



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra mikroelektroniky**

**Autonomní jednotka pro sběr a odeslání senzorových dat  
s využitím napájení z energie okolí**

**Autonomous unit for collecting and sending sensor data  
and using energy harvesting**

Bakalant: Michal Kočí  
Studijní program: Komunikace, Multimédia a Elektronika  
Studijní obor: Aplikovaná elektronika  
Vedoucí práce: Ing. Adam Bouřa, Ph.D.

Praha 2018



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kočí** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **457092**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Autonomní jednotka pro sběr a odeslání sensorových dat s využitím napájení z energie okolí**

Název bakalářské práce anglicky:

**Autonomous unit for collecting and sending sensor data and using energy harvesting**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou komunikačních rozhraní, která se využívají pro účely sběru sensorových dat z okolního prostředí. Prostudujte principy, které se využívají pro napájení autonomních systémů s využitím energie z okolí.
2. Na základě získaných poznatků navrhnete systém pro automatizovaný sběr sensorových dat a jejich odeslání do centrální jednotky s využitím vybraného alternativního zdroje energie pro napájení.
3. Realizujte funkční systém, sestavte testovací pracoviště a ověřte funkčnost vašeho návrhu. Navrhnete případná vylepšení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Garlík, B.: Inteligentní budovy, BEN - technická literatura, Praha 2012, ISBN 978-80-7300-440-8
- [2] Vedral, J., Fischer, J.: Elektronické obvody pro měřicí techniku, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004.
- [3] Mann, B.: C pro mikrokontroléry, 1. Vydání, Praha 2003, Nakladatelství BEN - technická literatura, ISBN 80-7300-077-6.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Adam Bouřa, Ph.D., katedra mikroelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **31.01.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Adam Bouřa, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze dne 25. 05. 2018

.....

Michal Kočí



## Poděkování

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Adamu Bouřovi, Ph.D. za čas, který mi věnoval při vypracovávání mé bakalářské práce a cenné rady, které mi ji pomohly zhotovit. Dále bych chtěl poděkovat všem lidem, kteří mi pomáhali s tvorbou této práce, své rodině, spolužákům a kamarádům za podporu během celého studia.

# Obsah

Seznam zkratk, symbolů a veličin.....	10
Seznam obrázků.....	12
Seznam tabulek.....	13
Seznam grafů .....	14
Abstrakt .....	15
Úvod .....	16
Cíl práce .....	16
1. Teoretický rozbor .....	17
1.1 Komunikační rozhraní .....	17
1.2 Drátová komunikace.....	18
1.2.1 RS232 .....	18
1.2.2 RS422 .....	18
1.2.3 RS485 .....	18
1.2.4 SPI .....	18
1.2.5 I <sup>2</sup> C .....	18
1.3 Bezdrátová komunikace .....	19
1.3.1 Modulace.....	20
1.3.2 Bluetooth .....	21
1.3.3 Wi-Fi.....	21
1.3.4 ZigBee.....	22
1.3.5 LoRa.....	22
1.4 Energy harvesting.....	25
1.4.1 Energy Harvesting modul.....	25
1.5 Zdroje volné energie.....	26
1.5.1 Kinetická energie .....	26
1.5.2 Elektromagnetická RF energie.....	27
1.5.3 Tepelná energie.....	27
1.5.4 Solární energie .....	28
2. Návrh autonomní jednotky .....	31
2.1 Použité obvody .....	31
2.1.1 ATMEL ATmega328 .....	31
2.1.2 MaxDetect RHT03 .....	32
2.1.3 Advanced Linear Devices EH300 .....	32
2.1.4 RAYSTAR OPTRONICS RC1602B-BIY-CSVD .....	32
2.1.5 Linear Technology LTC3531-3.3.....	33
2.1.6 Linear Technology LTC3530.....	33
2.1.7 Linx technologies TRM-433-LT .....	34
2.1.8 Microchip RN2483 .....	35



---

2.2	Návrh zapojení .....	36
2.2.1	Systém využívající RF přenos a modul TRM-433-LT .....	36
2.2.2	Systém využívající technologii LoRa a modul RN2483 .....	37
2.3	Program mikrokontroléru.....	38
2.3.1	Vysílací jednotka .....	38
2.3.2	Přijímací jednotka .....	39
3.	Testování jednotek .....	40
3.1	Vysílací a přijímací jednotka s TRM-433-LT modulem .....	40
3.2	Vysílací a přijímací jednotka s RN2483 modulem.....	41
3.3	Měření energy harvesting modulu EH300 .....	42
4.	Návrh dalších vylepšení .....	43
	Závěr .....	44
	Použitá literatura .....	45
	Seznam příloh .....	48
	Tištěné .....	48
	Obsah disku.....	49
	Přílohy.....	50
I.	Modul Advanced Linear Devices EH300.....	50
II.	Vysílací jednotka s TRM-433-LT.....	50
III.	Přijímací jednotka s TRM-433-LT .....	50
IV.	Vysílací jednotka s RN2483.....	51
V.	Přijímací modul s RN2483 .....	51
VI.	Schéma vysílací jednotky s TRM-433-LT.....	52
VII.	Schéma přijímací jednotky s TRM-433-LT .....	53
VIII.	Schéma vysílací jednotky s RN2483.....	54
IX.	Schéma přijímací jednotky s RN2483 .....	55
X.	Návrh DPS vysílací jednotky s TRM-433-LT .....	56
XI.	Návrh DPS přijímací jednotky s TRM-433-LT .....	57
XII.	Návrh TRM-433-LT modulu .....	58
XIII.	Návrh DPS vysílací jednotky s RN2483.....	59
XIV.	Návrh DPS přijímací jednotky s RN2483 .....	60
XV.	Návrh RN2483 modulu .....	61
XVI.	Zobrazení GPS souřadnic RN2483 jednotek .....	62

## Seznam zkratek, symbolů a veličin

Zkratka	Význam
AC	Střídavý proud (z ang. Alternating Current)
AD	Analogově – digitální (z ang. Analog to Digital)
AM	Amplitudová modulace (z ang. Amplitude Modulation)
ASCII	Americký standardní kód pro výměnu informací (z ang. American Standard Code for Information Interchange)
ASK	Amplitudové klíčování (z ang. Amplitude-Shift Keying)
BW	Šířka pásma (z ang. Bandwidth)
Cca	Přibližně (z lat. circa)
CLK	Hodiny (z ang. Clock)
CR	Kódovací rychlost (z ang. Coding Rate)
CRC	Cyklický redundantní součet (z ang. Cyclic Redundancy Check)
CSS	Lineárně rozprostřené spektrum (z ang. Chirp Spread Spectrum)
DC	Stejnoseměrný proud (z ang. Direct Current)
DPS	Deska plošných spojů
DSSS	Rozprostřené spektrum přímou posloupností (z ang. Direct-Sequence Spread Spectrum)
EH	Sběr energie (z ang. Energy Harvesting)
EUI	Unikátní identifikátor zařízení (z ang. Extended Unique Identifier)
FHSS	Rozprostřené spektrum frekvenčním přeskokováním (z ang. Frequency-Hopping Spread Spectrum)
FM	Frekvenční modulace (z ang. Frequency Modulation)
FSK	Frekvenční klíčování (z ang. Frequency-Shift Keying)
GND	Zem (z ang. Ground)
GSM	Globální systém pro mobilní komunikaci (z franc. Groupe Spécial Mobile)
I <sup>2</sup> C	Multimasterová sériová sběrnice (z ang. Inter Integrated Circuit)
IEEE	Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství (z ang. Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IoT	Internet věcí (z ang. Internet of Things)
LCD	Displej z tekutých krystalů (z ang. Liquid Crystal Display)
LoRa	Komunikace s dlouhým dosahem (z ang. Long Range)
MAC	Identifikátor síťového rozhraní (z ang. Media Access Control)
MISO	Vstup mikroprocesoru (z ang. Master Input, Slave Output)
MOSI	Vstup periferie (z ang. Master Output, Slave Input)
OFDM	Ortogonalně frekvenčně dělený multiplex (z ang. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)
OOK	On-Off klíčování (z ang. On-Off Keying)
PC	Osobní počítač (z ang. Personal Computer)
PIN	Přechod P vrstvy – vlastní (intrinický) polovodič – N vrstva
PLC	Programovatelný logický automat (z ang. Programmable Logic Controller)
PM	Fázová modulace (z ang. Phase Modulation)
PSK	Fázové klíčování (z ang. Phase-Shift Keying)
PWM	Pulsně šířková modulace (z ang. Pulse-Width Modulation)

Zkratka	Význam
QAM	Kvadrurní amplitudová modulace (z ang. Quadrature Amplitude Modulation)
QASK	Kvadrurní amplitudové klíčování (z ang. Quadrature Amplitude-Shift Keying)
R/W	Čtení / Zápis (z ang. Read / Write)
RC	Rezistor / Kondenzátor (z ang. Resistor / Capacitor)
RF	Rádiový kmitočet (z ang. Radio Frequency)
RS	Výběr registru (z ang. Registers selects)
Rx	Přijátá data (z ang. Receive Data)
SF	Koeficient rozprostření (z ang. Spread Factor)
SPI	Sériové periferní rozhraní (z ang. Serial Peripheral Interface)
SS	Výběr periferie (z ang. Slave Select)
TCP/IP	Protokol pro řízení přenosu / Internetový protokol (z ang. Transmission Control Protocol / Internet Protocol)
TWI	Dvoudrátové rozhraní (z ang. Two Wire Interface)
Tx	Vyslaná data (z ang. Transmit Data)
U(S)ART	Univerzální synchronní/asynchronní přijímač a vysílač (z ang. Universal Synchronous or Asynchronous Receiver-Transmitter)
WAN	Rozhledlá síť (z ang. Wide Area Network)

Veličina	Symbol	Jednotka
Čas	t	sekunda (s)
Délka	l	metr (m)
Elektrický odpor	R	Ohm ( $\Omega$ )
Energie	E	elektronVolt (eV) nebo Joule (J)
Energie odpovídající šířce zakázaného pásu	$E_g$	elektronVolt (eV)
Hmotnost	m	kilogram (kg)
Intenzita osvětlení	E	lux (lx)
Kapacita	C	Farad (F)
Kmitočet	f	Hertz (Hz)
Napětí	U	Volt (V)
Proud	I	Ampér (A)
Přenosová rychlost	$v_p$	bit za sekundu (bit/s)
Rychlost	v	metr za sekundu (m/s)
Teplota	T	stupeň Celsia ( $^{\circ}\text{C}$ )
Vlhkost	RH	procenta (%)
Vlnová délka	$\lambda$	metr (m)
Výkon	P	Watt (W)
Zisk antény	G	deciBel vztažený k izotropní anténě (dBi)

Fyzikální konstanta	Symbol	Číselná hodnota
Planckova konstanta	h	$4,1357 \cdot 10^{-15}$ (eVs)
Rychlost světla ve vakuu	c	299 792 458 (m/s)

Koeficient	Symbol	Jednotka
Koeficient absorpce	$\alpha_{\text{absorb}}$	1/metr ( $\text{m}^{-1}$ )
Koeficient reflexe	R	(-)
Seebeckův koeficient	$\alpha$	Volt na Kelvin (V/K)

# Seznam obrázků

<b>Obrázek 1.1</b> Komunikační rozhraní [1] .....	17
<b>Obrázek 1.2</b> Klasifikace přenosových medií [1] .....	17
<b>Obrázek 1.3</b> Spektrum rádiového signálu [7].....	19
<b>Obrázek 1.4</b> Modulace AM, FM a PM [9].....	20
<b>Obrázek 1.5</b> Klíčování ASK, FSK a PSK [9] .....	20
<b>Obrázek 1.6</b> Sinusový signál s lineárně rostoucí frekvencí v čase [12].....	22
<b>Obrázek 1.7</b> Průběh kmitočtu při vysílání v závislosti na čase [11].....	23
<b>Obrázek 1.8</b> Struktura LoRaWAN [11] .....	24
<b>Obrázek 1.9</b> Blokové schéma energy harvesting systému [17].....	25
<b>Obrázek 1.10</b> Obecná architektura energy harvesting systému [14] .....	25
<b>Obrázek 1.11</b> Průběh napětí u energy harvesting modulu EH300 [19] .....	26
<b>Obrázek 1.12</b> RF energy harvesting systém [14] .....	27
<b>Obrázek 1.13</b> Peltierův článek [15] .....	27
<b>Obrázek 1.14</b> Fotovoltaický efekt u amorfního křemíku [14].....	28
<b>Obrázek 1.15</b> a) Monokrystalický článek b) Polykrystalický křemík [20] .....	29
<b>Obrázek 1.16</b> Řez CIGS článkem [14] .....	29
<b>Obrázek 1.17</b> Polymerní článek s objemovou heterojunkcí [14] .....	30
<b>Obrázek 2.1</b> Blokový diagram mikrokontroléru ATMEL ATmega328 [22] .....	31
<b>Obrázek 2.2</b> Zapojení modulu EH300 [19].....	32
<b>Obrázek 2.3</b> Katalogové zapojení LTC3531-3.3 [25] .....	33
<b>Obrázek 2.4</b> Katalogové zapojení LTC3530 [26] .....	33
<b>Obrázek 2.5</b> Katalogové zapojení TR-433-LT [27] .....	34
<b>Obrázek 2.6</b> Blokové schéma TRM-433-LT [27] .....	34
<b>Obrázek 2.7</b> Katalogové zapojení Microchip RN2483 [28].....	35
<b>Obrázek 2.8</b> Vysílací a přijímací jednotka využívající RF přenos .....	36
<b>Obrázek 2.9</b> Přijímací a vysílací jednotka využívající technologii LoRa .....	37
<b>Obrázek 2.10</b> Vývojový diagram algoritmu vysílací jednotky .....	38
<b>Obrázek 2.11</b> Vývojový diagram algoritmu přijímací jednotky.....	39
<b>Obrázek 3.1</b> Testování parametrů a spolehlivosti s externím zdrojem napájení .....	40
<b>Obrázek 3.2</b> a) DC/DC měnič LTC3531-3.3 b) DC/DC měnič LTC3530.....	41

## Seznam tabulek

<b>Tabulka 3.1</b> Měření vzdáleností mezi vysílací a přijímací jednotkou .....	41
<b>Tabulka 3.2</b> Čas potřebný pro nabití kondenzátoru.....	42

## Seznam grafů

<b>Graf 3.1</b> Čas potřebný pro nabití kondenzátoru.....	42
---	----

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá využitím získávání elektrické energie z okolí k napájení autonomní jednotky pro sběr a přenos sensorových dat na sběrné místo. V této práci jsou popsány druhy komunikačních rozhraní a způsoby získávání elektrické energie. Ze získaných poznatků byla navrhována a zkonstruována jednotka využívající dané technologie. Práce je ukončena ověřením funkčnosti a proměřením parametrů autonomní jednotky.

## Klíčová slova

Autonomní jednotka, sběr elektrické energie z okolí, automatizovaný sběr dat, přenos dat.

## Abstract

This bachelor-thesis is deals with the utilization of energy harvesting technology to power an autonomous unit for collecting and sending sensor data to the central unit. This thesis describes the types of communication interfaces and kinds of obtaining electrical energy. A unit has been designed and constructed from the acquired knowledge. Subsequently, the work is completed by verifying the functionality and measuring the parameters of the autonomous unit.

## Keywords

Autonomous unit, energy harvesting, autonomous collecting sensor data, sending sensor data.

# Úvod

Cílem této práce je navrhnout a realizovat systém s využitím energy harvesting technologie. Systém se skládá ze snímače teploty a vlhkosti, vysílače naměřených dat a přijímače se zobrazením naměřených hodnot. Zařízení má za úkol získat přebytečnou energii z okolí, přeměnit ji na elektrickou a využít ji k získání sensorových dat, která přeneše na přijímač, který tyto hodnoty zobrazí.

Součástí je rozbor komunikačních rozhraní pracujících na principu vysílač – přijímač s důrazem na porovnání vzdálenosti přenosu a popisu způsobu komunikace a popis nejrozšířenějších způsobů zdroje energie využívající technologií energy harvesting. Na teoretický rozbor problematiky navazuje návrh, realizace a testování autonomní jednotky. Nejprve jsou popsány jednotlivé obvody využité pro návrh, následované popisem a rozбором schémat zapojení a použitého programu. V závěru práce je uvedeno testování modulů a případné návrhy zlepšení autonomních jednotek.

Tato práce navazuje na můj semestrální projekt. V semestrálním projektu byl navržen systém pracující pomocí RF přenosu s OOK modulací a s využitím baterie pro přenos sensorových dat.

## Cíl práce

V této práci si kladu za cíl navrhnout a realizovat autonomní jednotky pro sběr sensorových dat, která bude využívat energy harvesting technologii. Sensorová data budou odesílána pomocí RF komunikace a standardu LoRa. Vyvíjené zařízení bude uzpůsobeno pro provoz pouze pomocí energy harvesting technologie pro komunikaci na kratší vzdálenosti (RF přenos) nebo s využitím baterie pro prodloužení dosahu (standardu LoRa).



# 1. Teoretický rozbor

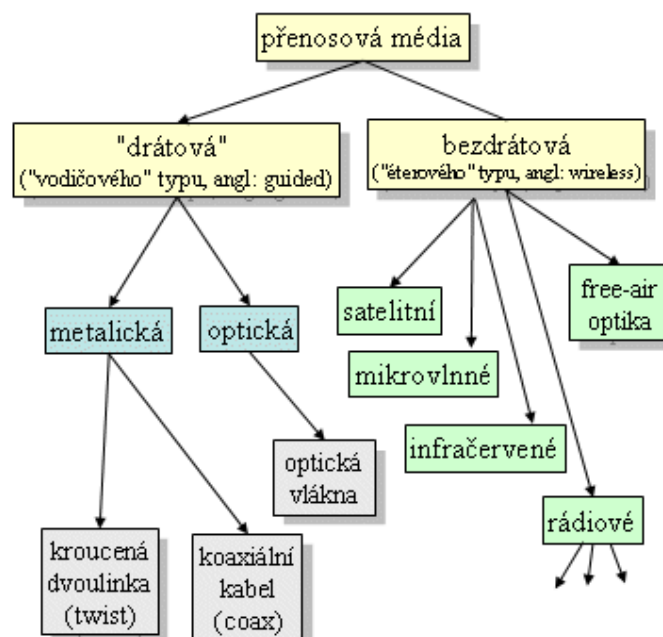
## 1.1 Komunikační rozhraní

Komunikační rozhraní slouží pro komunikaci mezi dvěma či více zařízeními. Jedná se o soubor prostředků, které umožňují komunikaci mezi koncovými uživateli.



**Obrázek 1.1** Komunikační rozhraní [1]

Rozhraní se skládá ze zdroje a příjemce zprávy, obvodů pro úpravu signálu a sdělovacího kanálu. Zdroj a příjemce zprávy může být osoba nebo zařízení, které generuje či přijímá zprávu. Podle průběhu signálu dělíme zprávu na analogovou (spojitý signál) a číslicovou (signál s diskrétními úrovněmi). Obvody pro úpravu signálu upravují zprávu na signál vhodný pro přenos přes sdělovací kanál. Sdělovací kanál slouží pro přenos zprávy od zdroje k příjemci zprávy. Dle typu sdělovacího kanálu lze rozlišit komunikaci bezdrátovou a kabelovou. [1] [2]



**Obrázek 1.2** Klasifikace přenosových medií [1]

### 1.2 Drátová komunikace

Drátová komunikace využívá pro vedení signálu metalické nebo optické vedení. V případě optického vedení se signál převede na světelný paprsek a následně veden ve skleněném nebo plastovém vlákne. Metalické vedení je tvořené vodičem, nejčastěji měděným například v podobě koaxiálního vedení nebo kroucené dvojlinky. [2]

Pro přenos signálu po kabelovém metalickém vedení se nejčastěji využívá RS232, RS422, RS485, SPI a I<sup>2</sup>C.

