

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky



Bezkontaktní napájení rotujícího
měřicího systému a přenos dat z něho

Contactless Supply of the Rotating
Measurement System and Transmission of Data
from It

Bakalářská práce

Autor:	Jaroslava Fiedlerová
Obor:	Aplikovaná elektronika
Studijní program:	Komunikace, multimédia a elektronika
Vedoucí práce:	Ing. Lubor Jirásek, CSc.
	Praha, 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Fiedlerová** Jméno: **Jaroslava** Osobní číslo: **456898**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Bezkontaktní napájení rotujícího měřicího systému a přenos dat z něho

Název bakalářské práce anglicky:

Contactless Supply of the Rotating Measurement System and Transmission of Data from It

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se možností bezdrátového napájení jednoduchých měřicích systémů v rotujících zařízeních a přenosu dat z nich.
2. Na základě 1) navrhnete a realizujete jednoduchou soustavu přenosu energie pro napájení rotujícího měřicího systému a navrhnete a realizujete přenos dat z tohoto systému.
3. Proveďte ověřovací měření.
4. Zhodnotte dosažené výsledky.
5. Navrhnete budoucí možná řešení.
6. Zařízení zůstane v majetku zadávajícího pracoviště.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Přednášky z teorie elmag pole. ČVUT FEL.
- [2] Brushless DC Motor Fundamentals. AN885. 2003
- [3] www.infineon.com - aplikační poznámky*
- [4] HEXFETs Designers Manual HDM-1, Vol. 1 a 2. IRF

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lubor Jirásek, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **12.02.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **08.01.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Lubor Jirásek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna 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 studentky

Poděkování

Děkuji Ing. Luborovi Jiráskovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a vstřícnost při konzultacích a vypracování této bakalářské práce.

Dále bych chtěla poděkovat své rodině za velkou podporu při celém mém studiu.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci na téma „Bezkontaktní napájení rotujícího měřicího systému a přenos dat z něho“, zpracovala samostatně, pod odborným vedením vedoucího práce.

Veškerou literaturu a informační zdroje, které jsem použila v této práci jsou řádně citovány a uvedeny v seznamu zdrojů.

V Praze, dne 8. 1. 2019

.....
Jaroslava Fiedlerová

Abstrakt

V rámci této bakalářské práce je řešen návrh a praktická realizace rotujícího měřicího systému. Během návrhu je vzhledem k rotaci nutné vyřešit dva základní úkoly: bezkontaktní napájení měřicího systému a přenos dat z něj.

První krok realizace spočíval v prostudování literatury týkající se obou zahrnutých problematik a následná volba vhodných technologií. Pro realizaci bezdrátového napájení systému byla zvolena technologie přenosu energie indukční vazbou. Pro přenos měřených dat byla zvolena technologie Bluetooth Low Energy.

Následující krok zahrnoval praktickou část práce, při níž byla vytvořena schémata zapojení a navrženy desky plošných spojů pro výsledné zařízení. Výsledné zařízení se skládá z rotující a stacionární části. Stacionární část zajišťuje rotaci, bezkontaktní napájení a testování měřicího systému. Po osazení desek a oživení systému následovalo programování Bluetooth modulů pro vzájemnou komunikaci a možnost testování.

Možnost testování funkčnosti a parametrů systému v závislosti na rotaci patří mezi hlavní cíle této bakalářské práce.

Klíčová slova:

Bezkontaktní přenos energie, Bluetooth Low Energy, návrh antény, indukční vazba, SDK

Abstract

The topic solved within the frame of this bachelor thesis is the design and practical construction of a rotating measuring system.

Due to the rotation there are two basic tasks to be resolved during the design of the system: contact-less power supply and the data transfer from the system itself.

The first step of the design was studying the literature related to the both of tasks and selection of appropriate technologies.

The contact-less power supply of the system is carried out using the inductive coupling technology. For the data transfer the Bluetooth Low Energy technology was chosen.

The next step was the practical construction which included creation of circuit diagrams and the design of printed circuit boards for the device.

Completed device consists of a rotating and a stationary part. The stationary part ensures the rotation, provides contact-less power supply and testing of the measuring system. After completion of boards and system activation followed the programming of the Bluetooth module for communication and testing.

The testing possibility of system functions and parameters depending on rotation is one of the main targets of this bachelor thesis.

