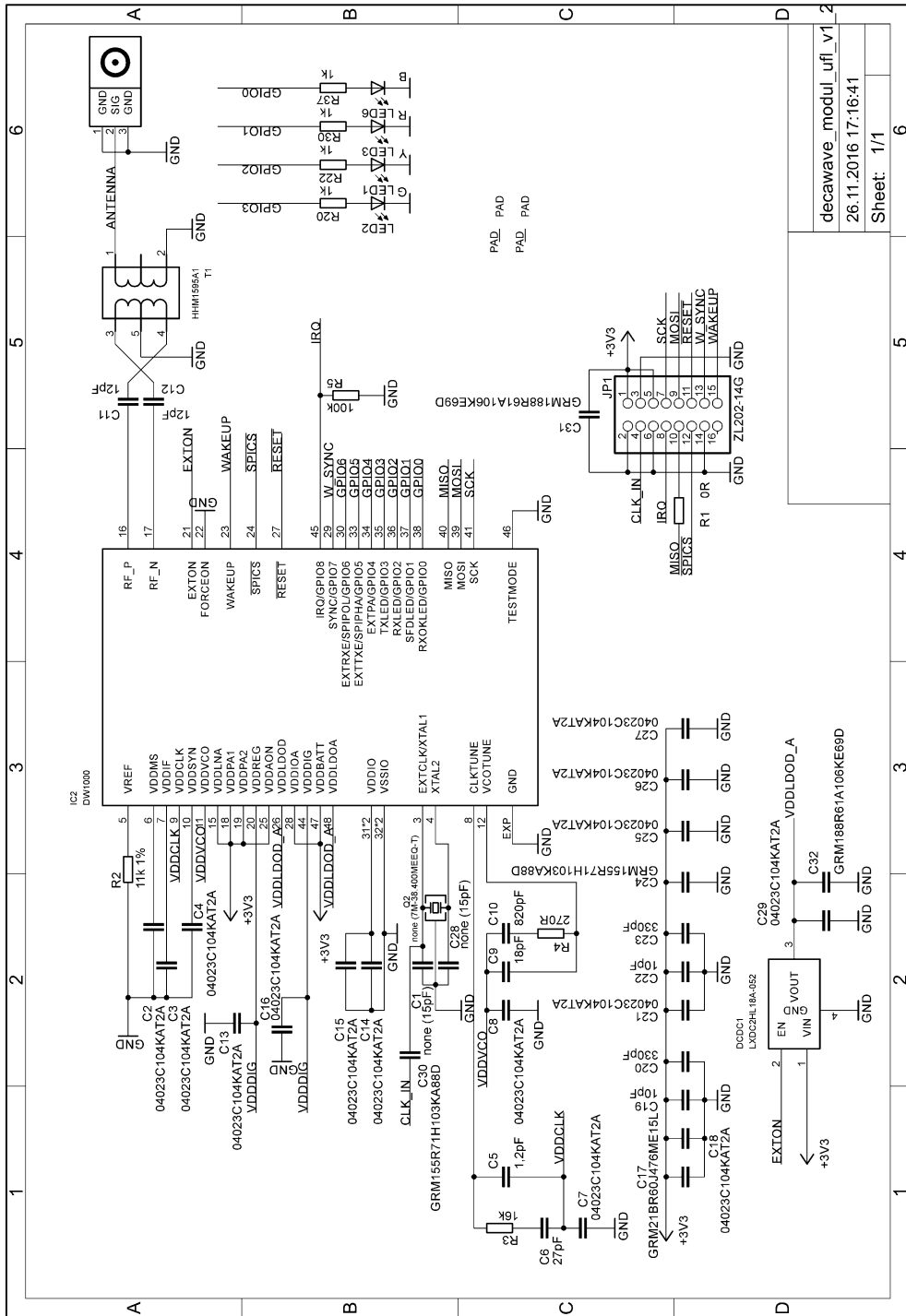
**A.8 SX modul ufl v1.0 – top (horní strana)**



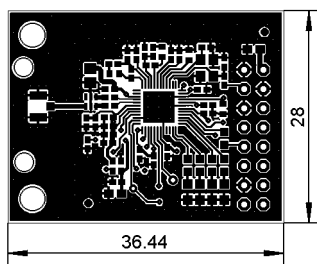
**A.9 SX modul ufl v1.0 – bottom (spodní strana)**



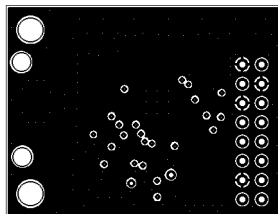
# A.10 Schéma zapojení decawave modulu ufl v1.2



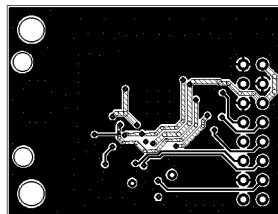
**A.11 Decawave modul ufl v1.2 – top (horní strana)**



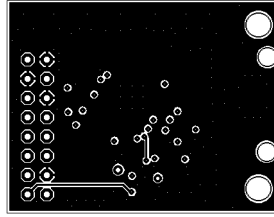
**A.12 Decawave modul ufl v1.2 – vrstva 2 (vnitřní)**