#### 1.2.1 RS232

Jedno z nejrozšířenějších drátových rozhraní zejména u PC a řídicích systémů. Komunikace probíhá pomocí třívodičového vedení (Tx, Rx a GND). Reprezentace signálu je pomocí napěťových úrovní, kde logické nule odpovídá 5 až 15 V a logické jedničky -5 až -15 V. Dosah tohoto rozhraní je limitován maximální hodnotou kapacity vedení 2500 pF [3]. Tato hodnota odpovídá cca 20 m vedení. RS232 lze využít pro komunikaci typu point to point (jeden vysílač a jeden přijímač). [2] [3]

#### 1.2.2 RS422

RS422 využívá pro přenos zprávy diferenční napětí namísto napěťových úrovní vůči zemi. Délka vedení může dosahovat až 1,2 km při vysoké přenosové rychlosti až 2,5 Mbit/s nebo maximální rychlosti přenosu 10 Mbit/s při kratších vzdálenostech. Komunikaci zajišťuje dvouvodičové vedení a point to multipoint (jeden vysílač a více přijímačů) přenos. RS422 se kvůli svým parametrům využívá k prodloužení komunikačního rozhraní RS232. [1] [4]

#### 1.2.3 RS485

RS485 vychází z RS422. Pro přenos využívá diferenční napětí a kroucenou dvoulinku a dosahuje podobných rychlostí a délek přenosu. Na rozdíl od RS422 využívá komunikaci typu multipoint (více vysílačů a více přijímačů). Maximální počet zařízení je omezen na 32 vlivem vstupních impedancí přijímačů. [2] [4]

#### 1.2.4 SPI

SPI (Serial Peripheral Interface) rozhraní slouží pro připojení periférií k řídicímu obvodu. Datový přenos je zajištěn třemi vodiči, dva datové (MOSI a MISO) a hodinový CLK. V případě připojení více periférií je nutné ke každému zařízení připojit navíc jeden vodič na výběr aktivní periférie (SS). Toto rozhraní využívá komunikaci typu single master (pouze jeden řídicí obvod a více periférií). Přenos probíhá mezi posuvným registrem řídicího obvodu a periférie podle CLK, které generuje řídicí obvod. [5]

#### 1.2.5 I<sup>2</sup>C

I<sup>2</sup>C (Inter Integrated Circuit) rozhraní slouží pro propojení periférií a řídicího obvodu. Přenos dat probíhá po dvouvodičovém vedení (Data a CLK). Na rozdíl od SPI využívá I<sup>2</sup>C komunikaci typu multimaster (více řídicích obvodů). Z elektrického hlediska se jedná o rozhraní typu otevřený kolektor. V klidovém stavu jsou oba vodiče vlivem pull up rezistorů v logické jedničce. V případě vysílání logické nuly řídicí obvod (master) pomocí výstupního tranzistoru změni hodnotu na vodičích. [5]

### 1.3 Bezdrátová komunikace

Bezdrátová komunikace pro přenos signálu využívá šíření elektromagnetických vln v otevřeném prostoru bez nutnosti vodivého spojení vysílače a přijímače. Nejčastěji přenos probíhá v přeloženém pásmu. Přeložené pásmo znamená modulaci původního signálu na jiný, zejména vyšší, kmitočet pomocí modulátoru signálu. Maximální dosah komunikace je dán parametry prostředí, vysílacím výkonem, přijímací citlivostí, použitými anténami a překážkami v přímé viditelnosti mezi stanicemi. [1] [2] [6]

Při uvažování volného prostoru lze vypočítat přijatý výkon podle Friisova vztahu (1.1) pro šíření vlny volným prostorem. [6]

$$P_P = P_V + G_V + G_P - L_0 \quad (1.1)$$

$P_P$  ..... Přijatý výkon (dB)

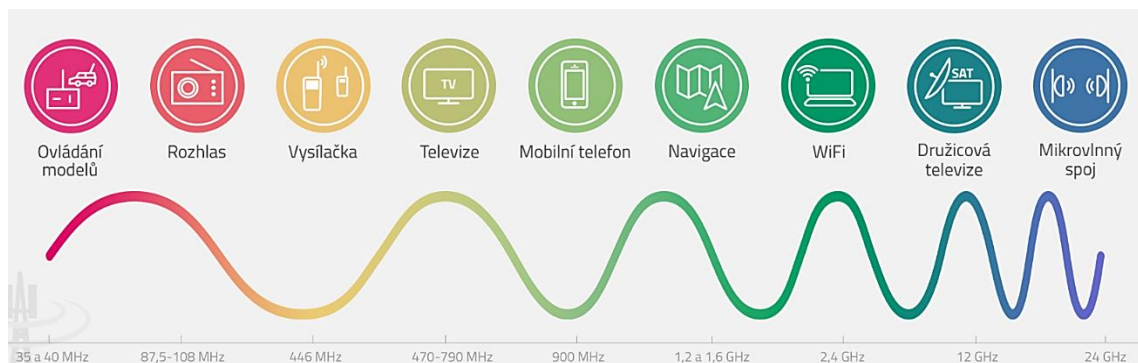
$P_V$  ..... Vyslaný výkon (dB)

$G_V$  ..... Zisk vysílací antény (dBi)

$G_P$  ..... Zisk přijímací antény (dBi)

$L_0 = 20 \log\left(\frac{4\pi l}{\lambda}\right)$  ..... Ztráty volného prostoru (dB)

Bezdrátovou komunikace dělíme podle kmitočtu, na kterém je přenášen signál a podle typu modulace signálu.



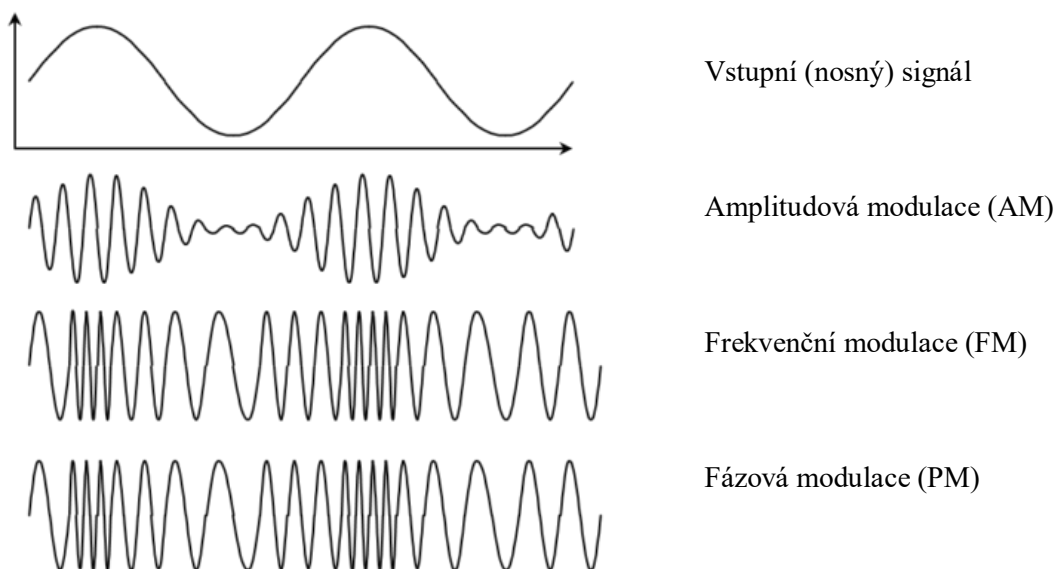
**Obrázek 1.3** Spektrum rádiového signálu [7]

V České republice je možné podle všeobecného oprávnění č. VO-R/10/11.2016-13 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu využívat pouze část kmitočtového spektra s přesně definovaným maximálním vysílacím výkonem. Nejčastěji využívané kmitočty jsou 27 MHz, 433 MHz, 868 – 870 MHz, 2,4 – 2,4835 GHz a 5,15 – 5,35 GHz. [7]

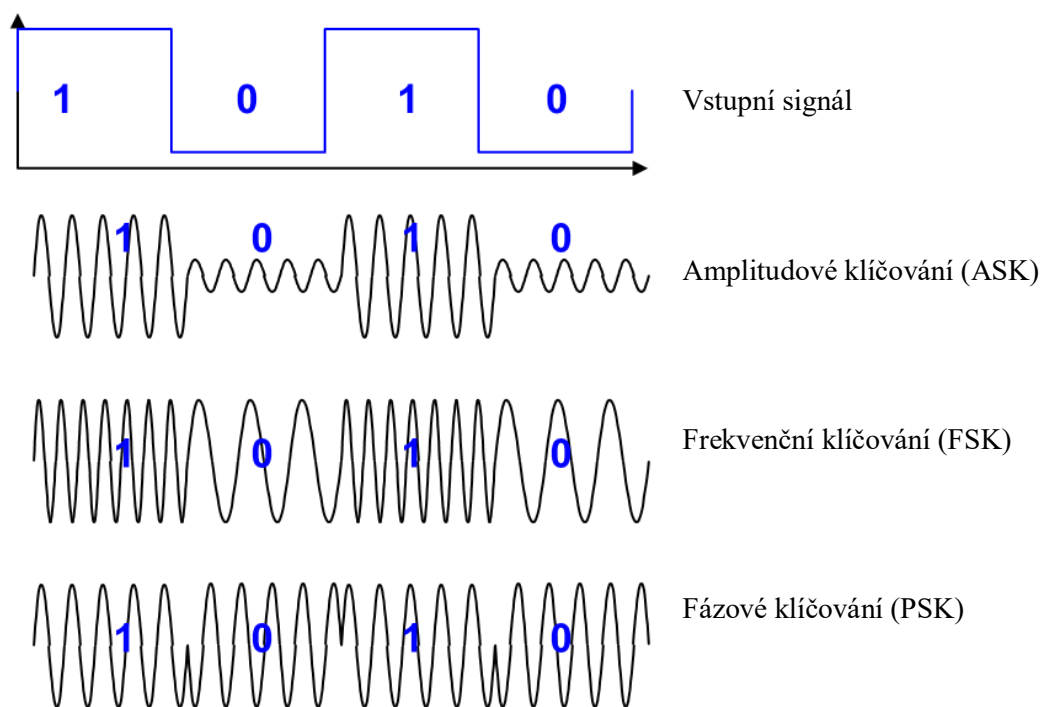
Pro bezdrátovou komunikaci se využívá přenos pomocí amplitudové, frekvenční a fázové modulace. Pro komunikaci se využívají rozhraní Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, Lora atd. popřípadě komunikace pouze pomocí vyslaného modulovaného signálu.

### 1.3.1 Modulace

Modulace znamená přenos modulačního signálu na jiný kmitočet daný vstupním nosným signálem. Modulace spočívá v ovlivňování parametrů nosné vlny modulačním signálem. Podle ovlivňovaného parametru vlny rozlišujeme tři základní typy modulace. Amplitudová modulace ovlivňuje amplitudu nosné vlny, frekvenční kmitočet nosné vlny a fázová upravuje fázi vlny. Délka modulace rozlišujeme podle vstupního signálu, který může být spojitý (analogový) nebo může nabývat pouze konečného počtu hodnot (digitální). Modulace digitálním signálem je často nazývána klíčování (Shift Keying). [8] [9]



**Obrázek 1.4** Modulace AM, FM a PM [9]



**Obrázek 1.5** Klíčování ASK, FSK a PSK [9]

Pro modulaci více stavového signálu se nejvíce rozšířila modulace QAM (kvadraturní amplitudová modulace) a QASK (kvadraturní amplitudové klíčování). Jedná se o kombinaci amplitudové a fázové modulace, kdy lze namísto jedné logické úrovně přenést více bitů. Vlivem této modulace lze přenášet větší objem dat menším kmitočtovým pásmem. [8] [9]

### 1.3.2 Bluetooth

Komunikační rozhraní Bluetooth vytvořené firmou Ericsson v roce 1999 jako náhrada drátového vedení (zejména rozhraní RS232). Rozhraní typicky spojuje dvě a více zařízení, která si mezi sebou vyměňují data. Původní verze Bluetooth v1.0 pracovala s rychlostí 1 Mbit/s s teoretickým dosahem 100 m (reálně až 10 m). Aktuální verze Bluetooth v4 z roku 2010 navýšila maximální rychlost přenosu dat až na 24 Mbit/s. [2] [10]

Komunikace mezi koncovými uživateli probíhá na kmitočtu 2,4 GHz a pro přenos signálu využívá FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), které používá kmitočtové skákání rozprostřeného spektra. Rozprostřené spektrum je způsob rádiové komunikace, při kterém se použije pseudonáhodný kód. FHSS využívá pseudonáhodnou posloupnost k přeladování kmitočtu nosné vlny a tím k rozšíření kmitočtového pásma signálu. Pseudonáhodná posloupnost není závislá na vysílaných datech, ale musí být totožná na vysílací i přijímací straně, jinak by nebylo možné signál demodulovat. Bluetooth využívá 79 kmitočtů s rozestupem 1 MHz s rychlostí 1600 skoků za sekundu. [10]

Výhodou rozprostřeného spektra je vysílání i v zarušeném prostředí, jelikož signál je vysílán na několika kmitočtech. Nevýhodou použití Bluetooth je vyšší spotřeba během vysílání (až 1 W) a nutnost spárovat zařízení před vysíláním dat. Spotřebu lze snížit použitím Bluetooth LE (low energy). Spotřeba této verze rozhraní je mezi 200 mA a 2 mA. [10] [11]

### 1.3.3 Wi-Fi

Rozhraní Wi-Fi slouží pro vysokorychlostní přenos dat především v počítačové síti. Rozhraní pracuje s kmitočtem 2,4 GHz a 5 GHz s teoretickým dosahem až 1000 m a maximální přenosovou rychlostí až 1 Gbit/s.

Pro modulaci dat využívá OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex), který kmitočtové spektrum rozdělí na více pásem a každé pásmo může využívat jiný typ modulace pro přenos signálu podle rušení daného pásma. Modulace signálu probíhá na více nosných vlnách a každá vlna je modulována modulací QAM pro analogový signál, popřípadě QASK pro digitální signál. [1] [2] [10]

Výhodou využití OFDM je odolnost vůči selektivnímu rušení (rušení na několika frekvencích spektra) a možnosti vysílání stejné informace více vysílači na stejném kmitočtu díky cyklickému prefixu. Cyklický prefix je doba před vysláním informace, kdy nevysílá žádnou novou informaci, ale vysílá nulový signál nebo poslední část budoucí zprávy. Výhodou využití Wi-Fi je dlouhý dosah a vysoká rychlost přenosu. Nevýhodou je vyšší spotřeba energie během vysílání, která může být až 80x vyšší než energie spotřebovaná při použití Bluetooth. [10] [11]

### 1.3.4 ZigBee

ZigBee slouží pro nízko výkonové komunikační spojení mezi koncovými uživateli. Rozhraní podporuje komunikaci na kmitočtu 868 MHz, 928 MHz a 2,4 GHz s přenosovou rychlostí od 20 kbit/s do 250 kbit/s. Dosah při využití maximálního vysílacího výkonu dosahuje až 100 m. [11]

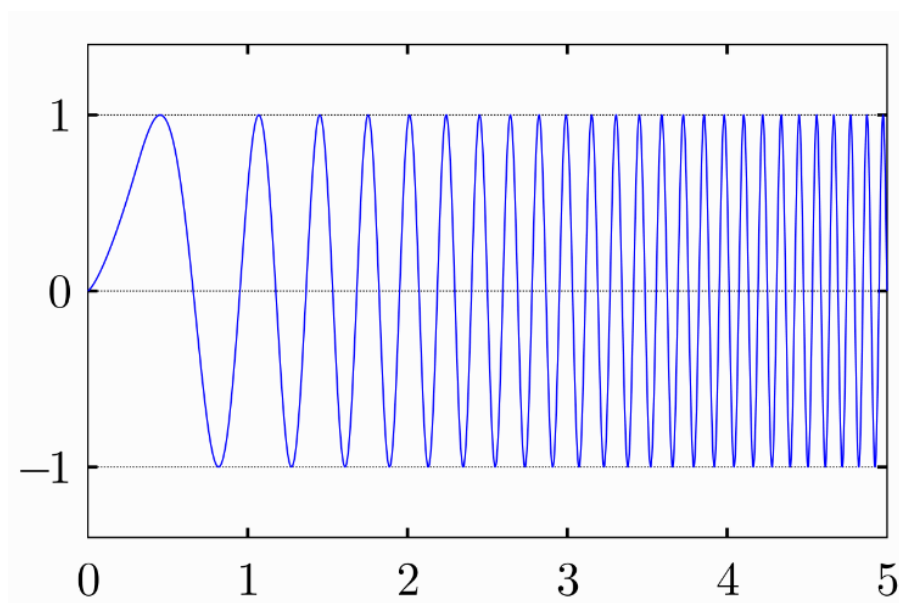
Pro přenos signálu ZigBee využívá DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). DSSS využívá podobně jako u FHSS pseudonáhodnou posloupnost. Modulovaný signál je násoben posloupností  $\pm 1$ . Kvůli násobení zavedeme redundanci a dojde k rozprostření spektra a snížení výkonu. Podle četnosti jedniček posloupnosti za jeden bit lze určit celkové pásmo přenášeného signálu. Zpětným vynásobením posloupností na přijímací straně dojde k rekonstrukci původního signálu. U přijatého rušení vynásobeného pseudonáhodnou posloupností dojde k rozprostření a snížení výkonu. [8] [10]

Výhodou použití DSSS je přenos signálu v silně zarušeném prostředí a zabezpečení přenosu, jelikož bez znalosti posloupnosti nelze signál dekódovat a ostatní uživatelé ho přijmou jako šum. Výhodou ZigBee je nižší energetická náročnost. Spotřeba při vysílání může být nižší než 1 mA. Nevýhodou je v současné době nižší rozšiřitelnost ZigBee modulů v elektronice. [10]

### 1.3.5 LoRa

LoRa (Long Range) patentovaná firmou Semtech, je rozhraní s dlouhým dosahem a velmi nízkou spotřebou ve srovnání s ostatními technologiemi. Komunikaci mezi koncovými uživateli lze provozovat na vzdálenost až 5 km (teoreticky až 50 km na přímou viditelnost) s rychlostí přenosu 1 až 50 kbit/s. LoRa pracuje na kmitočtech 433 MHz, 868 MHz a 915 MHz, kde pro použití v ČR lze využít 433 (433,05 – 434,79) MHz a 868 (863 – 870) MHz. [11]

Rozhraní LoRa přenáší signál pomocí CSS (Chirp Spread Spectrum). Jedná se o variantu rozprostřeného spektra. Kmitočet signálu se mění na rozdíl od FHSS spojitě v čase. Nejčastěji se kmitočet signálu mění lineárně a růst kmitočtu je řízen pilovým průběhem. [11] [12]



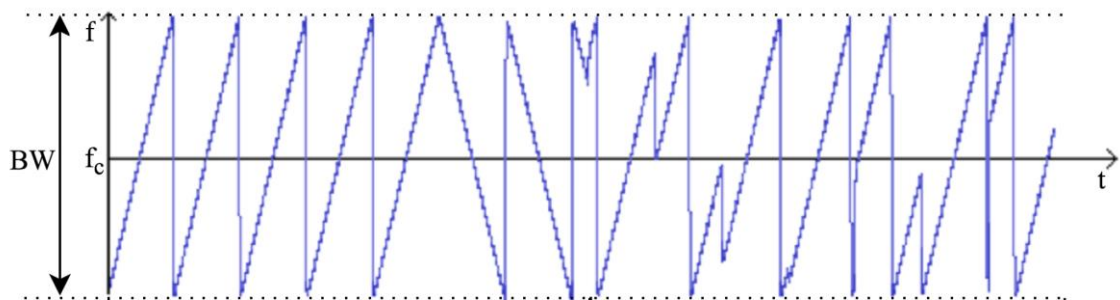
**Obrázek 1.6** Sinusový signál s lineárně rostoucí frekvencí v čase [12]

Lineární změna kmitočtu zobrazená na obrázku 1.6 je více odolná vůči rušení a Dopplerovu jevu než při skokové změně kmitočtu. Dále snižuje nároky na oscilátor generující kmitočty, jelikož je rozladován lineárně a nedochází ke skokovým změnám, které jsou přesně definovány. LoRa umožňuje provoz více komunikačních spojení na jednom kmitočtu. [11] [12]

Pro nastavení rozprostřeného spektra slouží parametry  $BW$  – šířka pásma,  $f_c$  – střední kmitočet,  $SF$  – koeficient rozprostření a  $CR$  – kódovací rychlost. Šířka pásma udává rozsah kmitočtů, které budou vysílány. LoRa podporuje šířky pásma 125 kHz, 250 kHz a 500 kHz. Střední kmitočet a šířka pásma je zobrazena na časovém průběhu na obrázku 1.7. Při dosažení maximálního kmitočtu dojde ke skokové změně kmitočtu na nejnižší hodnotu pásma a naopak. Koeficient rozprostření je definován rovnicí (1.2) a může nabývat hodnot od 7 do 12. Tímto je zavedena redundance, která napomáhá přenést signál bez ovlivnění rušením. Rychlost kódování lze vypočítat pomocí rovnice (1.3). S rostoucí rychlostí kódování bude komunikace náchylnější na krátkodobé rušení. [11]

$$SF = \frac{\text{počet odeslaných bitů}}{\text{počet symbolů}} \quad (1.2)$$

$$CR = \frac{4}{4 + n}, n \in \{1,2,3,4\} \quad (1.3)$$



**Obrázek 1.7** Průběh kmitočtu při vysílání v závislosti na čase [11]

Jeden symbol je nahrazen  $2^{SF}$  bity, které pokrývají celé pásmo kmitočtů. Doba jednoho symbolu lze popsat rovnicí (1.4), která závisí na šířce pásma a koeficientu rozprostření. Rychlost odesílání užitečných dat lze vyjádřit rovnicí (1.5), která je ovlivněna třemi parametry popsanými výše. [11]

$$t_{symbol} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (1.4)$$

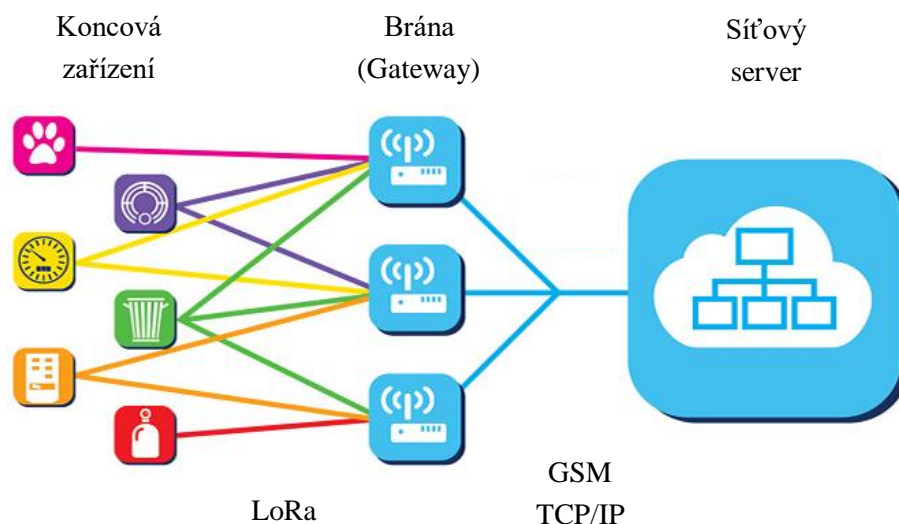
$$v_{symbol} = \frac{SF \cdot CR}{t_{symbol}} = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot CR \quad (1.5)$$

Nastavením parametrů rozprostřeného spektra se změní rychlost přenosu a maximální dosah, respektive citlivost přijímače. S rostoucí šířkou pásma klesá citlivost přijímače a se zvyšováním koeficientu rozprostření roste citlivost přijímače. [11]

## 1. Teoretický rozbor

Vyslaná zpráva se skládá z preambule, vlastní zprávy a volitelně hlavičky a CRC kódu. Preambule se skládá ze sekvence rostoucích a klesajících symbolů. Celková délka preambule může být v rozsahu od 0 do 65535 symbolů. Vlastní zpráva může nabývat délky až 255 Bytů a celková délka může být uvedena v hlavičce zprávy. Hlavička zprávy je volitelná a obsahuje délku vlastní zprávy, kódovou rychlost zprávy a jestli je na konci zprávy uveden CRC kód, který slouží pro detekci a opravu chyby dat, které vznikly při přenosu. [11] [12]

Síť LoRaWAN využívá MAC protokol. LoRaWAN byla navržena speciálně pro použití jako sensorová síť, kde senzory vysílají maximálně několikrát za hodinu. Síť se skládá z koncových zařízení, které komunikují s bránou (gateway). Brána předává příchozí pakety z koncových zařízení k síťovému serveru přes jiný typ rozhraní, například GSM nebo Ethernet. Brána by měla být schopná přijímat zprávy ze všech zařízení a z tohoto důvodu přijímat na všech kmitočtech se všemi šířkami pás, s kódovací rychlostí i s faktorem rozprostření. Síťový server přijímá pakety od brány, které dekoduje, uloží a popřípadě vygeneruje zprávu k dalšímu zařízení (serveru). [10] [11]