Index Terms:

Contactless power transfer, Bluetooth Low Energy, WPT, Inductive coupling, SDK

Obsah

1	ÚVOD	11
2	BEZDRÁTOVÉ TECHNOLOGIE	12
3	TECHNOLOGIE BEZKONTAKTNÍHO NAPÁJENÍ	13
3.1	POŽADAVKY NA NAPÁJENÍ VE VYVÍJENÉM SYSTÉMU	13
3.2	MOŽNOSTI NAPÁJENÍ ROTUJÍCÍCH SYSTÉMŮ	13
3.3	VOLBA VHODNÉHO ZPŮSOBU NAPÁJENÍ	15
3.4	TEORIE INDUKČNÍ VAZBY	16
4	TECHNOLOGIE BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU DAT	19
4.1	SOUČASNÉ TECHNOLOGIE BEZDRÁTOVÉ KOMUNIKACE	19
4.2	VOLBA VHODNÉ TECHNOLOGIE	21
4.3	BLUETOOTH LOW ENERGY	21
4.4	ARCHITEKTURA BLUETOOTH LOW ENERGY	22
4.5	GATT (GENERIC ATTRIBUTE PROFILE)	24
4.6	BLE SOFTDEVICE	24
5	PRAKTICKÁ ČÁST	25
5.1	POSTUP PŘI VÝVOJI ZAŘÍZENÍ	25
6	REALIZACE OBVODU BEZKONTAKTNÍHO NAPÁJENÍ	26
6.1	OBVOD PRIMÁRNÍ CÍVKY	26
6.2	OBVOD SEKUNDÁRNÍ CÍVKY	28
6.3	PARAMETRY PRIMÁRNÍ A SEKUNDÁRNÍ CÍVKY	29
7	REALIZACE BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU DAT	30
7.1	BLE MODULY NINA B-11x-03B	30
7.2	PARAMETRY MODULU NINA B-11x-03B	31
7.3	NÁVRH ANTÉNY PŘIJÍMACÍHO MODULU	33
8	SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ	36
8.1	UCS	36
8.2	OPEN CPU	38
8.3	SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ VYSÍLACÍHO MODULU	38
8.4	SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ PŘIJÍMACÍHO MODULU	41
9	REALIZACE ZAŘÍZENÍ PRO TESTOVÁNÍ SYSTÉMU	42
9.1	KOTOUČ	43
9.2	DC MOTOR	43
9.3	OPTICKÁ ZÁVORA	43
9.4	DCDUINO UNO	44

10	MĚŘENÍ SYSTÉMU	45
10.1	MĚŘENÍ NAPĚTÍ INDUKOVNÉHO NA SEKUNDÁRNÍ CÍVCE	45
10.2	MĚŘENÍ PARAMETRŮ PŘENOSU DAT	48
11	ZÁVĚR	54
12	ZDROJE	55
	PŘÍLOHA A – VÝROBNÍ PODKLADY	58
	BUDIČ CÍVKY + ZDROJE PRO NAPÁJENÍ - SCHÉMA	58
	BUDIČ + ZDROJE PRO NAPÁJENÍ – DPS	59
	BUDIČ + ZDROJE PRO NAPÁJENÍ - SEZNAM SOUČÁSTEK	59
	VYSÍLACÍ OBVOD - SCHÉMA	60
	VYSÍLACÍ OBVOD - DPS	61
	VYSÍLACÍ OBVOD – SEZNAM SOUČÁSTEK	61
	PŘIJÍMACÍ OBVOD (BEZ ANTÉNY) - SCHÉMA	62
	PŘIJÍMACÍ OBVOD (BEZ ANTÉNY) - DPS	63
	PŘIJÍMACÍ OBVOD (BEZ ANTÉNY) – SEZNAM SOUČÁSTEK	63
	SCHÉMA – KOTOUČ	64
	PŘÍLOHA B – FOTODOKUMENTACE	65
	MĚŘICÍ PRACOVIŠTĚ	65
	MĚŘICÍ SYSTÉM NA KOTOUČI	65
	KOMPLETNÍ ZAŘÍZENÍ	66