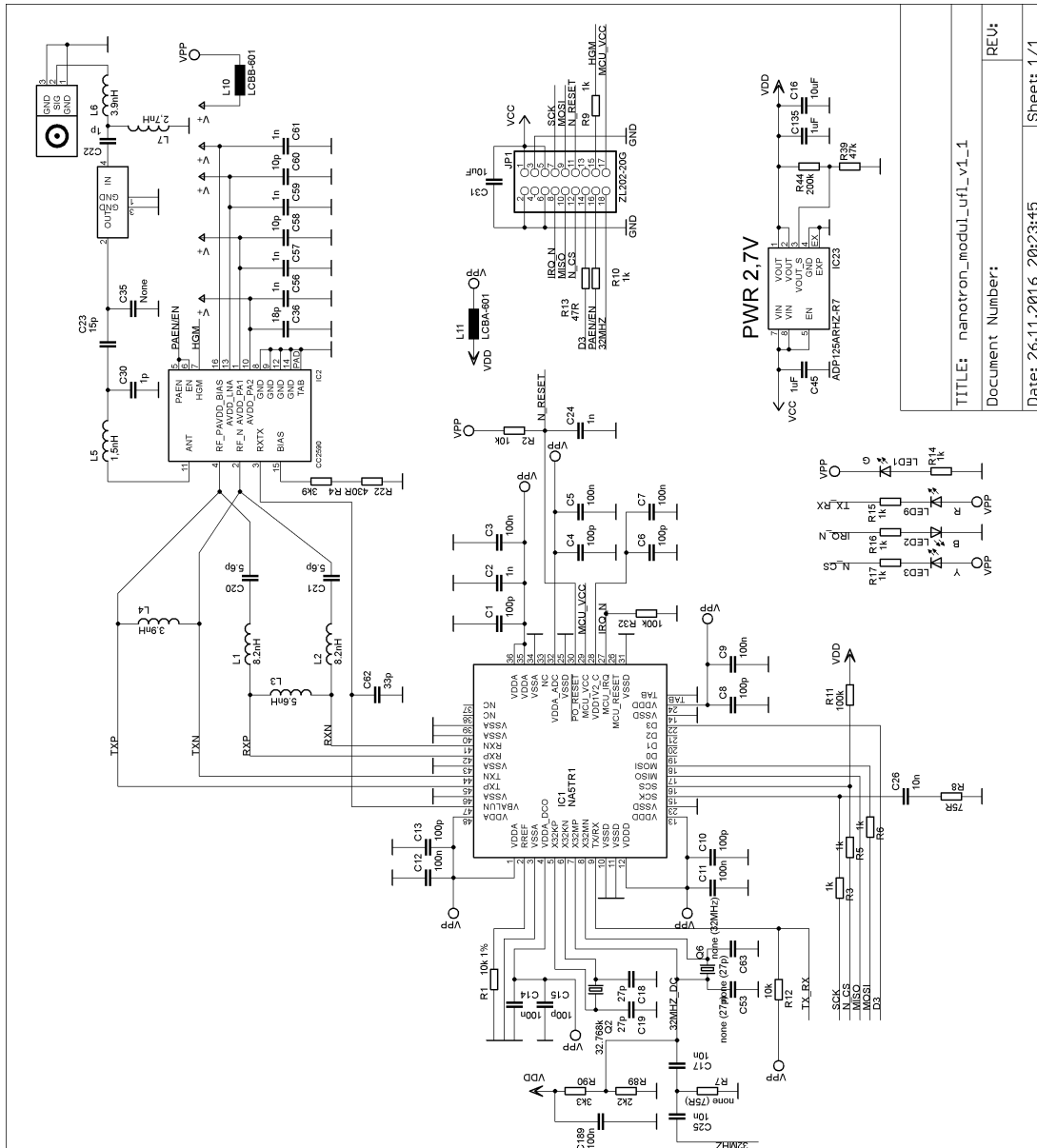
**A.13 Decawave modul ufl v1.2 – vrstva 3 (vnitřní)**



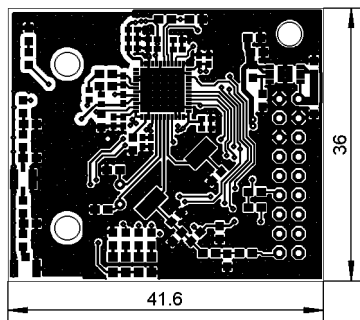
## A.14 Decawave modul ufl v1.2 – bottom (spodní strana)



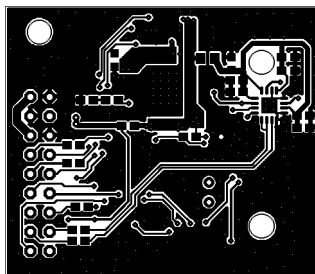
## A.15 Schéma zapojení nanotron modulu ufl v1.1



**A.16 Nanotron modul ufl v1.1 – top (horní strana)**



**A.17 Nanotron modul ufl v1.1 – bottom (spodní strana)**



## **B SEZNAM SOUČÁSTEK**

Vzhledem k velkému množství schémat zapojení jsou seznamy součástek dostupné v digitální podobě jako příloha na CD

## **C ZDROJOVÝ KÓD**

Vzhledem k obsáhlosti firmwaru jsou zdrojové kódy dostupné v digitální podobě jako příloha na CD. Taktéž lze na CD nalézt stručnou dokumentaci použitých funkcí.