**Obrázek 1.8** Struktura LoRaWAN [11]

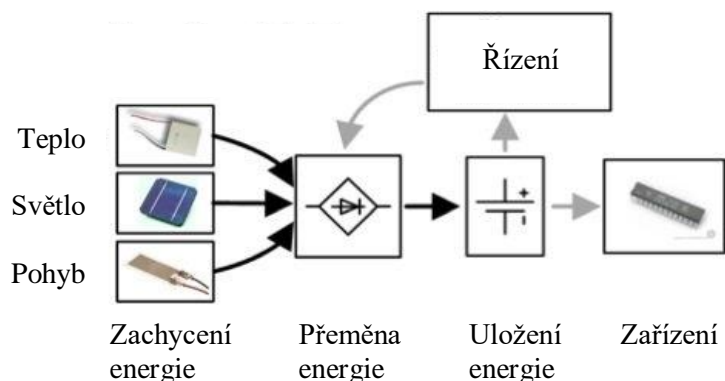
V případě použití sítě obsahuje zpráva mimo vlastní hlavičky i hlavičku MAC protokolu, která obsahuje adresu zařízení, použitý port, číslo zprávy, šifrování atd. Velikost hlavičky MAC protokolu je v rozmezí 13 a 28 Bytů. Pro správnou komunikaci je zapotřebí u koncového zařízení nastavit adresu koncového zařízení, použitý kanál, identifikátor aplikace, klíč síťové relace a klíč aplikační relace. Číslo kanál odpovídá středovému kmitočtu vysílání. Identifikátor aplikace slouží k identifikaci vlastníka koncového zařízení podle IEEE EUI 64 (obdobně jako MAC adresa u TCP/IP). Klíč síťové relace používá koncové zařízení a server k výpočtu a ověření celistvosti správy a k opravě chyb vzniklých při přenosu. Klíč aplikační relace slouží k zašifrování užitečných dat koncovým zařízením a dešifrování dat síťovým serverem. [11] [13]

Výhody použití rozhraní LoRa jsou přenos na dlouhé vzdálenosti i v zarušeném prostředí, možnost více komunikačních spojení na jednom kmitočtu a nízká energetická náročnost. Spotřeba elektrické energie je srovnatelná nebo nižší než při použití rozhraní ZigBee. Nevýhodou je nižší přenosová rychlost rozhraní. [11]



## 1.4 Energy harvesting

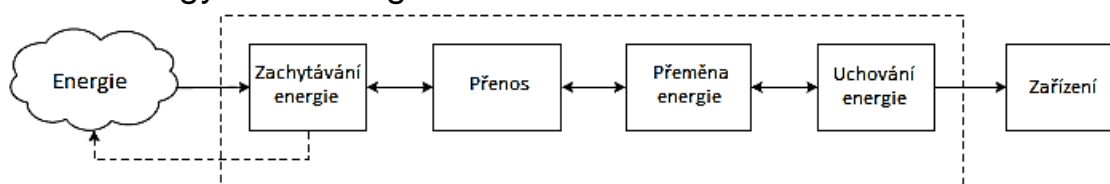
Energy harvesting neboli sklizeň energie, znamená získávání nevyužívané elektrické energie z okolních zdrojů. Tato energie je zachycena a následně pomocí této technologie převedena na elektrické napětí. Jako zdroj může sloužit kinetická, elektromagnetická, elektrostatická, piezoelektrická, tepelná nebo chemická energie. Mezi nejběžnější zdroje patří světlo, pohyb, teplo, vítr, vibrace nebo elektromagnetický smog. [14] [15] [16]



**Obrázek 1.9** Blokové schéma energy harvesting systému [17]

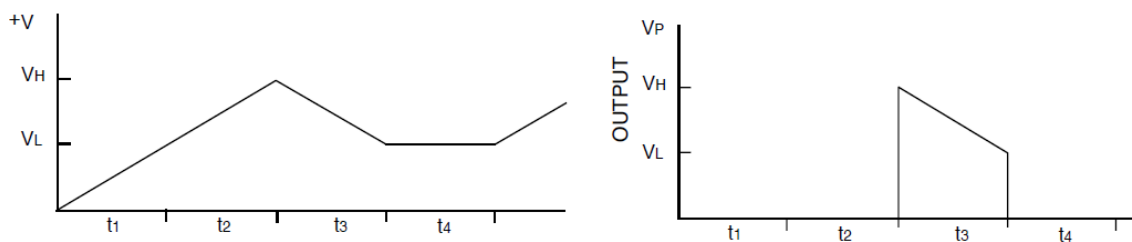
Na obrázku 1.9 je znázorněno blokové schéma energy harvesting systému. Systém se skládá ze zdroje energie, kterou EH modul zachytí a převede na energii, nejčastěji elektrickou, vhodnou pro napájení koncového zařízení. Přínosem této technologie je napájení nízko příkonových zařízení bez nutnosti připojení do elektrické sítě nebo použití baterií a využití volné energie, která by jinak nebyla využita. Tato energie je na rozdíl od fosilních paliv obnovitelná, zdarma a v některých případech všudypřítomná (světlo nebo teplo). S rozvojem integrace elektroniky, mikroelektroniky a internetu věcí (IoT) se nároky na napájecí výkon snižují a je možné využití energy harvesting technologie k napájení těchto zařízení. [14] [17] [18]

### 1.4.1 Energy Harvesting modul



**Obrázek 1.10** Obecná architektura energy harvesting systému [14]

Na obrázku 1.10 je znázorněno obecné zapojení energy harvesting systému. Tento systém má za úkol zachytit volnou energii, přeměnit ji na energii vhodnou k uložení a napájení zařízení. Pro zachytávání energie lze použít například fotovoltaický článek, piezoelektrický element, elektromagnetický nebo elektrostatický generátor. Tyto prvky zachytí neelektrickou energii a přemění ji na energii elektrickou. Tato energie je uchována v kondenzátorech nebo bateriích a podle potřeby je použita pro napájení zařízení. Pro uchování elektrické energie na krátkou dobu jsou nejčastěji využity elektrolytické kondenzátory nebo superkapacitory. Pro dlouhodobé uložení energie jsou využívány akumulátory. [14] [19]



**Obrázek 1.11** Průběh napětí u energy harvesting modulu EH300 [19]

Typický průběh napětí u energy harvesting modulu je uveden na obrázku 1.11. Jedná se o průběh napětí u modulu EH300 od firmy Advanced Linear Devices. Tento modul uchovává energii v externím kondenzátoru. V čase t1 a t2 dochází k nabíjení kondenzátoru a pokud napětí dosáhne potřebné úrovně, připojí kondenzátor na výstup v čase t3. Výstupní napětí modulu se pohybuje od 3,6 V do 1,8 V. [19]

## 1.5 Zdroje volné energie

Zdroj volné energie lze vybrat podle aplikace. Pro konkrétní projekt lze vybrat zdroj, který bude v místě sběru dostupný a dokáže napájet dané zařízení. Energie může být přírodní, například světlo, proudění vzduchu, teplo atd., nebo vytvořená činností člověka. Do této skupiny patří elektromagnetický smog, pohyb, vibrace, teplo atd.

### 1.5.1 Kinetická energie

Kinetická energie je spojena s pohybem předmětu a zahrnuje vibrační pohyb, rotační pohyb a translační pohyb. Celkovou energii vzniklou pohybem lze vypočítat pomocí vzorce (1.6). Z tohoto zdroje lze získat až  $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . [15]

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (1.6)$$

Kinetickou energii lze převést na elektrickou pomocí elektromagnetických, elektrostatických nebo piezoelektrických generátorů. Generátory se liší v použitém principu přeměny a v provozních parametrech. [14]

*Elektromagnetický generátor* využívá Faradayův indukční zákon. Zařízení se skládá z magnetu, který je připevněn k seismické hmotě, a cívký, ve které si indukuje napětí. [14]

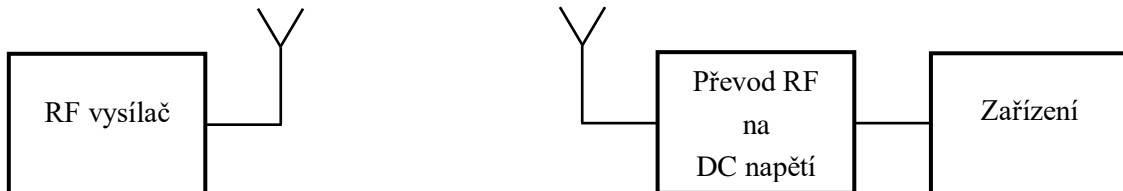
*Elektrostatický generátor* pracuje na principu proměnného dielektrického kondenzátoru. Jedna elektroda je připevněna k seismické hmotě a pohybem mění kapacitu kondenzátoru. [14]

*Piezoelektrický generátor* k činnosti využívá materiál s piezoelektrickým jevem, kde při mechanickém namáhání dochází k tvorbě elektrického náboje na stěnách materiálu. [14]

Zdrojem kinetické energie může být pohyb lidského těla, provoz vozidel, průmyslová výroba, seismická aktivita nebo vibrace budov a zařízení. [16]

### 1.5.2 Elektromagnetická RF energie

Energii získaná z elektromagnetického smogu lze získat přijetím rádiových vln pomocí antény a tuto energii převést na stejnosměrné napětí. Přijatou energii lze vypočítat pomocí vzorce (1.1) a celková energie závisí na vzdálenosti od vysílací stanice a vysílaného výkonu. Problém při použití této metody je zpětné vysílání rušení na stejném či blízkém kmitočtu z přijímací antény a tím dochází k rušení užitečného signálu. [14] [17]

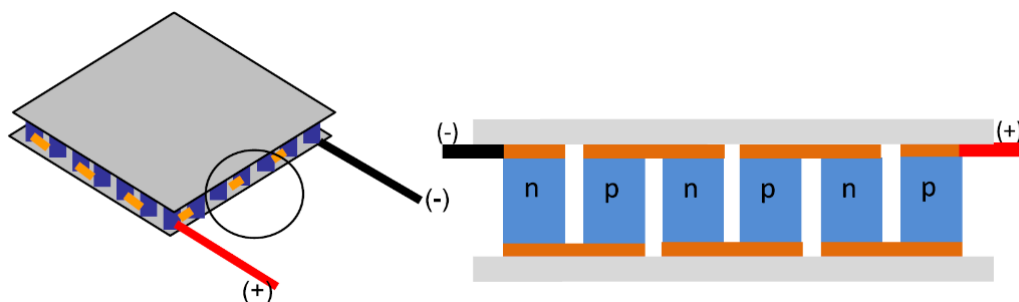


**Obrázek 1.12** RF energy harvesting systém [14]

Zdroje RF signálu zahrnují rádiové vysílání (analogové i digitální), televizní vysílání, globální systém pro mobilní komunikaci a bezdrátovou internetovou síť. Elektrická energie přijatá pomocí RF vysílání nepřesahuje hodnotu  $0,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . [15]

### 1.5.3 Tepelná energie

Tepelná energie je nejčastější typ odpadní energie. Téměř v každém technickém odvětví se uvolňuje teplo. Pro přeměnu tepelné energie, respektive gradientu teploty, se využívá termoelektrický princip. [17]



**Obrázek 1.13** Peltierův článek [15]

Termoelektrický princip zahrnuje tři jevy: Seebeckův, Peltierův a Thomsonův. Na obrázku 1.13 je zobrazen Peltierův článek, který lze použít i pro Seebeckův jev, a jeho příčný řez. Pro přeměnu teplotního gradientu na elektrickou energii se využívá Seebeckova jevu – obsahuje-li obvod dva různé vodiče či polovodiče zapojené v sérii a mají-li spojené konce různou teplotu (vznikne teplotní gradient), začne v materiálech tepelný tok, který má za následek tok nosičů náboje neboli elektrickou energii. Výsledné napětí je dáno rozdílem teplot a Seebeckovým koeficientem podle rovnice (1.7). Peltierův jev je jevem opačným k Seebeckovu a Thomsonův jev popisuje teplotní napětí u jednoho materiálu, a proto je výsledné napětí nižší. [15]

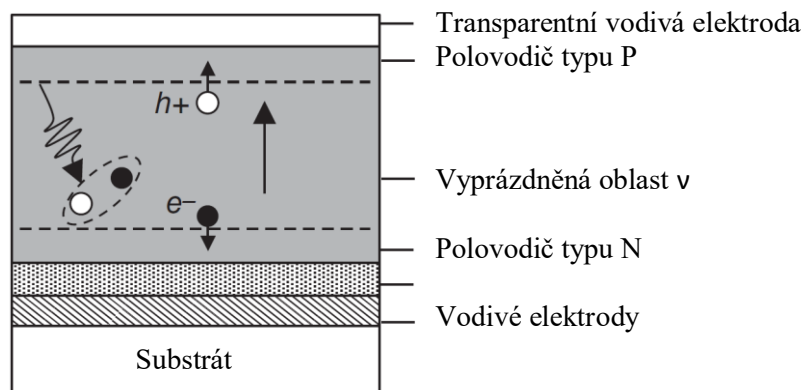
$$U_T = \alpha(T_t - T_c) \quad (1.7)$$

$U_T$  .....Výsledné teplotní napětí (V)

$T_t - T_c$ .....Gradient teplot (K)

## 1.5.4 Solární energie

V současné době jeden z nevyužívanějších zdrojů volné energie. Pro přeměnu solární na elektrickou energii se využívají fotovoltaické články, převážně fotodiody PIN. Jedná se o polovodiče, ve kterých se projevuje fotovoltaický efekt, který vzniká, když foton s dostatečnou energií a požadovanou vlnovou délkou generuje v polovodiči tzv. fotoproud. Foton je absorbován a generuje pár elektron – díra ( $e^- - h^+$ ). [14]



**Obrázek 1.14** Fotovoltaický efekt u amorfního křemíku [14]

Vlnová délka absorbovaného fotonu musí být kratší než prahová vlnová délka polovodiče  $\lambda_{prahová}$ , kterou lze vypočítat podle vzorce (1.8). Fotony s delší vlnovou délkou nejsou v polovodiči absorbovány a daný materiál se jeví jako průhledný. Fotoproud je generován převážně v oblasti vyprázdňěného prostorového náboje polovodiče a směřován na sběrné elektrody pomocí driftu. V oblasti polovodiče typu P a typu N jsou nosiče směřovány difuzí a nedochází k nasměrování na sběrné elektrody. Celkový absorbovaný výkon lze určit pomocí vzorce (1.9). Absorbovaný výkon je utlušen o odražený výkon a výkon absorbovaný v P a N vrstvách [14] [15] [20]

$$\lambda_{prahová} = \frac{hc}{E_g} \quad (1.8)$$

$$P_{absorb} = P_{dopad} \cdot (1 - R) \cdot (e^{-\alpha x_1} - e^{-\alpha x_2}) \quad (1.9)$$

$x_1$  ..... Tloušťka P vrstvy (m)

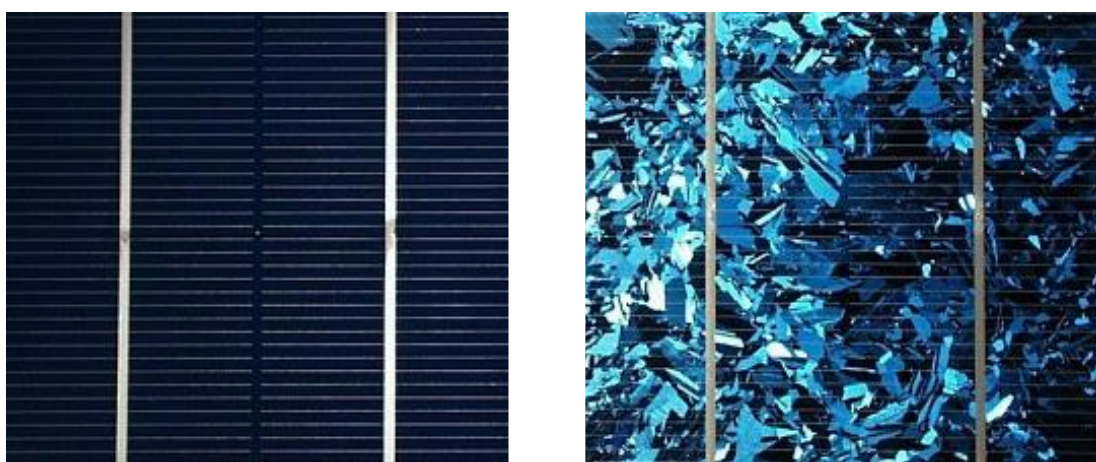
$x_2 - x_1$  ..... Tloušťka v oblasti (m)

Pro maximalizaci absorbovaného výkonu je potřeba vytvořit P vrstvu a transparentní elektrodu velmi tenkou a bez odrazovou, aby nedocházelo k absorpci výkonu v těchto vrstvách. Tloušťku P vrstvy lze vytvořit menší než 40 nm a vrstva vyprázdňěného náboje běžně dosahuje tloušťky jednotek  $\mu\text{m}$ . Celkový výkon fotovoltaických článků může dosahovat hodnoty až  $100 \text{ mW/cm}^2$  při přímém slunečním svitu a  $100 \mu\text{W/cm}^2$  v osvětlené místnosti. [14] [21]

Fotovoltaické články se nejčastěji vytvářejí na bázi křemíku. Nejběžnější jsou monokrystalický křemíkový článek, polykrystalické křemíkové články, amorfni křemíkový článek, CIGS článek, CdTe článek a polymerní článek. [14]

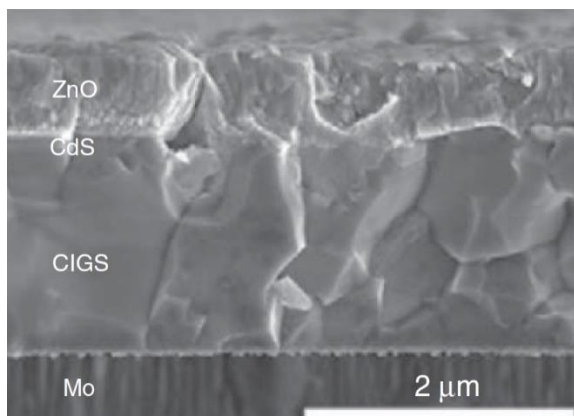
*Monokrystalický článek* (obrázek 1.15a) je nejstarší a základní typ fotovoltaických článků. Vyrábí se z monokrystalického křemíku, který lze vyrábět pomocí Czochralského metody pomalého tažení zárodku s přesně definovanými parametry z taveniny nebo metodou plovoucí zóny z polykrystalického křemíku. Jedná se o postupný pohyb roztavené zóny po celé ploše zárodku a vytlačení nečistot a nehomogenit ke kraji zárodku. Tato technologie je velmi energeticky i časově náročná. Účinnost těchto článků se pohybuje okolo 18 % a celková tloušťka křemíku v rozmezí 0,35 až 0,1 mm. [20]

*Polykrystalický křemík* (obrázek 1.15b) je nejběžnější materiál k výrobě fotovoltaických článků. Vyrábí se odléváním křemíku do forem vhodných tvarů, které jsou následně řezány na tenké plátky. Výroba tímto způsobem je jednodušší a levnější než Czochralského metoda nebo metoda plovoucí zóny. Nevýhodou je větší odpor článků a tím i nižší účinnost, která se pohybuje okolo 16 %. Tloušťka plátků křemíku se pohybuje v rozmezí 0,25 až 0,1 mm [14] [20]



**Obrázek 1.15** a) Monokrystalický článek b) Polykrystalický křemík [20]

*CIGS článek* se vyrábí ze sloučeniny mědi, india, gália a selenu, která je nanesena na podložce, nejčastěji skle, polymeru nebo kovu. Tento materiál se oproti křemíkovým článkům vyznačuje vyšší účinností, nižším teplotním koeficientem a nižší cenou výroby. Účinnost přeměny solární na elektrickou energii dosahuje hodnoty přes 20 %. Energie odpovídající šířce zakázaného pásu u této sloučeniny je v rozmezí 1,1 až 1,7 eV a závisí na poměrech jednotlivých materiálů. Takto vytvořený článek na vhodné podložce může být ohebný. [14] [20]



**Obrázek 1.16** Řez CIGS článkem [14]

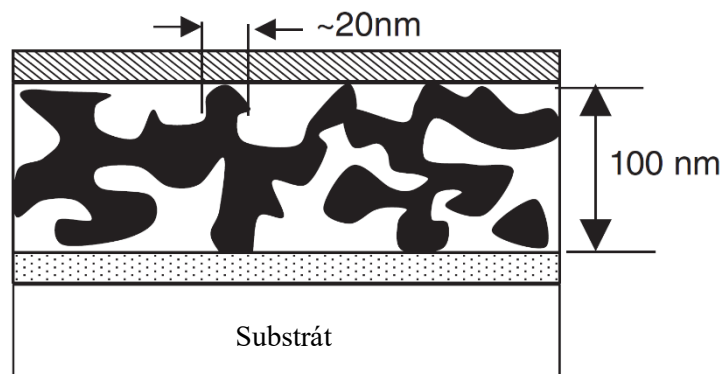
## 1. Teoretický rozbor

---

*Amorfní křemíkový článek* se vyrábí rozkladem sloučenin křemíku ve vodíkové atmosféře. Křemík se následně napráší na podložku vhodného materiálu a parametrů. Nejčastěji se využívá skleněná, plastová nebo kovová destička. Takto vytvořená vrstvička je tenčí než plátky vyráběné předcházejícími metodami a tím dosahuje nižší ceny výroby. Vrstvička se skládá z atomů křemíku a vodíku a má amorfní uspořádání, jelikož není periodicky uspořádána v celém objemu. Tento materiál dosahuje účinnosti kolem 17 %. [20]

*CdTe článek* vyráběný ze sloučeniny kadmia a telluru. Tenká vrstva sloučeniny je nanášena na podložky a vypálena při teplotách cca. 500 °C. Energie odpovídající šířce zakázaného pásma se pohybuje okolo 1,5 eV. Tato technologie se vyznačuje vysokým koeficientem absorpce a účinností přes 18 %. Architektura článku je podobná CIGS článkům a také umožňuje výrobu ohebných článků. [14] [20]

*Polymerní článek* využívá vodivých polymerů k vytvoření fotovoltaického jevu. Vodivý polymer se vyznačuje pravidelným střídáním jednoduchých a dvojných chemických vazeb. Chemickým složením materiálu lze upravovat parametry, například šířku zakázaného pásu, stabilitu nebo pevnost materiálu. Maximální délka šíření vodivého páru je omezena na 10 nm, poté zpětně rekombinuje. Tuto vzdálenost lze prodloužit použitím polymeru s objemovou heterojunkcí na vzdálenost až 20 nm. Účinnost polymerních článků se pohybuje mezi 5 až 9 %. Výhodou je použití dostupnějších materiálů a možnost nastavit parametry článku pomocí chemického složení. [14]



**Obrázek 1.17** Polymerní článek s objemovou heterojunkcí [14]

## 2. Návrh autonomní jednotky

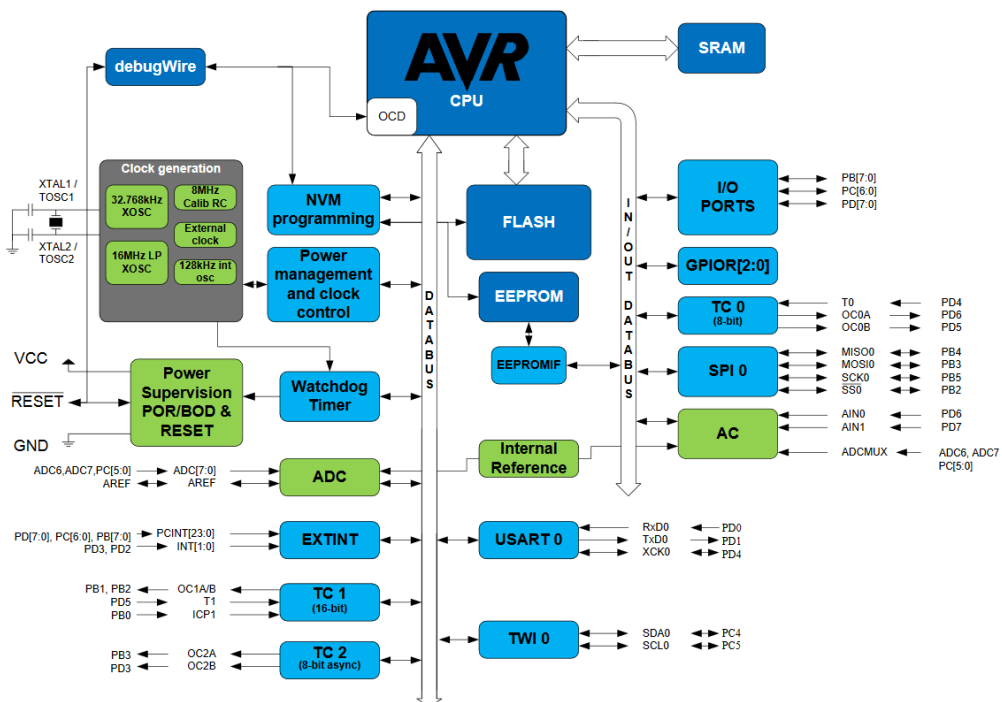
Pro komunikaci mezi měřícím a přijímacím modulem byly navrženy dva systémy využívající přenos pomocí RF signálu s amplitudovou modulací u první varianty nebo technologii LoRa v případě druhé. Napájení měřícího modulu zajišťuje energy harvesting modul Advanced Linear Devices EH300 napájený solárním článkem. Zapojení obou variant je téměř totožné, pouze obsahují jiný typ komunikačního modulu.