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 - VYUŽITÍ VLNOVÉHO SPEKTRA _____	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
OBRÁZEK 2 BLOKOVÉ SCHÉMA BEZKONTAKTNÍHO NAPÁJENÍ _____	15
OBRÁZEK 3 TECHNOLOGIE BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU DAT _____	19
OBRÁZEK 4 VRSTVY BLUETOOTH STACKU, PŘEVZATO A UPRAVENO [26] _____	22
OBRÁZEK 5 BLUETOOTH PAKET _____	23
OBRÁZEK 6 BLOKOVÉ SCHÉMA VÝSLEDNÉHO ZAŘÍZENÍ _____	25
OBRÁZEK 7 - SCHÉMA BUZENÍ PRIMÁRNÍ CÍVKY LABORATORNÍHO PŘÍPRAVKU, PŘEVZATO Z [21] _____	26
OBRÁZEK 8 - ZAPOJENÍ ČASOVAČE NE555 V ASTABILNÍM REŽIMU, PŘEVZATO Z [15] _____	27
OBRÁZEK 9 - BLUETOOTH MODULY UBLOX _____	30
OBRÁZEK 10 MIKROPÁSKOVÉ VEDENÍ, PŘEVZATO Z [27] _____	34
OBRÁZEK 11 KOPLANÁRNÍ VEDENÍ, PŘEVZATO Z [27] _____	34
OBRÁZEK 12 PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ PROGRAMU TXLINE _____	35
OBRÁZEK 13 NAVRŽENÁ ANTÉNA V PROGRAMU CST _____	35
OBRÁZEK 14 DEFINICE PARAMETRŮ TESTOVACÍ SEKVENCE _____	39
OBRÁZEK 15 DEFINICE PERIODY TESTOVACÍ SEKVENCE _____	39
OBRÁZEK 16 MODIFIKACE PROGRAMU SAADC _____	40
OBRÁZEK 17 PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ PROGRAMU S-CENTER _____	41
OBRÁZEK 18 FOTOGRAFIE SYSTÉMU _____	42
OBRÁZEK 19 SCHÉMA VÝSLEDNÉHO SYSTÉMU _____	42
OBRÁZEK 20 OPTICKÁ ZÁVORA _____	43
OBRÁZEK 21 POLOHY PŘI MĚŘENÍ KVALITY _____	49

Seznam tabulek

TABULKA 1 TECHNOLOGIE BEZKONTAKTNÍHO NAPÁJENÍ _____	14
TABULKA 2 PARAMETRY POUŽITÝCH CÍVEK _____	29
TABULKA 3 BLOKOVÉ SCHÉMA ČIPU NRF52832 _____	31
TABULKA 4 PARAMETRY BLUETOOTH MODULU NINA B1 _____	32
TABULKA 5 PARAMETRY RADIOVÉ ČÁSTI MODULU NINA B1 _____	33

Použité zkratky a symboly

A4WP	Alliance for Wireless Power	Technologie bezdrátového přenosu energie a napájení, standard zajišťující kompatibilitu zařízení, která využívají tuto technologii
ADC	Analog to Digital Converter	Převodník, který zajišťuje převod analogového signálu na digitální
ANT		Protokol bezdrátové komunikace pro nízkopříkonové aplikace
APP	Application	Vrstva Bluetooth Low Energy stacku
ARM	Advanced RISC Machines	Architektura procesorů
ATT	Attributes	Vrstva Bluetooth Low Energy stacku
BLE	Bluetooth Low Energy	verze Bluetooth zaměřená na nízkopříkonové aplikace
CPU	Central Processing Unit	Centrální procesorová jednotka
CRC	Cyclic Redundancy Check	Kontrolní součet, součást paketu pro detekci chyb v přenášených datech
DC	Direct Current	Stejnoseměrný proud
DPS		Deska plošných spojů
GAP	General Access Profile	Vrstva Bluetooth Low Energy stacku
GATT	General Access	Vrstva Bluetooth Low Energy stacku
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying	Způsob modulace signálu
GPIO	General Purpose Input Output	Vstupně výstupní porty
HCI	Host Controller Interface	Vrstva Bluetooth Low Energy stacku
I2C	Inter Integrated Circuit	Typ sériového rozhraní
IoT	Internet of Things	Internet věcí
ISM	Industrial, Scientific, Medical	Označení radiového pásma pro průmyslové, vědecké a lékařské využití
L2CAP	Logical Link Control and Adaptation Protocol	Vrstva Bluetooth Low Energy stacku
LCD	Liquid Crystal Display	Display s technologií tekutých krystalů
LDO	Low Dropout Regulator	Lineární napěťový regulátor
LED	Light Emitting Diode	Světlo emitující dioda
LL	Link Layer	Vrstva Bluetooth Low Energy stacku
MAC	Media Access Control	
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	Tranzistor řízený elektrickým polem
NFC	Near Field Communication	Technologie bezdrátové komunikace
PHY	Physical Layer	Vrstva Bluetooth Low Energy stacku