### 2.1 Použité obvody

#### 2.1.1 ATMEL ATmega328

Řízení jednotek zajišťuje mikrokontrolér od firmy ATMEL ATmega328. Jedná se o čip s 8-bitovou sběrnicí založený na RISCové technologii. Tato technologie využívá redukovanou instrukční sadu, která v tomto případě obsahuje 131 plnohodnotných instrukcí. Tento čip obsahuje 32 KB Flash paměť pro uložení programu, 2 kB SRAM a 1 kB EEPROM paměť pro uložení dat, 23 vstupně/výstupních pinů, 8 AD převodníků, 3 časovače, komparátor, USART, SPI a TWI modul atd. Pro napájení čipu lze využít napětí v rozmezí 1,8 až 5,5 V. Mikrokontrolér lze použít v pouzdrů PDIP28, MLF 28pin, TQFP 32pin a MLF 32pin. [22]

Pro taktování mikrokontroléru lze využít několik možností zdroje hodin. Lze využít vnitřní RC oscilátor s kmitočtem 128 kHz, kalibrovaný vnitřní RC 8 MHz oscilátor, externí zdroj kmitočtu nebo externí krystalový oscilátor, který může pracovat ve třech režimech. Nízko – výkonový režim, nízko – kmitočtový režim a standartní režim. Pro přesné taktování, které je důležité hlavně při komunikacích, je použit externí krystalový oscilátor. S rostoucím kmitočtem roste rychlost procesoru, ale také celková spotřeba. Při použití krystalu s polovičním kmitočtem klesne spotřeba téměř o polovinu. [22]



Obrázek 2.1 Blokový diagram mikrokontroléru ATMEL ATmega328 [22]

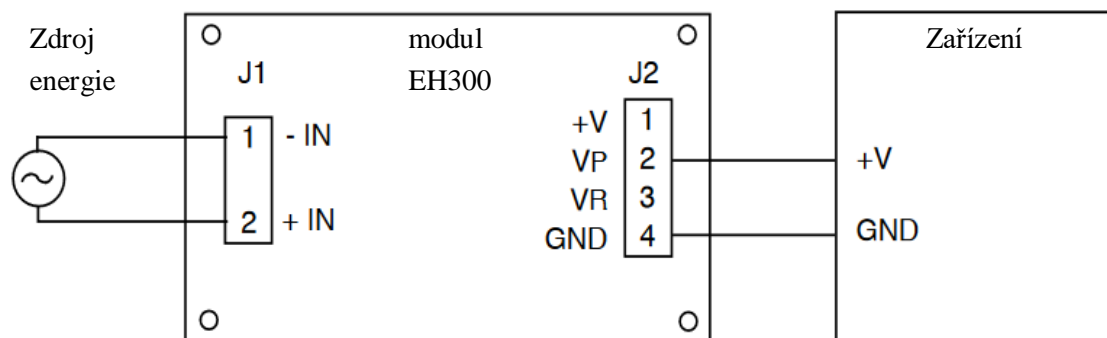
### 2.1.2 MaxDetect RHT03

Základní sběr hydrometeorologických dat zajišťuje digitální senzor RHT03 od firmy MaxDetect. Veličiny lze měřit v rozsahu 0 až 100 % u vlhkosti a -40 až 80 °C u teploty. Přesnost měření výrobce deklaruje v rozmezí  $\pm 2$  % vlhkosti a  $\pm 0,5$  °C teploty. Napájení senzoru obstarává stejnosměrné napětí 3,3 V až 6 V. Pro bezproblémové přečtení dat je nutné počkat 2 sekundy po připojení senzoru k napájení. [23]

Senzor komunikuje po 1-wire MaxDetect sběrnici s pull-up rezistorem. Tato sběrnice je vyvinuta firmou MaxDetect Technology. Komunikaci zahajuje nadřazený mikrokontrolér, který vyšle startovací sekvenci (1 ms logickou nulu a 20  $\mu$ s logickou jedničku). Senzor následně vyšle startovací sekvenci (80  $\mu$ s logickou nulu a 80  $\mu$ s logickou jedničku), která je následována posloupností naměřených dat. Data jsou ze senzoru vysílána v posloupnosti 16 bitů vlhkosti, 16 bitů teploty a 8 bitů kontrolního součtu jednotlivých Bytů. [23]

### 2.1.3 Advanced Linear Devices EH300

Energy harvesting modul EH300 uchovává elektrickou energii v 1 mF kondenzátoru a následně ji použije pro napájení zařízení. Na vstupu modulu může být připojen jakýkoliv zdroj elektrické energie s výstupním AC i DC napětím od 0 V do 500 V díky použití spínaného usměrňovače napětí a minimálním proudem 1 nA. Na výstup lze připojit zařízení se vstupním napětím 1,8 V až 3,6 V a maximálním proudem 1 A. Průběh výstupního napětí je uveden na obrázku 1.11. [19]



**Obrázek 2.2** Zapojení modulu EH300 [19]

Typické zapojení EH300 je zobrazeno na obrázku 2.2. Vstupní konektor obsahuje 2 vstupy, které slouží pro připojení zdroje energie. Výstupní konektor obsahuje 4 výstupy. Výstup +V spojený s kondenzátorem pro měření napětí nebo zvětšení kapacity připojením externího kondenzátoru. Na výstup VP lze připojit zařízení, které bude napájeno z EH modulu. VR slouží pro indikaci připojení kondenzátoru k VP, kdy na tomto výstupu je logická nula při připojení a napětí na kondenzátoru při nabíjení. [19]

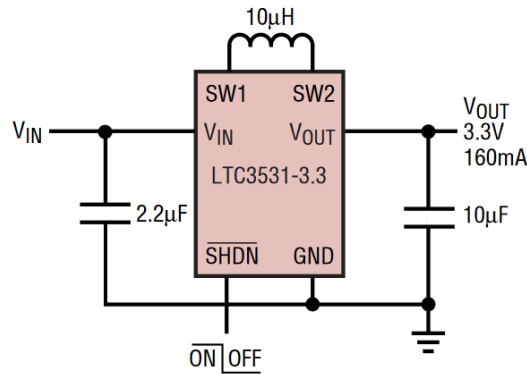
### 2.1.4 RAYSTAR OPTRONICS RC1602B-BIY-CSVD

Naměřené hodnoty se zobrazují na dvouřádkovém šestnáctimístném displeji LCD RC1602B-BIY-CSVD od firmy RAYSTAR OPTRONICS. Displej je řízen řadičem ST7066, který je kompatibilní s řadičem HD44780. Napájecí napětí logických obvodů je v rozsahu 3 V až 3,6 V. Pro připojení displeje k mikrokontroléru se 4 bitovou komunikací je zapotřebí 7 výstupů z jednočipu (4 pro přenos informace, Enable, R/W a RS). [24]



### 2.1.5 Linear Technology LTC3531-3.3

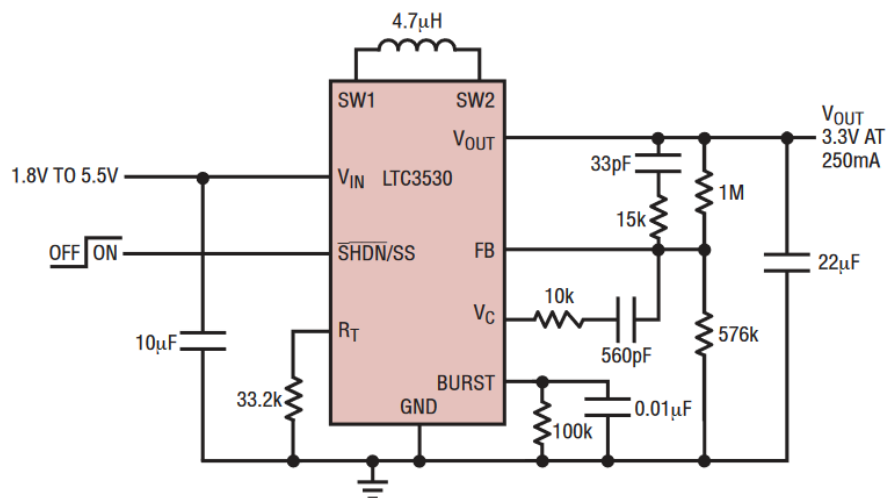
Pro napájení vysílacího modulu s RF vysílačem byl vybrán DC/DC měnič typu Buck-Boost LTC3531-3.3 od firmy Linear Technology s pevně nastaveným výstupním napětím 3,3 V a maximálním výstupním proudem 0,2 A. Tento měnič může pracovat s efektivitou až 90 % a s rozsahem napájecího napětí 1,8 až 5,5 V. Pro správnou funkci měniče je zapotřebí pouze tři pasivních součástek, vstupní a výstupní filtrační kondenzátor a tlumivka. Čip lze pořídit v pouzdru 6-pin TSOP a 3 x 3 mm DFN. [25]



Obrázek 2.3 Katalogové zapojení LTC3531-3.3 [25]

### 2.1.6 Linear Technology LTC3530

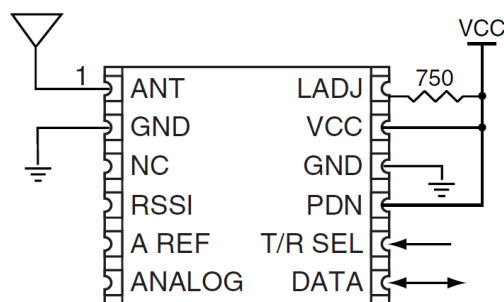
Pro napájení vysílacího modulu s LoRa vysílačem byl zvolen DC/DC měnič typu Buck-Boost LTC3530 od firmy Linear Technology z důvodu vysokého zvlnění a obtížné dostupnosti měniče LTC3531-3.3. LTC3530 může pracovat s efektivitou až 96 % a s rozsahem napájecího napětí 1,8 až 5,5 V. Výstupní napětí lze nastavit od 1,8 do 5,25 V s maximálním výstupním proudem až 0,6 A. Pro správnou funkci obsahuje zapojení zpětnou vazbu FB, kterou lze nastavit výstupní napětí, kompenzační smyčku  $V_C$ , rezistor  $R_T$  pro nastavení RC oscilátoru a obvod pro nastavení režimu měniče. LTC3530 může pracovat ve dvou režimech. Burst, kdy energii dodá pouze pokud je zapotřebí a PWM, kdy dodává energii stále pomocí pulsně šířkové modulace. Burst mód je vhodnější pro menší zátěže, PWM pro vyšší odběry proudu. Čip lze pořídit v pouzdru MSOP-10 a 3 x 3 mm DFN. [26]



Obrázek 2.4 Katalogové zapojení LTC3530 [26]

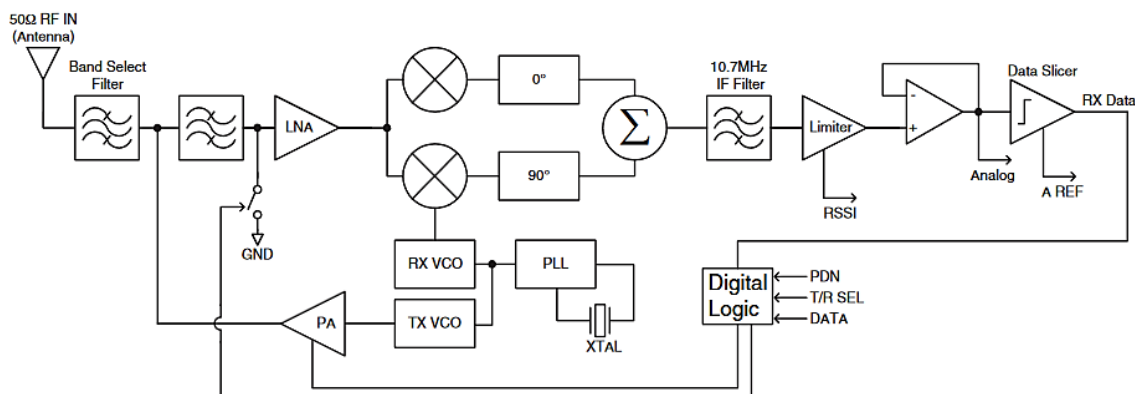
### 2.1.7 Linx technologies TRM-433-LT

RF vysílací modul TRM-433-LT zajišťuje modulaci a vysílání dat. Čip pracuje na frekvenci 433,92 MHz a pro modulaci dat využívá amplitudovou OOK (On-Off Keying) modulaci neboli dvouúrovňovou ASK. Čip může pracovat jako vysílač i jako přijímač podle nastavení vstupních pinů. Vysílací výkon vysílače lze regulovat rezistorem 0 až 10 kΩ v rozmezí 11 až -21 dBm. Maximální sensitivita přijímače je -118 dBm. Čip může pracovat s rychlostí přenosu dat v rozmezí 65 až 10 000 bitů/s a s rozsahem napájecího napětí od 2,1 do 3,6 VDC. Při nižších hodnotách rychlosti přenosu dat může docházet k rozpadu spojení. [27]



**Obrázek 2.5** Katalogové zapojení TR-433-LT [27]

Základní zapojení modulu zobrazené na obrázku 2.5 obsahuje pouze jeden rezistor  $R_{LADJ}$  pro nastavení vysílacího/přijímacího výkonu a vysílací 50 Ω anténu. Pro komunikaci lze využít piny T/R SEL pro volbu režimu vysílač nebo přijímač, DATA pro přenos dat a PDN pro výběr pracovní/úsporný režim. [27]



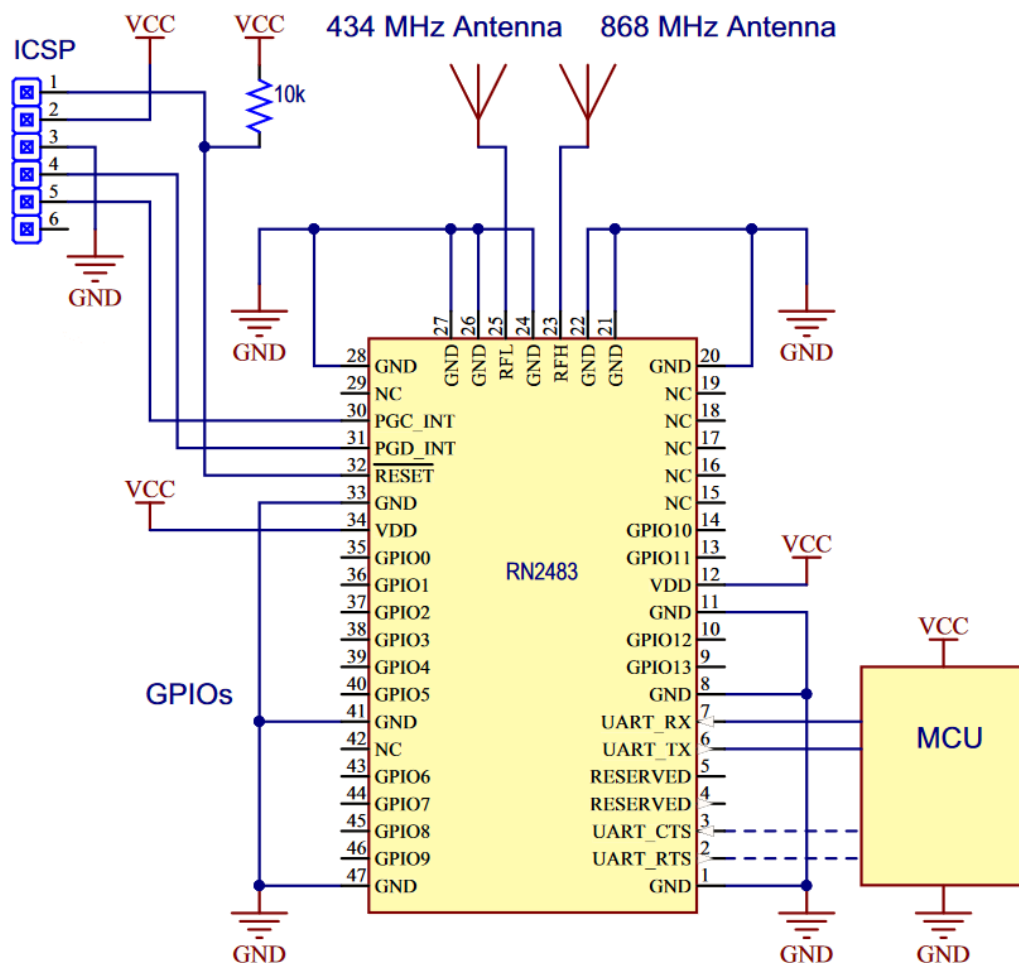
**Obrázek 2.6** Blokové schéma TRM-433-LT [27]

TRM-433-LT se skládá z vysílače a přijímače, které jsou vzájemně odděleny. Blokové schéma modulu je uvedené na obrázku 2.6. V horní části je zobrazena přijímací část, která obsahuje vstupní filtr, vstupní zesilovač LNA, kvadrurní demodulátor s konverzí na mezifrekvenční (10,7 MHz) kmitočet. Následně je signál zesílen, filtrován a demodulován. Na pinu RSSI lze sledovat intenzitu přijatého signálu, kde napěťová úroveň odpovídá síle přijatého signálu. Vysílací část se skládá z analogového spínače, který podle dat spíná nebo rozpíná vysílací kmitočet na výstup. Kmitočet pro vysílání a příjem je generován integrovaným oscilátorem a upravován fázovým závěsem na požadovanou hodnotu. Pro vysílání je požadován kmitočet 433,92 MHz a pro přijímací část rozdílový kmitočet pro mezifrekvenční kmitočet. [27]

### 2.1.8 Microchip RN2483

RN2483 od firmy Microchip slouží pro modulaci dat a komunikaci prostřednictvím technologie LoRa na kmitočtech 863 MHz do 870 MHz a od 433,05 MHz to 434,79 MHz. Modul umožňuje komunikaci pomocí protokolu LoRaWAN třídy A, což znamená obousměrná komunikace typu half-duplex (může vysílat nebo přijímat). [28]

Citlivost přijímače dosahuje hodnoty až -146 dBm. Tato hodnota závisí na nastavení modulu, šířce pásma a koeficientu rozptřeni, jak bylo uvedeno v kapitole 1.3.5. Výkon vysílače lze programově nastavit v rozmezí -4 až 14 dBm s přenosovou rychlostí až 10,937 kbit/s. Napájecí napětí se pohybuje v rozmezí od 2,1 do 3,6 V. Napájecí proud závisí na režimu činnosti, při nečinnosti 2,8 mA při 3,3 V a při vysílání v rozmezí od 14,7 mA do 38,9 mA podle nastaveného výkonu. Dle výrobce maximální dosah dosahuje vzdálenosti až 15 km ve volném prostoru a až 5 km v zastavěné oblasti. [28]



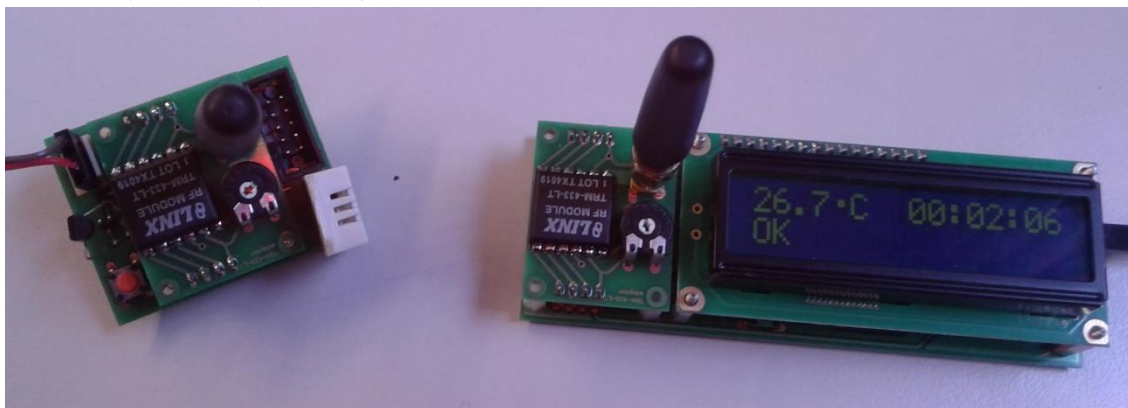
**Obrázek 2.7** Katalogové zapojení Microchip RN2483 [28]

Pro komunikaci mezi RN2483 a mikrokontrolérem slouží UART modul a příkazy v ASCII kódu. Parametry UART přenosu jsou 57600 bit/s, 8 bitové slovo bez parity a 1 stop bit. Data jsou odesílána jako hexadecimální reprezentace ASCII kódu. Každý příkaz musí být ukončen sekvencí <CR><LF> neboli ukončení řádku a prázdný řádek. Modul rozpoznává tři základní typy příkazů, systémové, pro LoRaWAN protokol a rádiové příkazy. [13] [28]

### 2.2 Návrh zapojení

Pro přenos sensorových dat byly navrženy dva systémy využívající odlišný způsob přenosu. První systém využívá přenos pomocí rádiových vln a OOK pro modulování dat. Tento systém využívá vysílací modul TRM-433-LT od firmy Linx Technologies popsany v kapitole 2.1.7. Druhý systém vysílá data pomocí technologie LoRa (rozprostřené spektrum) s použitím vysílacího modulu RN2483 od firmy Microchip popsaného v kapitole 2.1.8.

#### 2.2.1 Systém využívající RF přenos a modul TRM-433-LT

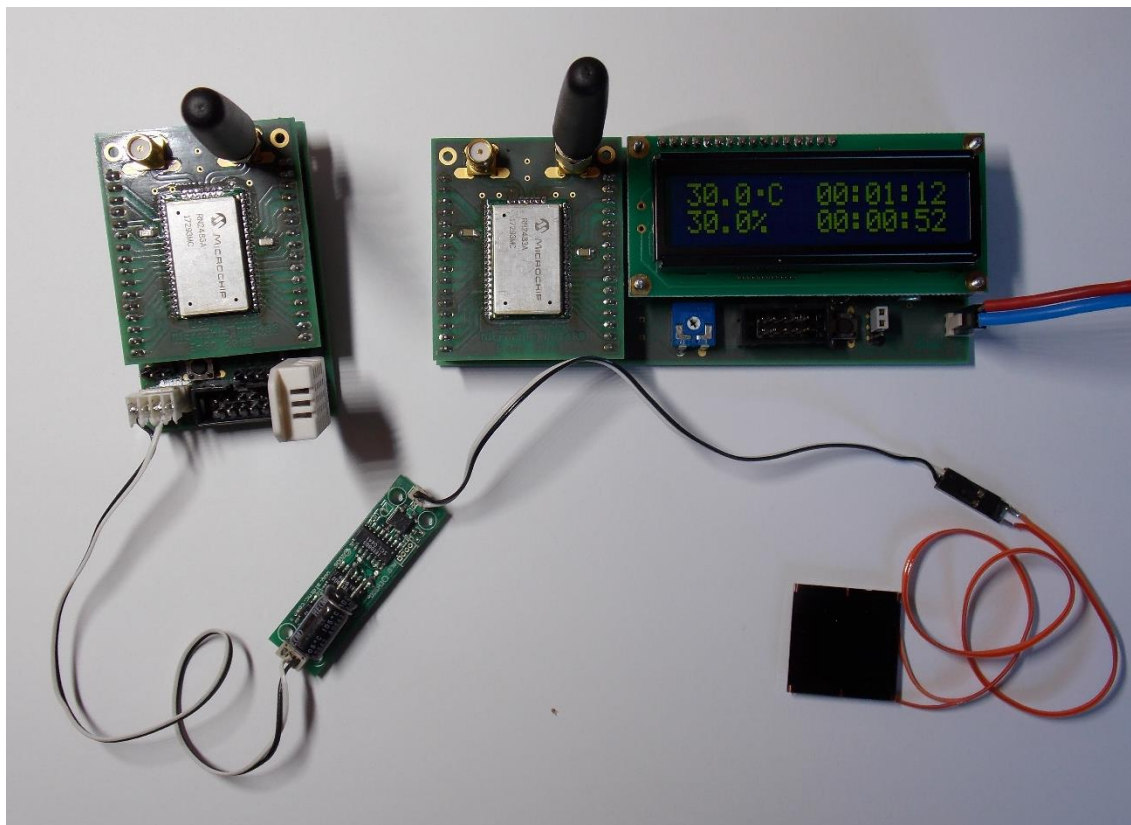


**Obrázek 2.8** Vysílací a přijímací jednotka využívající RF přenos

*Vysílací jednotka* má za úkol změřit hodnotu teploty a vlhkosti a tato data vyslat pomocí OOK modulace. Schéma zapojení je uvedeno v příloze VI. *Schéma vysílací jednotky s TRM-433-LT*. Obsahuje mikrokontrolér ATmega328, teplotní a vlhkostní senzor RHT03, DC/DC měnič LTC3531-3.3 a RF modul TRM-433-LT. Řízení celého modulu zajišťuje mikrokontrolér ATmega328 popsany v kapitole 2.1.1 taktovaný externím krystalem s kmitočtem 8 MHz. Pro zajištění širokého rozmezí napájecího napětí je pro napájení modulu použit DC/DC měnič LTC3531-3.3 uvedený v kapitole 2.1.5 doplněný o napájení z baterie kvůli pohotovostnímu režimu senzoru RHT03 z důvodu zkrácení doby pro vyčtení dat. Pro zjištění přítomnosti napájení při provozu s baterií je vstupní napětí přivedeno na vstupní pin tranzistoru Q2, který přivede stabilizované napětí na pin externího přerušení mikrokontroléru. V případě použití jiného senzoru lze baterii nepoužít a modul napájet pouze pomocí EH300. Vstupní napětí je možné měřit pomocí AD převodníku ADC0 a vstupního děliče napětí (rezistory R2 a R5).

*Přijímací jednotka* obstarává příjem dat z vysílací jednotky a zobrazení hodnot na displeji. Schéma zapojení je uvedeno v příloze VII. *Schéma přijímací jednotky s TRM-433-LT*. Jednotka obsahuje mikrokontrolér ATmega328, RF modul TRM-433-LT, lineární stabilizátor napětí LF33CDT a displej RC1602B-BIY-CSVD. V návrhu zapojení je opět použit mikrokontrolér od firmy ATMEL ATmega328, který je taktován externím krystalem s kmitočtem 16 MHz, který zajišťuje bezproblémovou komunikaci s řadičem displeje. Použití vyššího kmitočtu je možné kvůli stabilnímu napětí a možnosti vyšší spotřeby energie. Napájení jednotky zajišťuje lineární stabilizátor LF33CDT, jelikož modul bude napájen z externího zdroje a není potřeba vysoké účinnosti, protože je přebytečná energie přeměněna na teplo. Naměřené hodnoty se zobrazují na dvouřádkovém šestnáctimístném displeji LCD RC1602B-BIY-CSVD popsaném v kapitole 2.1.4 s 4 bitovou komunikací.

## 2.2.2 Systém využívající technologii LoRa a modul RN2483



**Obrázek 2.9** Přijímací a vysílací jednotka využívající technologii LoRa

*Vysílací jednotka* využívá shodné zapojení s vysílací jednotkou s TRM-433-LT modulem. Schéma zapojení je uvedeno v příloze VIII. *Schéma vysílací jednotky s RN2483.* Obsahuje mikrokontrolér ATmega328PB, teplotní a vlhkostní senzor RHT03, LoRa modul RN2483, konektory pro připojení dalších senzorů a DC/DC měnič LTC3530 popsány v kapitole 2.1.6. Napájení je doplněno o připojitelnou baterii pomocí tranzistoru M2, kterou lze využít pro pohotovostní režim nebo prodloužení doby pro bezproblémové odeslání dat, jelikož standardní kondenzátor (1 mF) u EH300 nedokáže dodat dostatečné množství energie. Pro výběr režimu DC/DC měniče slouží rezistory R8 (PWM mód), R9 (BURST mód) nebo automatický režim (volí podle odebraného proudu) při neosazení odporů.

*Přijímací jednotka* využívá shodné zapojení s přijímací jednotkou s TRM-433-LT modulem. Schéma zapojení je uvedeno v příloze IX. *Schéma přijímací jednotky s RN2483.* Jednotka obsahuje mikrokontrolér ATmega328PB, LoRa modul RN2483, displej RC1602B-BIY-CSVD, lineární stabilizátor napětí LF33CDT a slot pro připojení paměťové microSD karty. Paměťová karta slouží pro uložení přijatých dat a času mezi příjmy hodnot z vysílací jednotky.

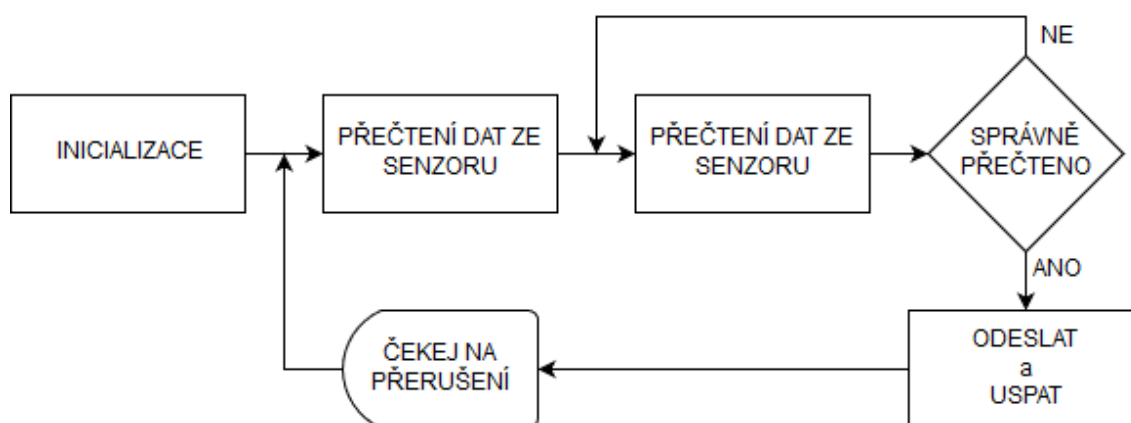
Pro řízení jednotek byl použit mikrokontrolér ATmega328PB, který je novějším typem ATmegy328. Obsahuje několik odlišností, např. novější USART modul, 2 SPI a TWI moduly, úspornější provoz atd. Další výhodou je použití nevyužitých pinů u 32 pinového TQFP pouzdra pro port E (pin 19 a 22). ATmega328PB má kompatibilní funkce se starším modelem a lze použít program vytvořený pro ATmega328 bez větších úprav. Pouze je nutné upravit registry pro USART, SPI a TWI moduly a pro některé čítače. [29]

### 2.3 Program mikrokontroléru

Programy pro mikrokontrolery jsou napsané v jazyce C v softwaru Atmel Studio. Základní návrh je pro oba systémy totožný, pouze se liší ve vysílací / přijímací sekvenci příkazů.

#### 2.3.1 Vysílací jednotka

Při připojení napájení nebo vypnutí režimu spánku mikrokontrolér vyčte data ze senzoru a pokud jsou data správně přečtena, odešle je, pokud ne, pokusí se o opětovné přečtení senzoru. Správnost přečtení dat ověřuje kontrolní součet přečtený ze senzoru a součet spočtený z přijatých dat v případě použití senzoru RHT03. Po odeslání dat přejde mikrokontrolér a periferie do úsporného režimu a čekají na opětovné připojení napájecího napětí na vstup.



**Obrázek 2.10** Vývojový diagram algoritmu vysílací jednotky

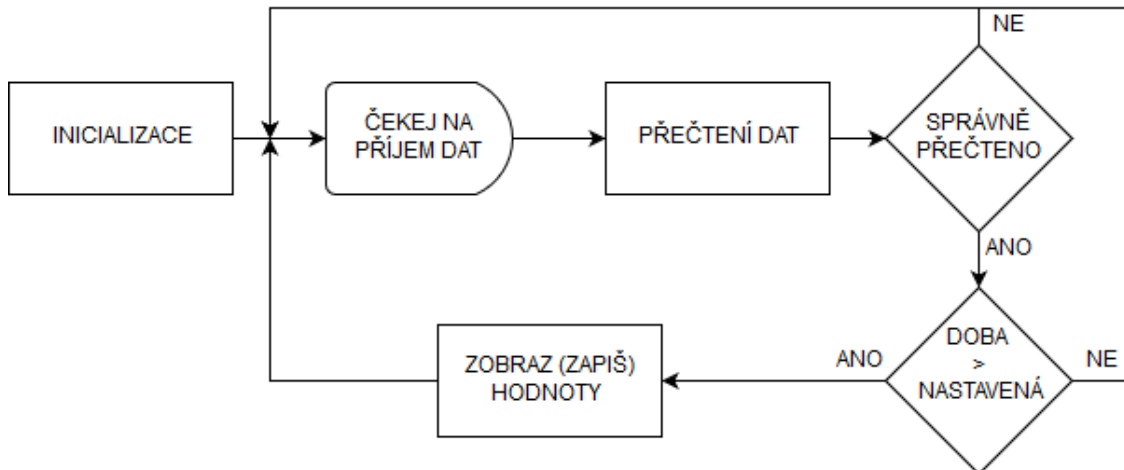
Vývojový diagram na obrázku 2.10 znázorňuje průběh programu. Celý program je uveden na příloženém CD. Program se skládá z inicializace mikrokontroléru a periferií, vyčtení dat ze senzoru a ověření správnosti hodnot, odesílací sekvence a nastavení úsporného režimu. Uvedený diagram popisuje provoz při použití pomocné baterie. V případě použití pouze energy harvesting modulu dojde po odeslání k vypnutí obvodů a po připojení napájení začíná program od počáteční inicializace.

V případě použití TRM-433-LT modulu program obsahuje hlavní program a 4 podprogramy. Podprogram při přerušení, který přeruší nebo zapne úsporný režim jednotky, pro přečtení dat ze senzoru, pro inicializaci USART modulu a pro odeslání dat k vysílacímu modulu. Vysílání probíhá po 8 bitových rámcích, kde každý rámec je chráněn lichým paritním bitem, rychlostí 2500 bitů za sekundu. Celá zpráva obsahuje 6 osmibitových rámců, úvodní sekvence 0xAA označující zprávu, 2x 8 bitů teploty, 2x 8bitů vlhkosti a kontrolní součet pro ověření správnosti přenosu.

V případě použití RN2483 modulu program obsahuje hlavní program a 5 podprogramů. Podprogram při přerušení, pro přečtení dat ze senzoru, pro inicializaci USART modulu, pro nastavení RN2483 modulu a pro odeslání dat k modulu. Zpráva je vysílána v hexadecimální reprezentaci hodnot s úvodní sekvencí 0x0F, 4 hexadecimálními čísly reprezentující teplotu, 4 hexadecimálními čísly reprezentující vlhkost a 2 hexadecimální čísla kontrolního součtu.

### 2.3.2 Přijímací jednotka

Při připojení napájení mikrokontrolér nastaví periferie a čeká na přijetí dat z vysílací jednotky. Po příjmu dat zkontroluje správnost hodnot pomocí kontrolního součtu přijatého a spočteného z užitečných dat. Následně zkontroluje, jestli je doba mezi příjmy dat delší než nastavená, aby nedocházelo k příjmu dat vlivem odrazů od předmětů a zobrazení nesprávných hodnot. Přijátá data následně zobrazí na LCD displeji a čeká na další příjem dat.



**Obrázek 2.11** Vývojový diagram algoritmu přijímací jednotky

Vývojový diagram přijímací jednotky na obrázku 2.11 znázorňuje průběh programu. Program napsaný v jazyce C je uveden na příloženém CD. Program se skládá z inicializace mikrokontroléru a periferií, přerušení při příjmu dat, kontroly správnosti a doby přenosu a zobrazení hodnot, v případě jednotky s RN2483 modulem i k uložení přijatých dat na paměťovou kartu. Přerušení generované při příjmu dat zajistí okamžité vyčtení a uložení hodnot do příslušných proměnných.

Program mikrokontroléru přijímací jednotky s TRM-433-LT modulem obsahuje hlavní program a 4 podprogramy. Podprogram při přerušení a příjmu dat, při přerušení čítačem každou vteřinu, pro inicializaci USART modulu a pro zobrazení přijatých dat. Synchronizační posloupnost 0xAA udává začátek zprávy, po které následuje 32 bitů užitečných dat a 8 bitů kontrolního součtu. Po správném přečtení dat zobrazí nové hodnoty na displeji včetně času mezi příjmy.

Mikrokontrolér přijímací jednotky s RN2483 modulem obsahuje program s hlavním programem a 7 podprogramy. Podprogram při přerušení a příjmu dat, při přerušení čítačem každou vteřinu, pro inicializaci USART, RN2483 modulu, pro inicializaci microSD karty, pro zobrazení přijatých dat a pro uložení přijatých dat na paměťovou kartu. Úvodní sekvence 0x0F označuje zprávu odeslanou vysílací jednotkou, po které následuje 8 hexadecimálních čísel užitečných dat a 2 čísla kontrolního součtu. Po správném přečtení dat zobrazí nové hodnoty na displeji včetně času mezi příjmy a uloží data na paměťovou kartu (je-li připojena).

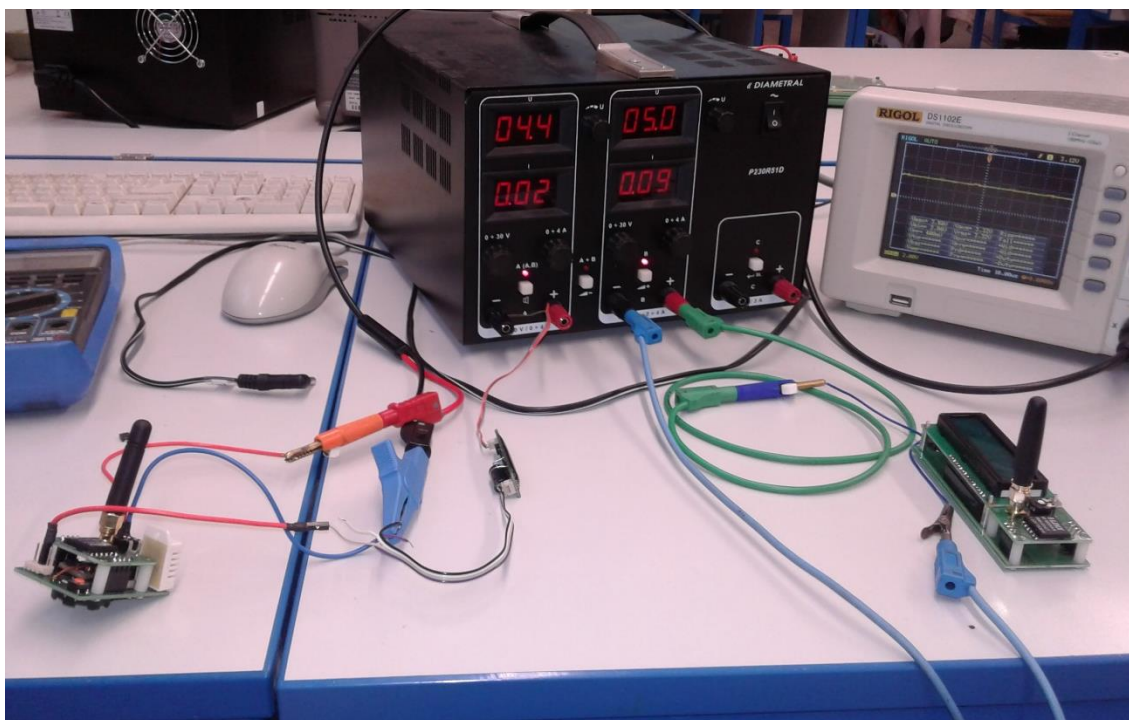
Pro programování komunikace s LCD je aplikována knihovna HD44780U LCD library (lcd.c a lcd.h) od autora Peter Fleury a pro ukládání dat na paměťovou kartu FatFs – Generic FAT Filesystem Module (diskio.c, diskio.h, ff.c, ff.h, ffconf.h a integer.h) od autora ChaN.

## 3. Testování jednotek

Pro ověření funkčnosti byl před návrhem modulů postaven testovací obvod s vývojovým kitem Arduino UNO a univerzální deskou bez použití energy harvesting modulu. Po ověření vhodnosti zapojení a funkčnosti programu testovacího zapojení následoval návrh DPS jednotek a jejich výroba.

### 3.1 Vysílací a přijímací jednotka s TRM-433-LT modulem

Po výrobě a osazení jednotek následovalo měření spolehlivosti a parametrů při napájení z externího zdroje napájení. Při tomto provozu byla měřena spotřeba jednotek a spolehlivost přenosu na krátkou vzdálenost.



**Obrázek 3.1** Testování parametrů a spolehlivosti s externím zdrojem napájení

Testovací zapojení zobrazené na obrázku 3.1 sloužilo pro měření spotřeby a zvlnění DC/DC měniče.

Spotřeba při vysílání činila 12 mA při maximálním vysílacím výkonu, 9 mA při minimálním vysílacím výkonu a při režimu spánku 70 – 60  $\mu$ A. Účinnost měniče se pohybovala v rozmezí 79 – 85 % při rozsahu napájecího napětí 1,8 – 5 V s maximálním zvlněním výstupního napětí 0,448 V, které je uvedeno na obrázku 3.2a. Nejvyšší hodnota zvlnění výstupního napětí dosahovala při napájení konstantním napětím 3,3 V. Vysoká hodnota zvlnění se pravděpodobně vyskytla při přepínání boost / buck módu.