Použité zkratky a symboly

PIFA	Planar Inverted F Antenna	Typ antény
PMA	Power Matters Alliance	
PWM	Pulse Wide Modulation	Pulsně šířková modulace
Qi		Standard bezdrátového přenosu energie
RAM	Random Access Memory	Typ paměti
RF	Radio Frequency	Radiová frekvence
RFID	Radio Frequency Identification	Technologie bezdrátové komunikace
RTC	Real Time Clock	Hodiny reálného času
SDK	Software Development Kit	Softwarové vývojové prostředky
SMP	Secure Management Profile	Vrstva Bluetooth Low Energy stacku
SPI	Seriál Peripheral Interface	Typ sériového rozhraní
SPP	Serial Port Profile	Profil bezdrátového přenosu dat u klasické verze Bluetooth
SPS	Seriál Port Service	Profil bezdrátového přenosu dat u verze Bluetooth Low Energy
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter	Typ sériového rozhraní
uCS	u-Blox Connectivity Software	Uživatelské rozhraní pro komunikaci s produkty od firmy u-Blox
USB	Universal Seriál Bus	Univerzální sériová sběrnice
WLAN	Wireless Local Area Network	Bezdrátová lokální síť
WNAN	Wireless Neighbourhood Area Network	Bezdrátová síť středního dosahu
WPAN	Wireless Personal Area Network	Bezdrátová síť krátkého dosahu
WPC	The Wireless Power Consortium	
WWAN	Wireless Wide Area Network	Bezdrátová síť velkého dosahu

<i>Veličina</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Definice</i>
f	Hz	Frekvence
E	V/m	Intenzita elektrického pole
H	A/m	Intenzita magnetického pole
D	C/m ²	Elektrická indukce
B	T	Magnetická indukce
Φ	Wb	Magnetický tok
F	N	Síla
q	C	Náboj
v	m/s	Rychlost
ε	V	Elektromotorické napětí
t	s	Čas
L	H	Vlastní indukčnost
I	A	Proud
M	H	Vzájemná indukčnost
R _A , R _B , R _T	Ω	Odpor

1 Úvod

Bezdrátové technologie je možné rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou technologie zajišťující přenos informací, druhá skupina zahrnuje bezdrátový přenos energie. Mezi oběma skupinami jsou patrné rozdíly v parametrech, realizaci a také požadavcích na technologie přenosového systému.

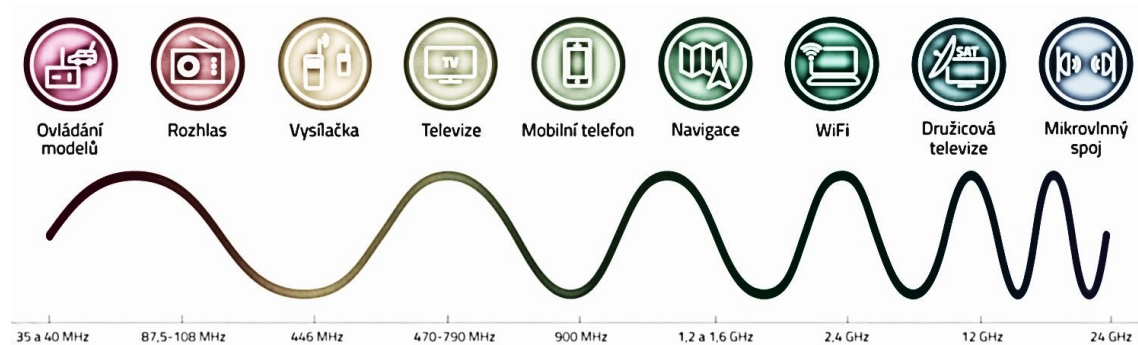
Ve své bakalářské práci se věnuji oběma směrům vývoje bezdrátových technologií. Výsledným produktem je rotující měřicí systém, který nepotřebuje vodiče pro napájení, ale ani pro přenos dat z něj.

První část práce je zaměřena na teoretický rozbor problematiky bezdrátového přenosu, zhodnocení dostupných technologií a výběr technologie pro výsledný systém. Druhá část práce je orientována na realizaci výsledného systému. Zahrnuje tedy rozbor použitých komponent, a především měření parametrů podstatných pro správnou funkci takového systému. Práce je zakončena vyhodnocením naměřených parametrů a diskuzí možných budoucích úprav a využití systému.