Následovalo měření při napájení pomocí energy harvesting modulu. Jako zdroj energie sloužil laboratorní zdroj s nastavitelným výstupním napětím a proudovou ochranou se sériovým 1 k $\Omega$  rezistorem. Při napájení pomocí EH modulu kleslo zvlnění DC/DC měniče na maximální hodnotu 0,32 V, jelikož napětí nebylo konstantní, ale lineárně klesající.



Pro měření vzdálenosti bylo vybráno místo s minimální rušením a vysílači pracující na shodném kmitočtu jako TRM-433-LT modul. Dosažené výsledky jsou uvedeny v tabulce 3.1 i s průměrnou hodnotou měření. Měření probíhalo na přímou viditelnost a vzdálenosti byly zaokrouhlovány na desetinu metru. Průměrná vzdálenost při použití maximálního vysílacího výkonu dosahovala hodnoty 32,9 m a při minimálním výkonu 5,4 m.

**Tabulka 3.1** Měření vzdáleností mezi vysílací a přijímací jednotkou

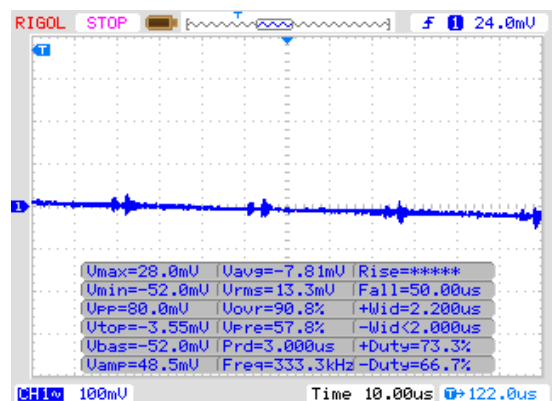
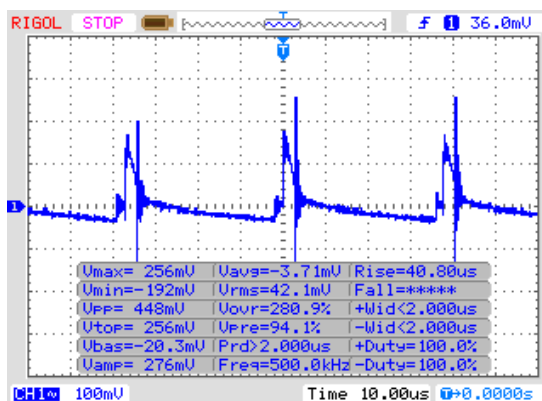
Maximální vysílací výkon	
Číslo měření	Vzdálenost l
1	33,1
2	31,5
3	34,4
4	32,2
5	33,5
Průměr	32,9

Minimální vysílací výkon	
Číslo měření	Vzdálenost l
1	7,6
2	3,1
3	5,5
4	6,4
5	4,2
Průměr	5,4

### 3.2 Vysílací a přijímací jednotka s RN2483 modulem

Testování a měření jednotek s RN2483 modulem probíhalo shodně s předchozím. Nejprve bylo měřeno zapojení při napájení z laboratorního zdroje.

Spotřeba vysílací jednotky během vysílání byla 28 mA a při režimu spánku 0,1 – 0,08 mA. Změřená účinnost měniče byla nižší, než v případě LTC3531-3.3. Pohybovala se okolo 75 – 80 % při plném rozsahu napájecího napětí. Snížila se i maximální hodnota zvlnění. Porovnání výstupů DC/DC měničů je uvedeno na obrázku 3.2.



**Obrázek 3.2 a)** DC/DC měnič LTC3531-3.3

**b)** DC/DC měnič LTC3530

Porovnání průběhů při maximálním zvlnění výstupního napětí DC/DC měničů zobrazených na obrázcích 3.2a a 3.2b ukazuje vysoké zvlnění v případě LTC3531-3.3, které je téměř šestinásobné vůči měniči LTC3530. Nejvyšší hodnota zvlnění výstupního napětí 0,08 V měniče LTC3530 opět dosahovala při napájení konstantním napětím 3,3 V, kdy dochází k přepínání boost / buck módu. Při napájení z EH modulu se hodnota zvlnění snížila na 0,05 V. Tato hodnota je více než šestkrát nižší než u předchozího typu měniče.

### 3. Testování jednotek

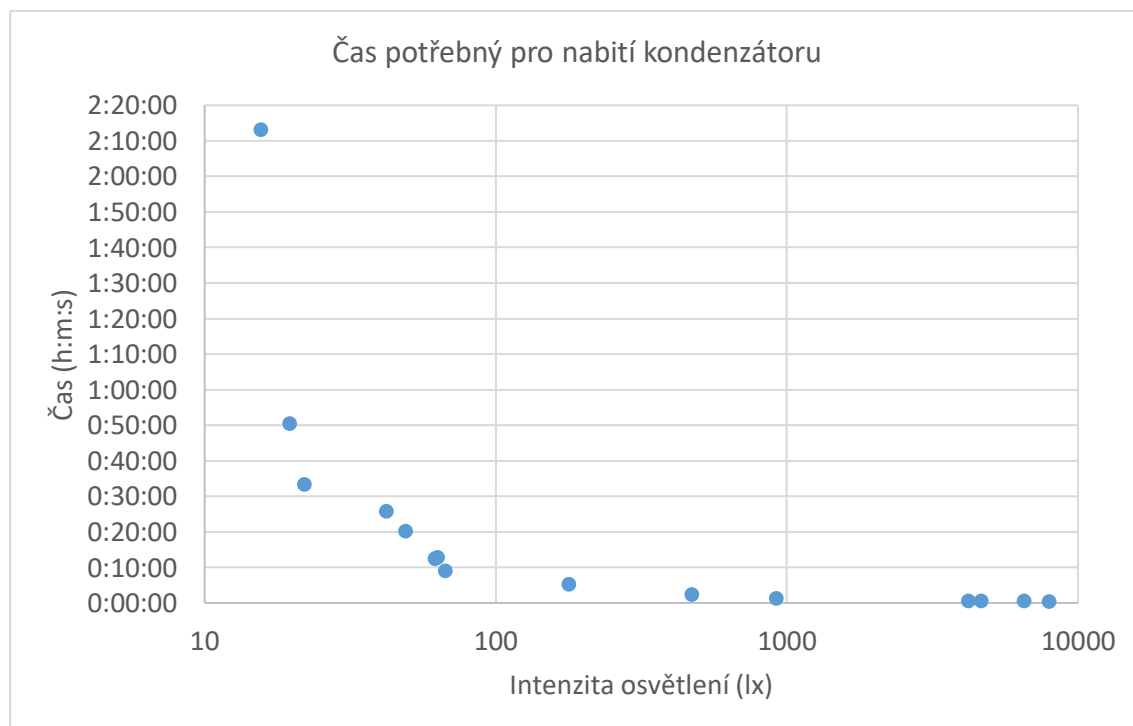
Vzdálenost byla měřena na místě s minimálním rušením a vysílači pracující na shodném kmitočtu 868 MHz. Parametry přenosu byly kmitočet 868,1 MHz, spread factor 12, kódovací rychlost 4/5 a šířka pásma 125 kHz s použitím CRC kódu. Přijímač byl umístěn na GPS souřadnicích 50.6724494N, 14.9891192E. Maximální dosah byl měřen při spolehlivosti 90 % a při poloze vysílače 50.6817264N, 14.9847472E a 50.6628189N, 14.9934322E. Vzdálenost mezi těmito body je 1,077 km a 1,112km (uvedeno v příloze XVI. *Zobrazení GPS souřadnic RN2483 jednotek včetně výškového profilu dráhy*). V případě přímé viditelnosti by byla vzdálenost větší.

### 3.3 Měření energy harvesting modulu EH300

Pro testování modulu EH300 byl použit tenkovrstvý amorfni solární článek od firmy SOLEMS o velikosti 25 x 25 mm. Tato technologie se vyznačuje nízkým množstvím použitého křemíku a dobrou účinností při nízké intenzitě osvětlení. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.2 a grafu 3.1. Měření bylo prováděno od 15,6 lx (velmi tmavá místnost) do 7 950 lx (přímý sluneční svit). Doba mezi nabitím kondenzátoru (vysláním dat) se pohybovala od 7 991 s po 28 s podle intenzity osvětlení. Průměrně osvětlené místnosti odpovídá 400 až 600 lx. Při tomto osvětlení trvá nabití kondenzátoru cca 1,5 až 2,5 minuty.

**Tabulka 3.2** Čas potřebný pro nabití kondenzátoru

Intenzita osvětlení	Čas	Intenzita osvětlení	Čas	Intenzita osvětlení	Čas
15,6	2:13:11	61,7	0:12:26	920	0:01:14
19,5	0:50:27	63	0:12:45	4200	0:00:30
22	0:33:21	67	0:09:03	4650	0:00:31
42	0:25:44	178	0:05:11	6530	0:00:29
49	0:20:10	470	0:02:23	7950	0:00:28



**Graf 3.1** Čas potřebný pro nabití kondenzátoru

## 4. Návrh dalších vylepšení

Během testování jednotek se vyskytl největší problém se senzorem MaxDetect RHT03. Tento senzor potřeboval dlouhou dobu, než bylo možné data vyčíst, a tím znemožňoval funkci vysílací jednotky pouze pomocí energy harvesting modulu. V další revizi zařízení by bylo vhodné použít jiný typ senzoru, který lze vyčíst okamžitě po připojení napájení (například teplotní senzor LM335).

Možným zlepšením vysílací vzdálenosti jednotek s TRM-433-LT modulem je použití DC/DC měniče s menším výstupním zvlněním a připojení modulu k napájecímu napětí pomocí tranzistoru ovládaným mikrokontrolérem. Pokud je modul napájen z výstupu mikrokontroléru, může docházet k nepokrytí napájecích špiček, a tím ke snížení vysílacího výkonu a snížení vzdálenosti mezi vysílací a přijímací jednotkou. Dále by bylo příhodné, aby bylo možné ovládat napájení z baterie pomocí tranzistoru, který by spínal baterii (vyměnit diodu za tranzistor řízený mikrokontrolérem) u vysílací jednotky a připojení paměťové karty pro uložení přijatých dat u přijímací jednotky. V případě vysílací jednotky s RN2483 modulem byly tyto nedostatky odstraněny.

Vysílací jednotku s RN2483 modulem by bylo vhodné upravit, aby bylo možné vysílat data bez připojené baterie. Kvůli vyšší spotřebě a delší době vysílání nedokáže energy harvesting dodat dostatečné množství energie. Pro snížení nároků na množství energie je možné použít modul s nižší spotřebou nebo modul s kratší dobou zpracování a vyslání dat. Dalším možným zlepšením je použít energy harvesting s vyšší kapacitou (dle výpočtu alespoň 40 mF) a větším zdrojem energie kvůli zachování shodné doby mezi odesláním dat.

V budoucnu by bylo možné připojit LoRa vysílač a přijímač k síti LoRaWAN provozovanou Českými Radiokomunikacemi, a tím prodloužit dosah oproti komunikaci vysílač – přijímač.

## Závěr

Tato práce se zabývá studiem energy harvesting technologie a návrhem systému pracující s touto technologií. Výsledkem projektu jsou dva systémy skládající se z vysílací jednotky pracující na technologii sběru energie a přijímací jednotky. Systémy obsahují zdroj dat (senzor), vysílače naměřených dat a přijímače se zobrazením a uložením naměřených hodnot. Každý systém využívá jiný typ komunikace.

Před návrhem jednotek proběhlo sestavení zařízení pomocí vývojových kitů a ověření funkčnosti zapojení a programu. Následoval návrh DPS jednotek, jejich výroba, osazení, kontrola funkčnosti a měření základních parametrů. Finálním produktem je vysílací jednotka se senzorem, vysílacím modulem a širokým rozpětím napájecího napětí a přijímací jednotka s přijímacím modulem a LCD displejem pro zobrazení naměřených hodnot. Jednotky mezi sebou komunikují pomocí OOK modulace na kmitočtu 433 MHz v případě prvního systému nebo využívají přenos pomocí technologie LoRa a kmitočtu 868 MHz.

Testování prokázalo, že systém využívající OOK modulaci je schopen pracovat při napájení pouze z energy harvesting modulu, jelikož TRM-433-LT modul má malou spotřebu a data jsou vysílána okamžitě. Nižší nároky na spotřebu ale snižují celkový dosah. Maximální vzdálenost mezi vysílací a přijímací jednotkou se pohybuje okolo 33 m v případě použití maximálního vysílacího výkonu.

Systém využívající technologii LoRa není schopen pracovat bez využití sekundárního zdroje energie, jelikož spotřeba energie RN2483 modulu je vyšší, než v případě TRM-433-LT a také je nutná delší doba pro přípravu a odeslání dat. Pro správnou funkci vysílací jednotky by byl potřeba energy harvesting modul s alespoň 40x vyšší kapacitou kondenzátoru než testovaný modul EH300. Vyšší nároky na napájení ale prodlužují dosah systému. Maximální vzdálenost mezi jednotkami je přes 1000 m v kopcovitém terénu.

Měření doby nabití energy harvesting modulu EH300 probíhalo s použitím tenkovrstvého amorfního solárního článku od firmy SOLEMS, který je vhodný pro umělé osvětlení. V případě průměrně osvětlené místnosti bude nabíjení kondenzátoru trvat 1,5 až 2,5 minuty.

Během osazování vysílací jednotky využívající OOK modulaci došlo k potíži s osazením DC/DC měniče, jelikož pouzdro měniče DFN 3x3 je při ručním osazením velice obtížné osadit, a proto byl měnič osazen na zvláštní DPS, která byla připojena pomocí vodičů. V případě jednotky s LoRa je použit dostupnější DC/DC měnič v pouzdře MSOP-10, které je vhodnější pro ruční osazování.

Při zpracování projektu byly prohloubeny mé znalosti v oblasti přenosu dat pomocí rádiových vln, energy harvesting technologie, zdokonaleny schopnosti programovat mikrokontrolery Atmega328 včetně použití 1-wire a SPI sběrnice. Při návrhu modulů byl použit software pro návrh schémat zapojení a desek plošných spojů Eagle od firmy CadSoft Computer a program pro psaní programů ATMEL Studio 7.0 od firmy ATMEL.

Po odstranění problémů během testování a výroby jednotek jsou tyto systémy plně funkční a lze je použít s téměř jakýmkoliv vhodným zdrojem energie.

---

## Použitá literatura

- [1] B. Doc. Ing. Garlík CSc., „ELEKTROTECHNIKA A INTELIGENTNÍ BUDOVY,“ 31 Srpen 2014. [Online]. Available: <http://tzb2.fsv.cvut.cz/vyucujici/16/oppa/skripta-etb-garlik.pdf>. [Přístup získán 12 Březen 2018].
- [2] B. Doc. Ing. Garlík CSc., Inteligentní budovy, Praha: BEN - technická literatura, 2012.
- [3] „Understanding Power Requirements in RS-232 Applications,“ Duben 2013. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/snla037b/snla037b.pdf>. [Přístup získán 13 Březen 2018].
- [4] J. Goldie, „National Semiconductor,“ Únor 2002. [Online]. Available: <http://www.national.com/an/AN/AN-759.pdf>. [Přístup získán 16 březen 2018].
- [5] K. Dudáček, „Západočeská univerzita v Plzni,“ 2002. [Online]. Available: [http://home.zcu.cz/~dudacek/NMS/Seriova\\_rozhrani.pdf](http://home.zcu.cz/~dudacek/NMS/Seriova_rozhrani.pdf). [Přístup získán 15 Březen 2018].
- [6] V. Doc. Ing. Žalud CSc., „Číselný návrh rádiového komunikačního systému,“ Katedra radioelektroniky, FEL, ČVUT v Praze, 20. Listopad 2015. [Online]. Available: [http://www.konferadio.cz/files/prezentace/Zalud\\_Navrh-digitalniho-radioveho-spoje.pdf](http://www.konferadio.cz/files/prezentace/Zalud_Navrh-digitalniho-radioveho-spoje.pdf). [Přístup získán 18 Únor 2018].
- [7] „VYUŽITÍ RÁDIOVÉHO SPEKTRA,“ 23 Leden 2018. [Online]. Available: <http://spektrum.ctu.cz/>. [Přístup získán 16 Březen 2018].
- [8] J. Ing. Vodrážka Ph.D., Přenosové systémy v přístupové síti, Praha: ČVUT v Praze, 2006.
- [9] F. Dr. Saleh, „RADIO FREQUENCY MODULATION,“ TechnicaCuriosa, 8 Březen 2017. [Online]. Available: <https://popularelectronics.technicacuriosa.com/2017/03/08/radio-frequency-modulation-made-easy/>. [Přístup získán 20 Březen 2018].
- [10] „Comparing Low-Power Wireless Technologies,“ 26 Říjen 2017. [Online]. Available: <https://www.digikey.be/en/articles/techzone/2017/oct/comparing-low-power-wireless-technologies>. [Přístup získán 19 Březen 2018].

- [11] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen a W. M. Townsley, „A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things,“ 20 Květen 2016. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1466>. [Přístup získán 22 Únor 2018].
- [12] V. Ing. Janíček Ph.D., „DÁLKOVÉ OVLÁDÁNÍ APLIKACÍ,“ [Online]. Available: <https://moodle.fel.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=56443>. [Přístup získán 23 Březen 2018].
- [13] „RN2483 LoRa Technology Module Command Reference User’s Guide,“ 2017. [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001784B.pdf>. [Přístup získán 21 Únor 2018].
- [14] D. Briand, E. Yeatman and S. Roundy, Micro Energy Harvesting, Weinheim: Wiley-VCH, 2015.
- [15] Y. K. Tan, SUSTAINABLE ENERGY HARVESTING TECHNOLOGIES - PAST, PRESENT AND FUTURE, Rijeka: InTech, 2011.
- [16] „Energy Harvesting Forum,“ 2012. [Online]. Available: <http://energyharvesting.net/>.
- [17] A. Kingatua, „The How and Why of Energy Harvesting for Low-Power Applications,“ 23 June 2016. [Online]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-why-of-energy-harvesting-for-low-power-applications/>.
- [18] „Integrating Energy Harvesting and Future Wireless Modules,“ 30 08 2016. [Online]. Available: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2016/aug/integrating-energy-harvesting-future-wireless-modules>.
- [19] „Advanced Linear Devices EH300,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.aldinc.com/pdf/EH300.pdf>. [Přístup získán 18 10 2017].
- [20] „Energy Harvesting Technologies (PV only),“ [Online]. Available: <https://www.energyharvestingjournal.com/tag/146/energy-harvesting-technologies-pv-only>.
- [21] C. Glaser, „How to harvest energy with nano-power DC/DC solutions,“ 10 June 2016. [Online]. Available: <https://training.ti.com/how-harvest-energy-nano-power-dcdc-solutions?cu=1127843&keyMatch=energy%20harvest&tisearch=Search-EN-Everything>.

- 
- [22] „ATmega328/P DATASHEET COMPLETE,“ Atmel Corporation, 2016. [Online]. Available: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf). [Přístup získán 12 26 2017].
- [23] T. Liu, „MaxDetect RHT03,“ [Online]. Available: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Weather/RHT03.pdf>. [Přístup získán 25 11 2017].
- [24] „Raystar Optotronics,“ 19 12 2014. [Online]. Available: <https://www.tme.eu/cz/Document/05c9747b38f9036da277149b2bb38eec/RC1602B-BIY-CSVD.pdf>. [Přístup získán 30 10 2017].
- [25] „Linear Technologi LTC3531/LTC3531-3.3/LTC3531-3,“ 2006. [Online]. Available: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3531fb.pdf>. [Přístup získán 1 12 2017].
- [26] „LTC3530 Wide Input Voltage Synchronous Buck-Boost DC/DC Converter,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3530fb.pdf>. [Přístup získán 15 Únor 2018].
- [27] „Linx technologies TRM-433-LT,“ 18 3 2015. [Online]. Available: <https://www.linxtechnologies.com/wp/wp-content/uploads/trm-fff-lt.pdf>. [Přístup získán 29 10 2017].
- [28] „RN2483 Low-Power Long Range LoRa Technology Transceiver Module,“ 2017. [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002346C.pdf>. [Přístup získán 21 Únor 2018].
- [29] „Differences between ATmega328/P and ATmega328PB,“ 2018. [Online]. Available: [https://www.pololu.com/file/0J1464/Atmel-42559-Differences-between-ATmega328P-and-ATmega328PB\\_ApplicationNote\\_AT15007.pdf](https://www.pololu.com/file/0J1464/Atmel-42559-Differences-between-ATmega328P-and-ATmega328PB_ApplicationNote_AT15007.pdf). [Přístup získán 29 Březen 2018].
- [30] L. Dhakar, Triboelectric Devices for Power Generation and Self-Powered Sensing Applications, Hardcover: Springer, 2017.