2 Bezdrátové technologie

Pro představu o současném rozšíření bezdrátových technologií je určitě zajímavé zaměřit se na frekvenční spektrum a jeho využití. V rámci celého spektra lze najít velké množství technologií využívajících elektromagnetické vlnění jako přenosového prostředku. Základním principem je vyslání elektromagnetické vlny, její šíření a následné přijetí přijímačem signálu. Rozhraní mezi vysílacím/přijímacím zařízením a přenosovým prostředím tvoří anténa.

Bezdrátová komunikace je v dnešní době často používaná technologie. Tímto pojmem lze označit veškeré technologie, které pro přenos dat nepotřebují fyzické spojení komunikujících zařízení. Komunikace mezi nimi tedy probíhá bez použití kabelů, pouze pomocí elektromagnetických vln. Na obrázku 1 je přehled technologií podle toho, jakou část frekvenčního spektra využívají ke své funkci.



3 Technologie bezkontaktního napájení

Bezkontaktním přenosem energie označujeme přenos elektrické energie mezi dvěma body bez nutnosti propojení pomocí vodiče. Tato technologie se uplatní v systémech, kde není možnost klasického způsobu napájení. Mezi takové aplikace se řadí například napájení rotujících systémů, napájení v prostředí s vysokou vlhkostí, či v prostředí s výskytem hořlavých látek.

Hlavní oblasti, ve kterých je tento způsob napájení využit patří [1]:

- Průmyslové aplikace (napájení zařízení provozovaných v prostředí se zvýšenou vlhkostí, či v prostředí s výskytem hořlavých látek)
- Automobilový průmysl (bezdrátové dobíjení baterií elektromobilů)
- Biomedicínské aplikace (napájení zařízení implantovaných v lidském těle)
- Kosmický průmysl (napájení rotujících objektů)
- Spotřební elektronika (napájení širokého spektra elektronických zařízení od mobilního telefonu po elektrický kartáček na zuby)

3.1 Požadavky na napájení ve vyvíjeném systému

Hlavní cíl v návrhu napájení pro měřicí systém je přenos dostatečného výkonu, který potřebuje Bluetooth modul a další k němu připojené elektronické obvody. Doporučené napájecí napětí pro Bluetooth modul je dle datového listu 1,8 V – 3,6 V a odebíraný proud 10 mA. Ideálně by tedy bylo zapotřebí přenést výkon alespoň 36 mW. Pro možnosti budoucího rozšíření zařízení je vhodné zajistit vyšší množství přeneseného výkonu. Při návrhu je také důležité hledět na celkovou účinnost přenosového systému.

3.2 Možnosti napájení rotujících systémů

Jedním ze způsobů, jak napájet rotující systém je použití sběracích kroužků, takzvaný přenos napájení rotační vazbou. To však s sebou nese značné problémy týkající se především mechanického opotřebení kroužků, a tudíž i jejich omezené životnosti. U takových zařízení je potřeba kroužky po určité době vždy vyměnit. Dalším možným řešením může být použití baterie pro dodání energie do rotujícího obvodu. Kapacita baterie je však omezená, a tak i zde je po určité době nutná výměna.

Technologie bezdrátového přenosu energie lze rozdělit do skupin dle vzdálenosti, na kterou je lze s jejich využitím přenášet výkon. Technologie pro krátkou vzdálenost přenosu zahrnují vzdálenost do padesáti centimetrů mezi vysílací a přijímací částí systému. Technologie se střední vzdáleností fungují na vzdálenost až dvaceti metrů.

Vzhledem k faktu, že není potřeba ve vyvíjeném zařízení dosáhnout nabíjení na velkou vzdálenost, není nutné brát v úvahu napájení mikrovlnným či světelným zářením. Stejně tak využití rezonance není nezbytně nutné.

Přehled běžně využívaných způsobů bezkontaktního napájení je zobrazen v tabulce. V následující podkapitole jsou probrány dvě nejčastěji využívané technologie, které by mohly být použity pro napájení vyvíjeného systému.