## Seznam příloh

### Tištěné

I.	Modul Advanced Linear Devices EH300 .....	50
II.	Vysílací jednotka s TRM-433-LT.....	50
III.	Přijímací jednotka s TRM-433-LT .....	50
IV.	Vysílací jednotka s RN2483.....	51
V.	Přijímací modul s RN2483 .....	51
VI.	Schéma vysílací jednotky s TRM-433-LT .....	52
VII.	Schéma přijímací jednotky s TRM-433-LT .....	53
VIII.	Schéma vysílací jednotky s RN2483 .....	54
IX.	Schéma přijímací jednotky s RN2483 .....	55
X.	Návrh DPS vysílací jednotky s TRM-433-LT.....	56
XI.	Návrh DPS přijímací jednotky s TRM-433-LT .....	57
XII.	Návrh TRM-433-LT modulu .....	58
XIII.	Návrh DPS vysílací jednotky s RN2483.....	59
XIV.	Návrh DPS přijímací jednotky s RN2483 .....	60
XV.	Návrh RN2483 modulu .....	61
XVI.	Zobrazení GPS souřadnic RN2483 jednotek.....	62



## Obsah disku

Autonomní jednotka pro sběr a odeslání sensorových dat s využitím napájení z energie okolí – kocimic1.pdf

### Program – Atmel Studio 7.2

Jednotky s RN2483 modulem

Prijimac

Vysilac

Jednotky s TRM-433-LT modulem

Prijimac

Vysilac – analogovy senzor LM335

Vysilac – RHT03

### Schema + DPS – Eagle 7.2.0

Jednotky s RN2483 modulem

prijimac

vysilac

modul

Jednotky s TRM-433-LT modulem

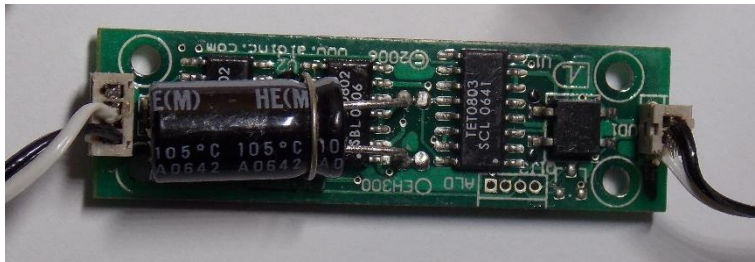
prijimac

vysilac

TRM-xxx-LT\_modul

## Přílohy

### I. Modul Advanced Linear Devices EH300



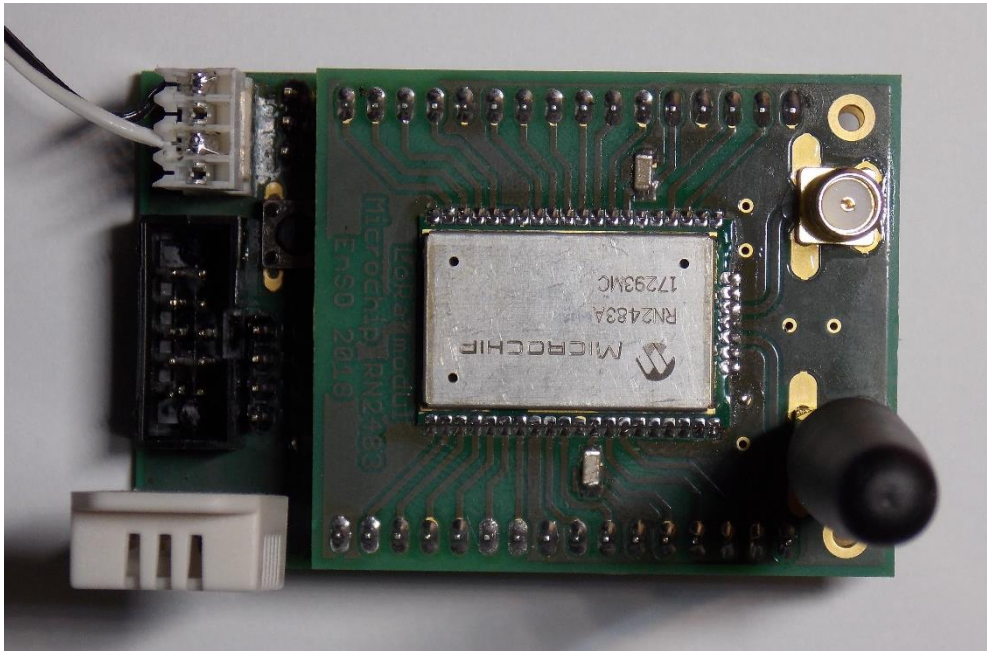
### II. Vysílací jednotka s TRM-433-LT



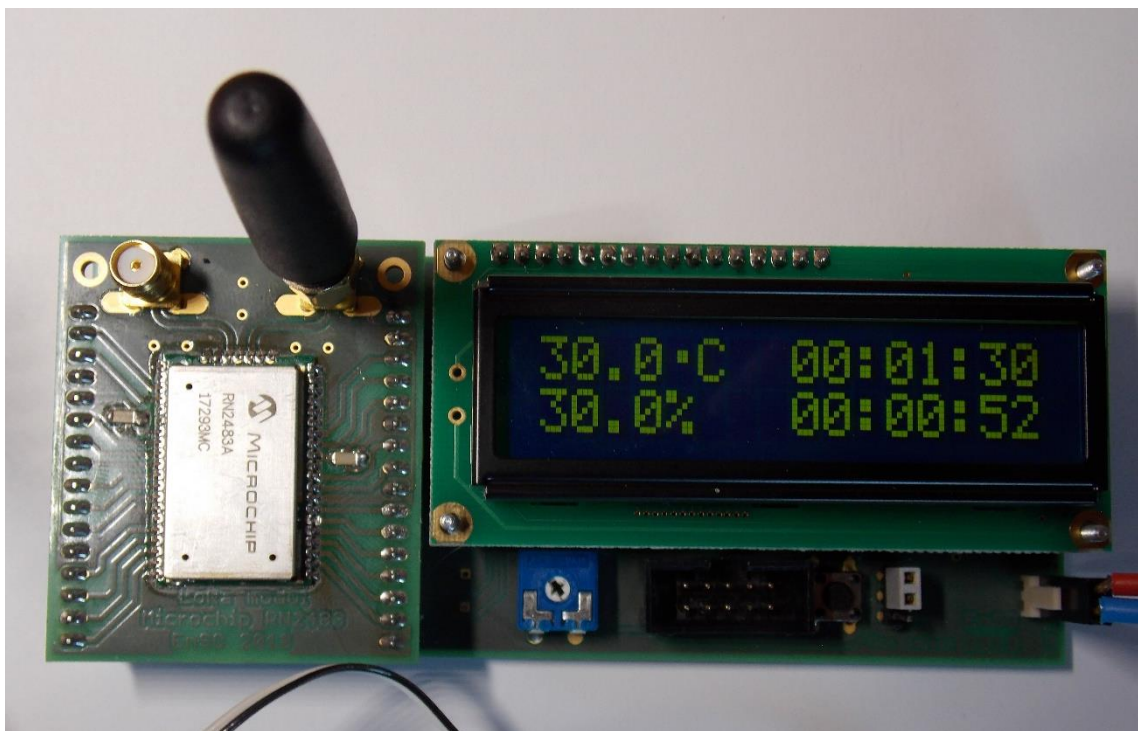
### III. Přijímací jednotka s TRM-433-LT



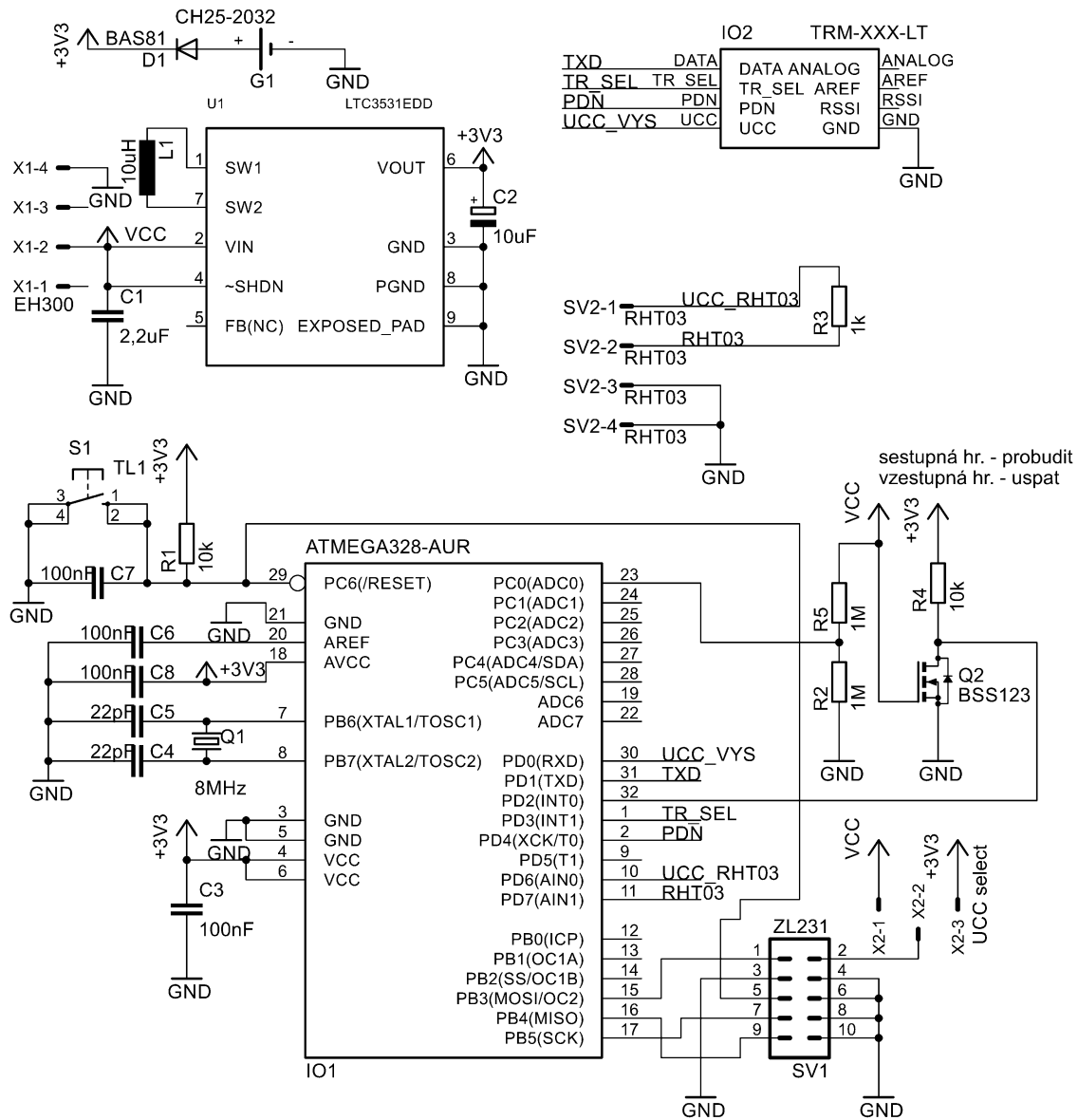
## IV. Vysílací jednotka s RN2483



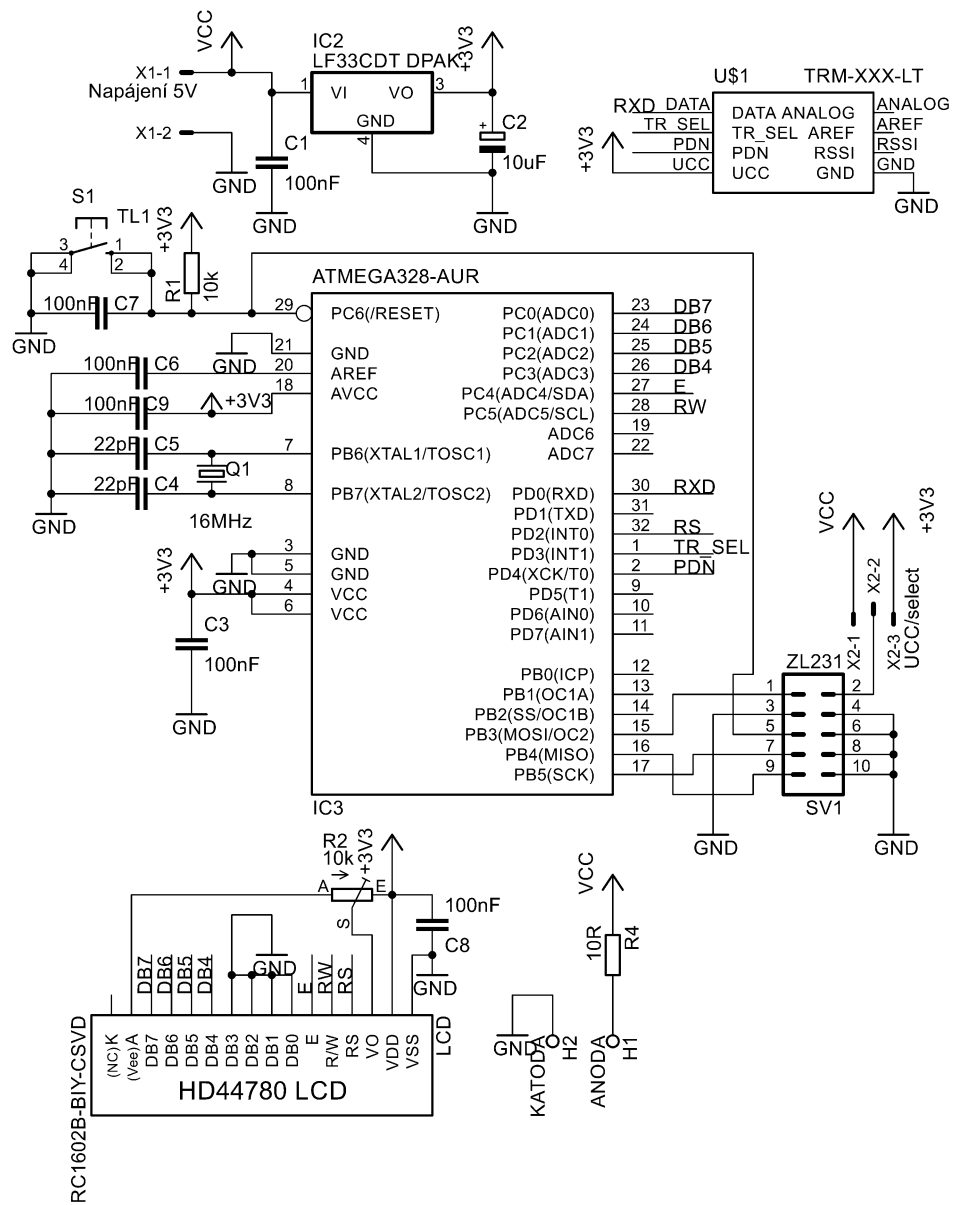
## V. Přijímací modul s RN2483



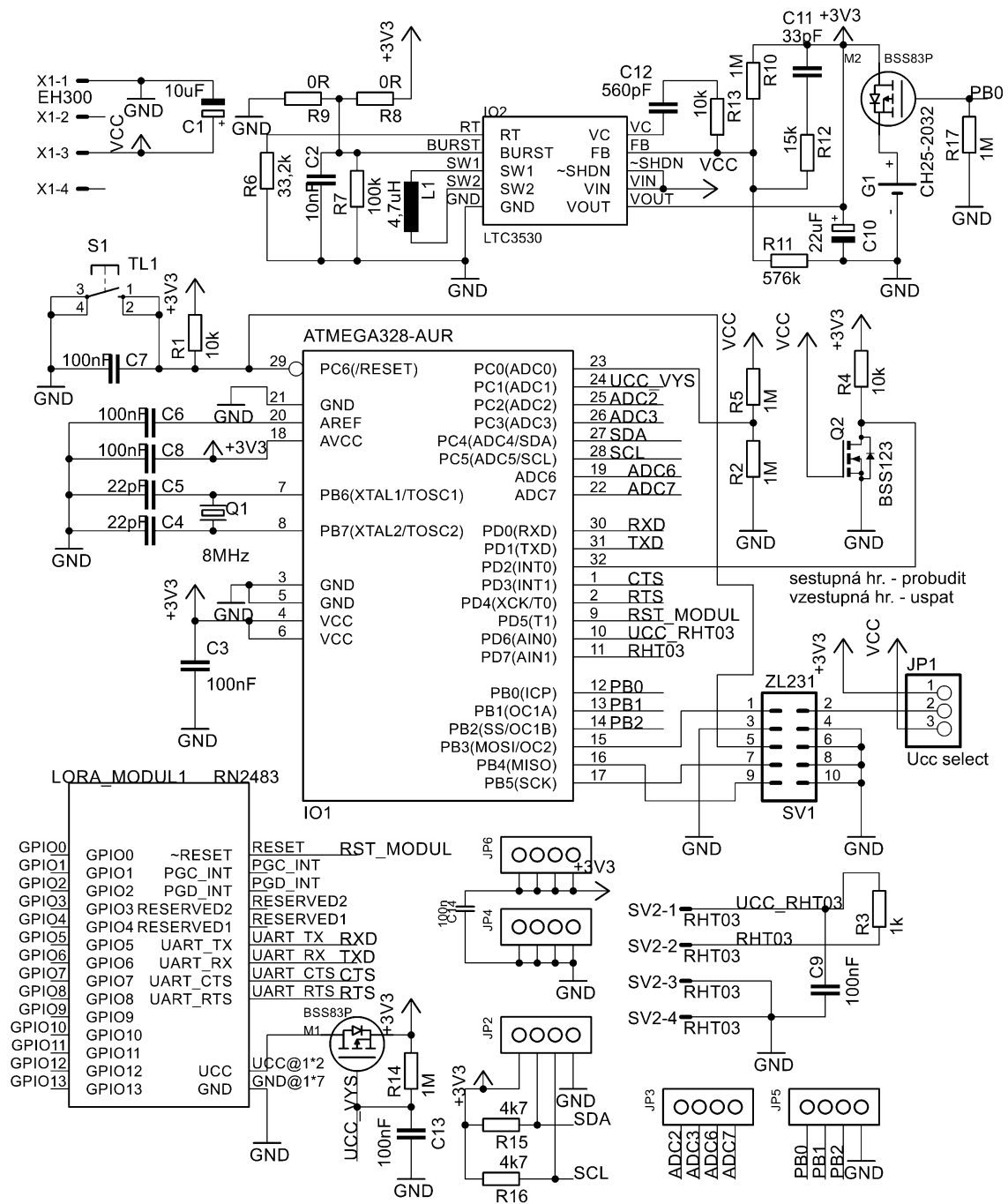
## VI. Schéma vysílací jednotky s TRM-433-LT



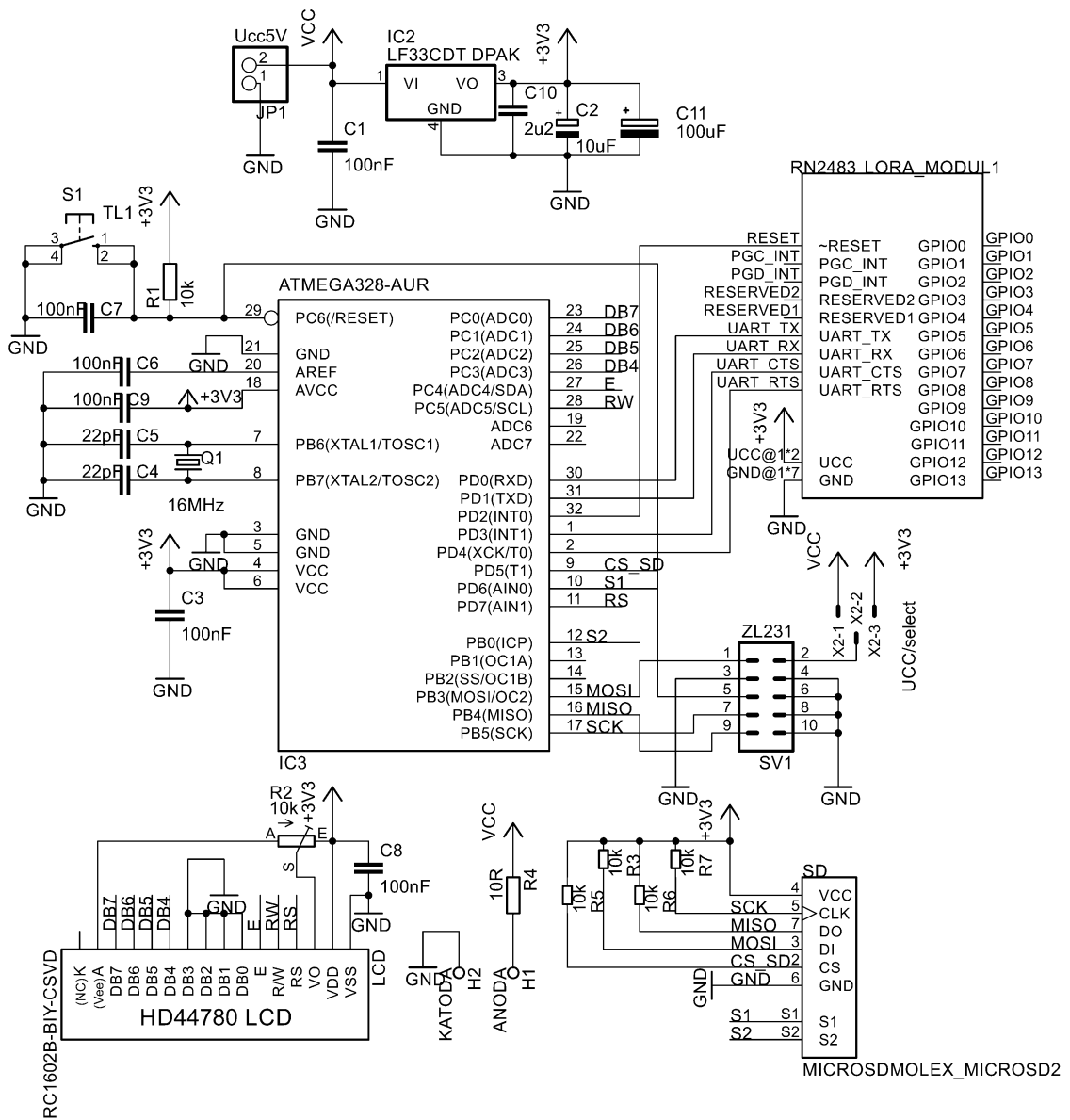
## VII. Schéma přijímací jednotky s TRM-433-LT



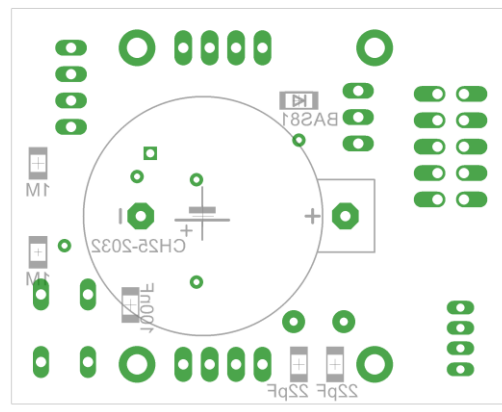
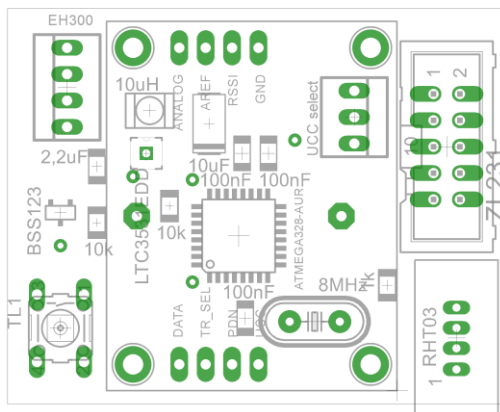
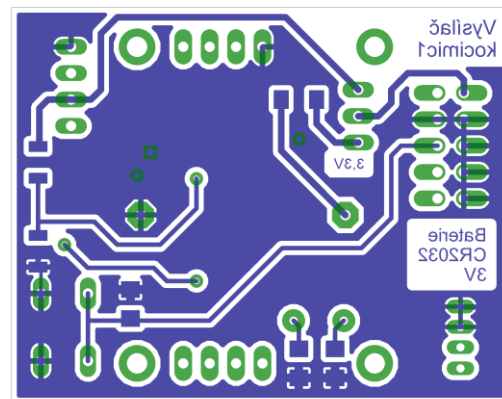
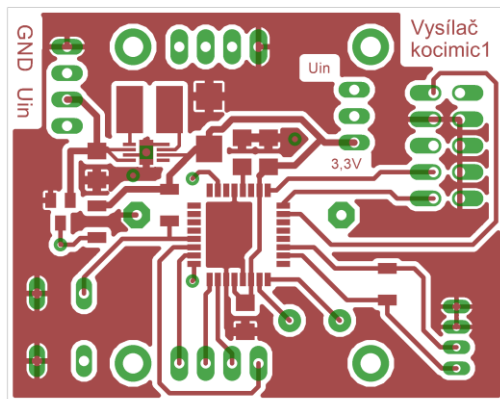
## VIII. Schéma vysílací jednotky s RN2483



## IX. Schéma přijímací jednotky s RN2483

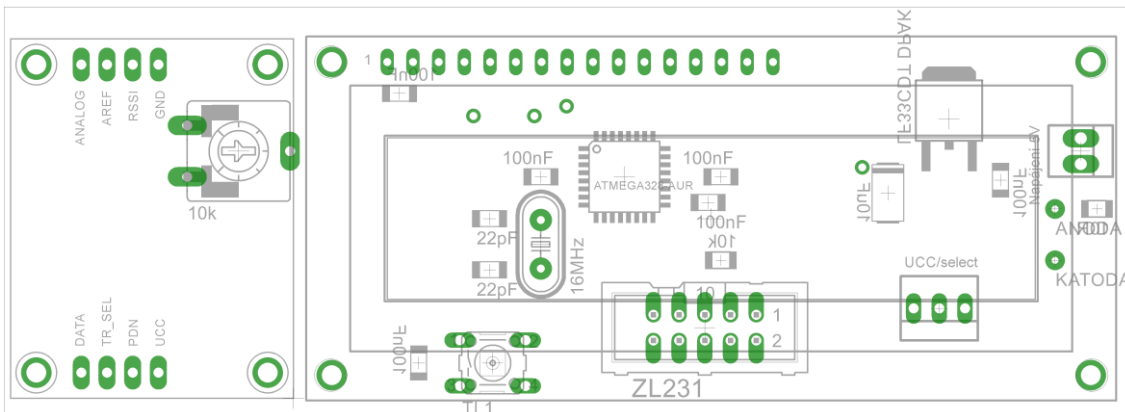
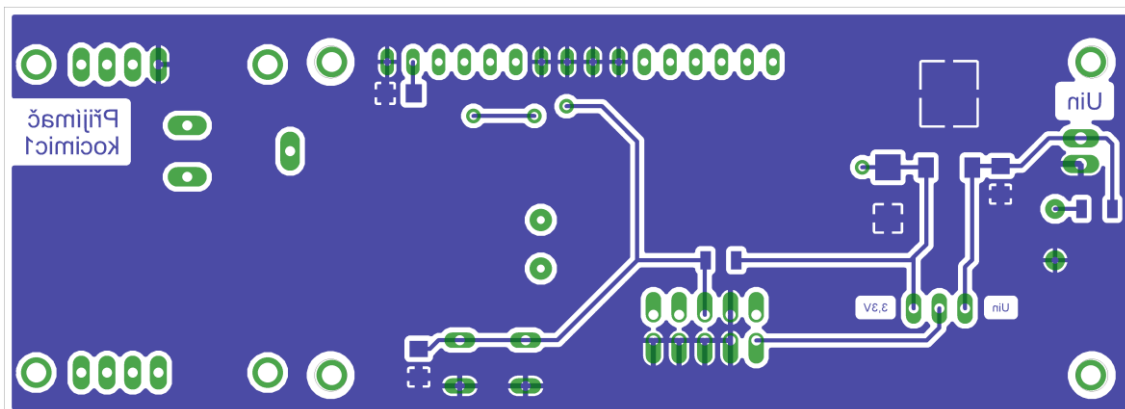
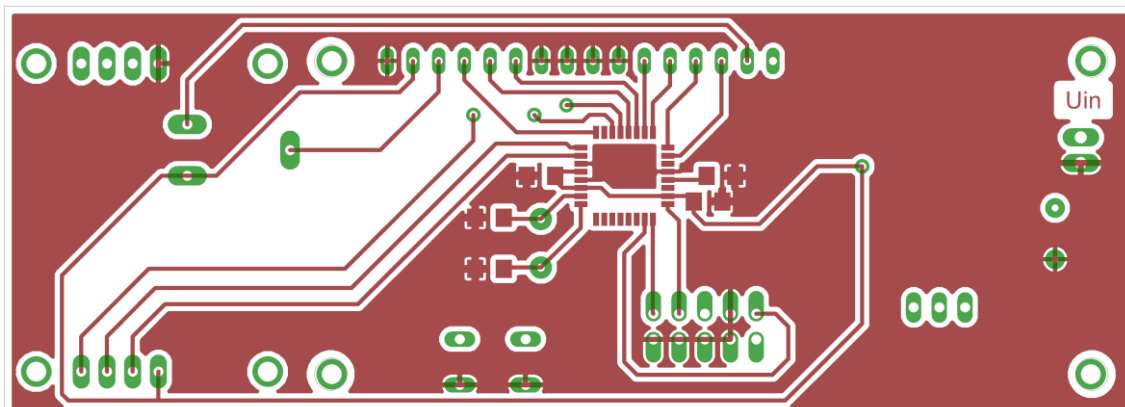


## X. Návrh DPS vysílací jednotky s TRM-433-LT



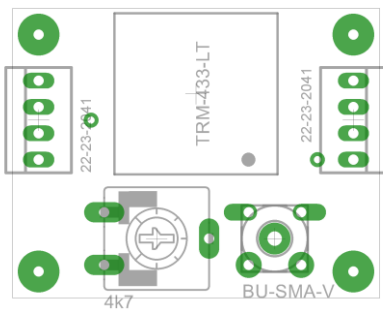
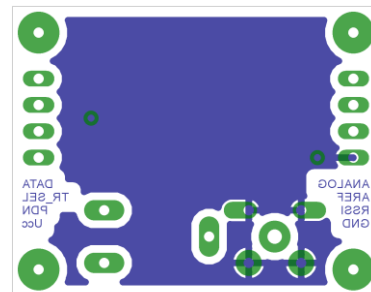
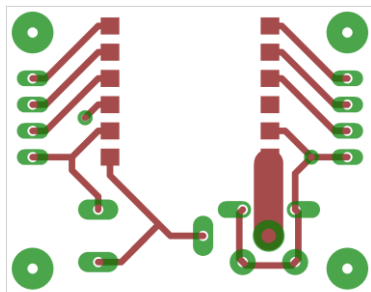
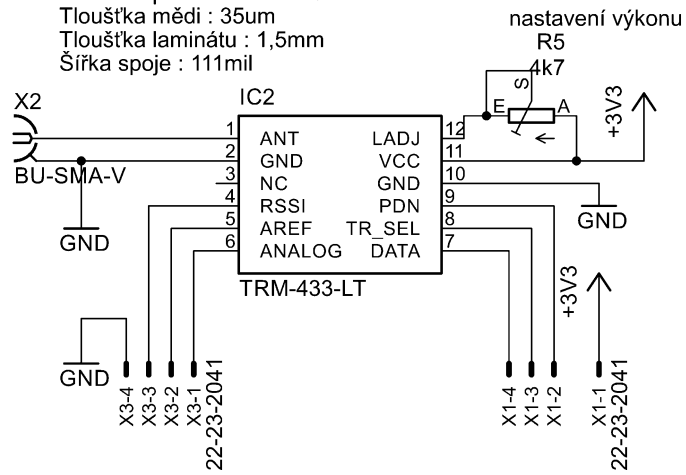


# XI. Návrh DPS přijímací jednotky s TRM-433-LT



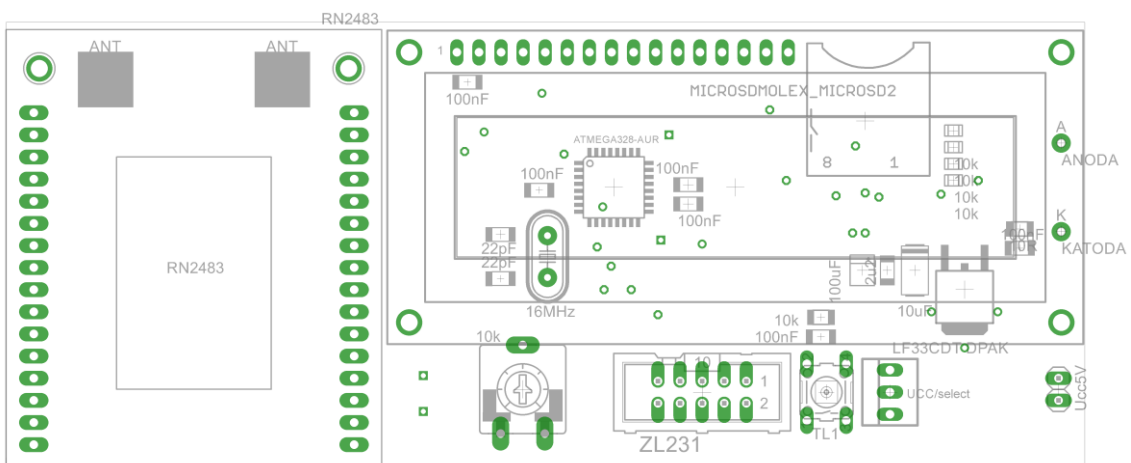
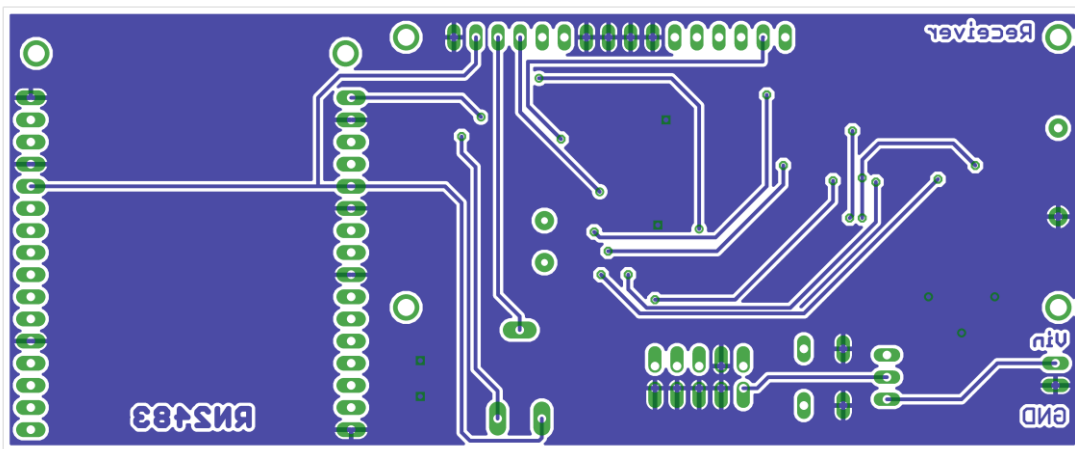
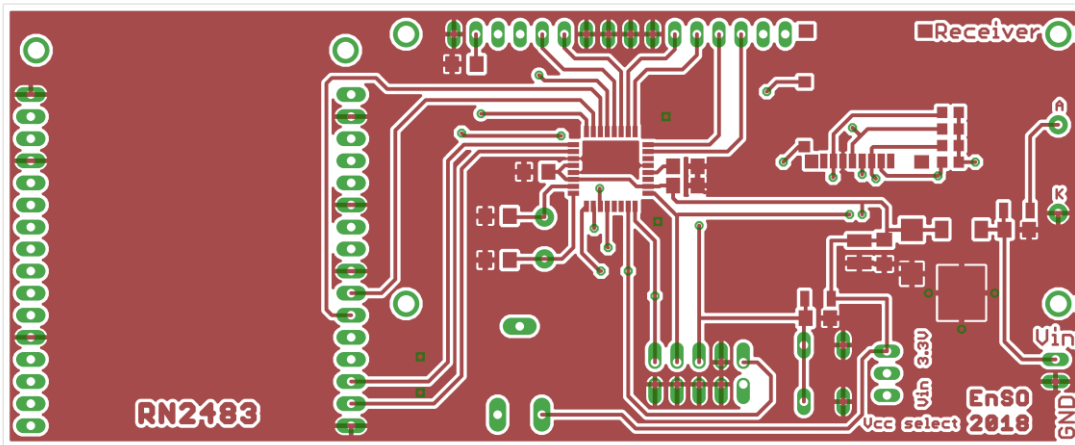
## XII. Návrh TRM-433-LT modulu

Deska FR4  
 Relativní permeabilita : 4.35  
 Tloušťka mědi : 35um  
 Tloušťka laminátu : 1,5mm  
 Šířka spoje : 111mil

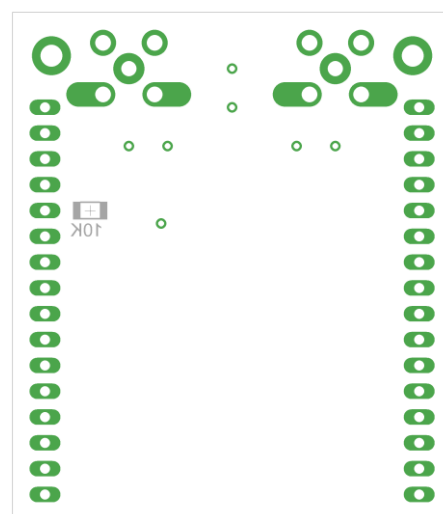
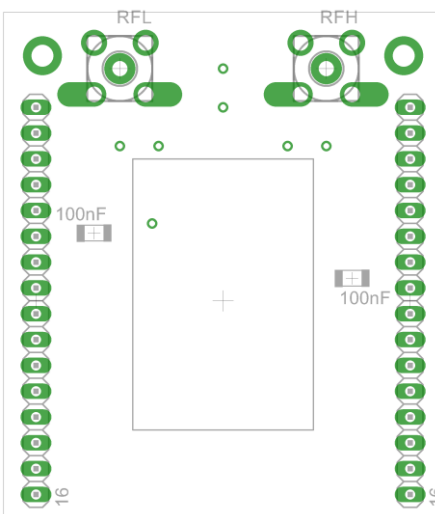
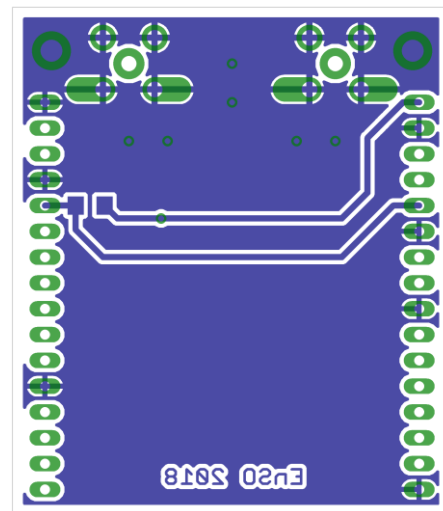
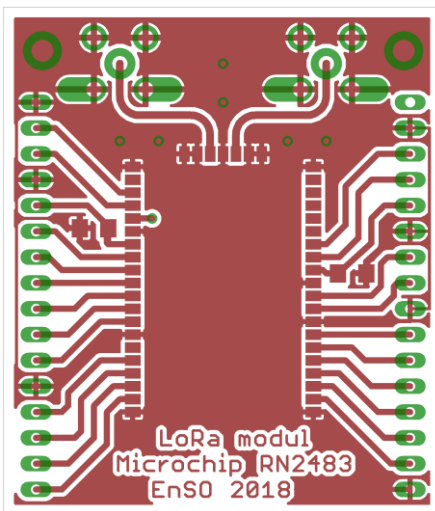
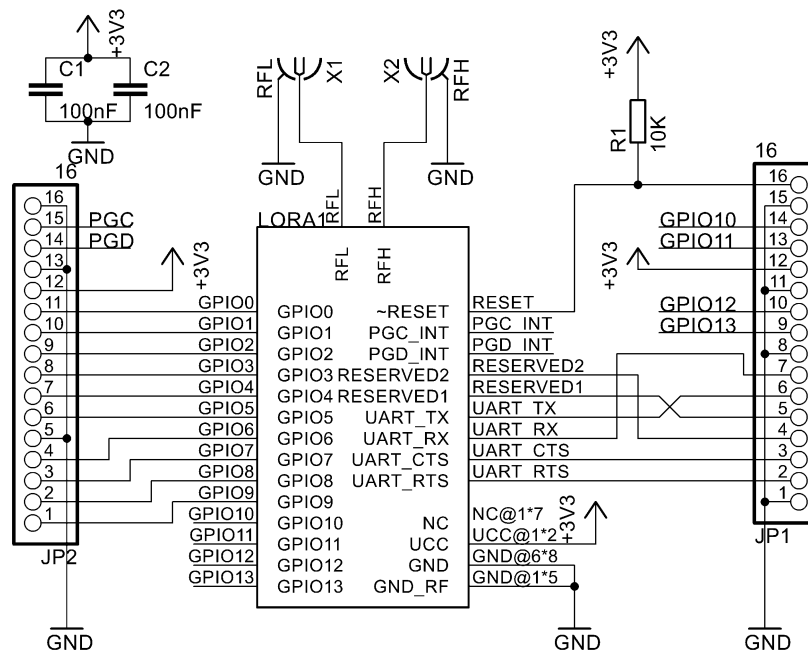




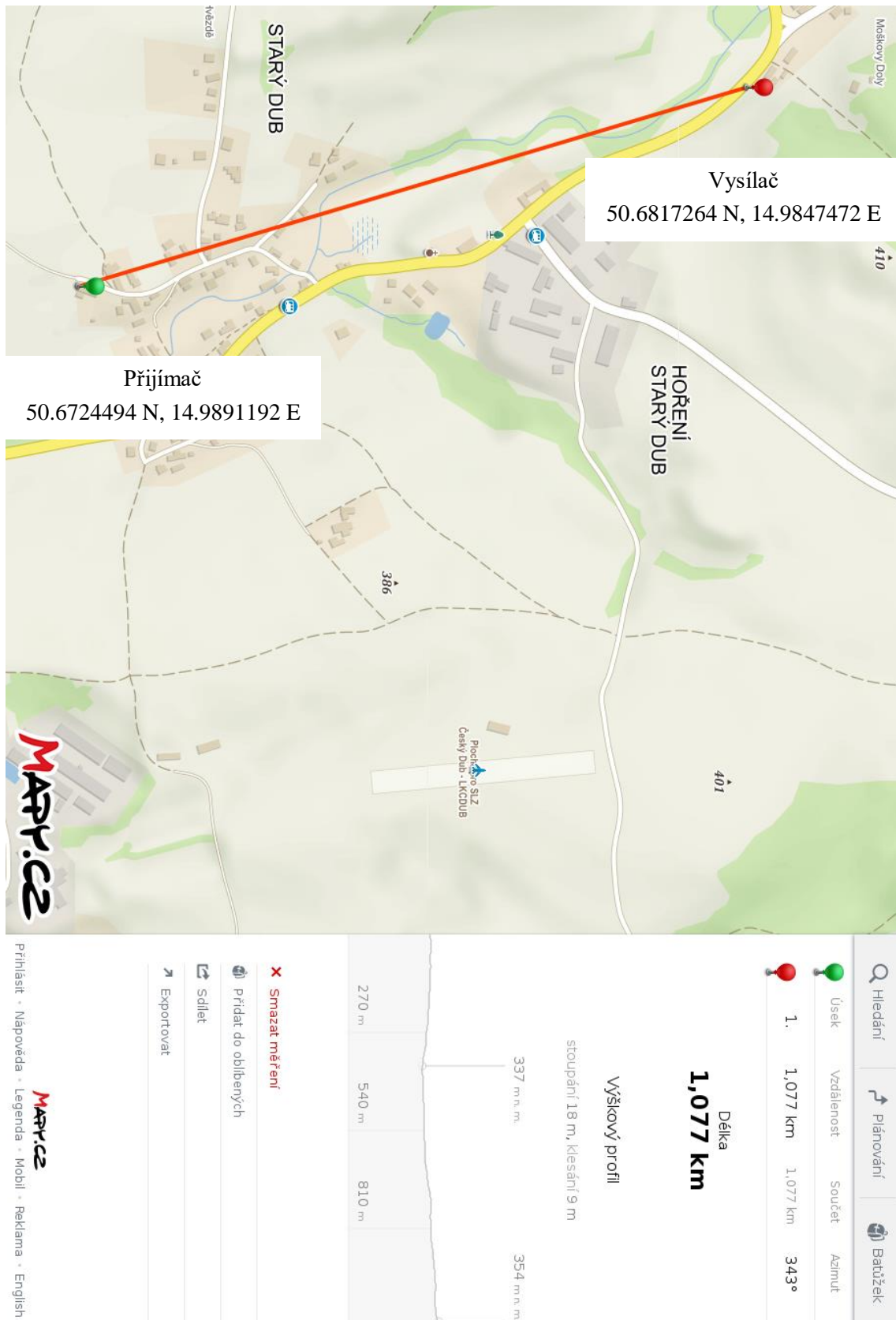
## XIV. Návrh DPS přijímací jednotky s RN2483



## XV. Návrh RN2483 modulu



## XVI. Zobrazení GPS souřadnic RN2483 jednotek





Vysílač  
50.6628189 N, 14.9934322 E

Přijímač  
50.6724494 N, 14.9891192 E

MAPY.CZ

Hledání | Plánování | Battžek

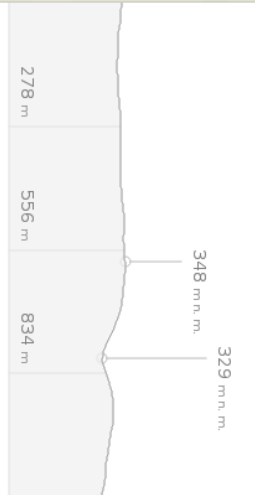
Úsek    Vzdálenost    Součet    Azimut

1.    1,112 km    1,112 km    164°

Délka  
**1,112 km**

Výškový profil

stoupání 18 m, klesání 36 m



**X Smazat měření**

Přidat do oblíbených

Sdílet

Exportovat

Přihlásit · Nápověda · Legenda · Mobil · Reklama · English

MAPY.CZ