<i>Technologie</i>	<i>Vzdálenost</i>	<i>Frekvence</i>	<i>Typy antén</i>	<i>Použití</i>
Indukční vazba	krátká	Hz - MHz	smyčky z vodičů	nabíjení elektrických zubních kartáčků, nabíjení baterie spotřební
Rezonanční indukční vazba	střední	kHz - GHz	laděné smyčky z vodičů	
Kapacitní vazba	krátká	kHz - MHz	elektrody kondenzátoru	
Magnetodynamická vazba	krátká	Hz (rotace)	(rotující magnety)	
Mikrovlnné záření	dlouhá	GHz	parabola, rectenna	
Světelné záření	dlouhá	\geq THz	fotocitlivé součástky, světelné přijímače,	

Tabulka 1 Technologie bezkontaktního napájení

3.2.1 Indukční vazba

Využití indukční vazby lze běžně najít v asynchronních motorech, kde díky správnému buzení cívek dochází k vytvoření rotujícího magnetického pole, a tudíž i k chodu motoru. V tomto případě je magnetická vazba využita k přeměně elektrické energie na mechanickou energii stroje. Další možnost využití indukční vazby je v ohřevu, například u indukčních plotýnek, kde je energie magnetické vazby přeměněna na teplo. Dochází k přenosu energie mezi indukční cívkou umístěnou v plotýnce na zahřívavý objekt. V případě vyvíjeného zařízení je podstatou indukční vazby přenos výkonu mezi cívkami.

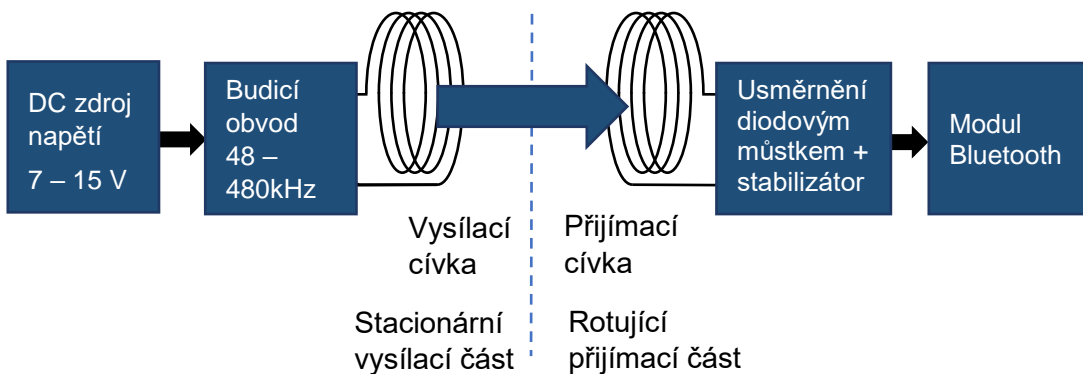
Indukční vazba mezi dvěma cívkami vznikne v případě, že je v jedné cívce generováno proměnné magnetické pole a na druhé je toto pole využito pro indukci napětí. Generace proměnného magnetického pole je zajištěna napájením vysílací cívky střídavým proudem. Účinnost přenosu s využitím této vazby není příliš vysoká, dosahuje obecně méně než 30 %. Účinnost přenosu je silně závislá na vzdálenosti indukčně vázaných cívek. Další parametr ovlivňující děj je rozměr cívek a frekvence, na které cívky pracují. Frekvence vhodná pro tuto technologii lze volit v pásmu Hz až desítek MHz. Se zvyšující se frekvencí roste účinnost přenosu, avšak dochází také k rostoucímu vlivu parazitních jevů, kterým je například skin efekt, či parazitní parametry použitých komponent.

3.2.2 Rezonanční indukční vazba

Úpravou obvodu jednoduché indukční vazby, přidáním kondenzátoru a vyladěním parametrů obvodu je dosaženo rezonance v obvodu. Podmínkou správné činnosti je vyladění přijímací i vysílacího obvodu na stejnou rezonanční frekvenci. Tyto úpravy mají vliv především na efektivitu přenosu, účinnost takového systému může dosáhnout až 60 %. Je však nutné respektovat rezonanční vlastnosti antén, a tak je tento způsob přenosu vhodný především pro frekvenční oblast MHz až GHz.

3.3 Volba vhodného způsobu napájení

Pro napájení měřicího systému bylo zvoleno napájení indukční vazbou. Velké výhody tohoto způsobu přenosu energie spočívají v jednoduchosti realizace a vyhodnocování výsledků. Výhodná je také možnost práce s obvodem, tedy i tvorba různých modifikací obvodu v závislosti na požadavcích systému. Blokové schéma přenosu energie indukční vazbou mezi cívkami je zobrazeno na obrázku.



Obrázek 1 Blokové schéma bezkontaktního napájení

V následující kapitole je shrnuta teorie týkající se indukční vazby a přenosu výkonu s jejím využitím.

3.4 Teorie indukční vazby

Důležitými milníky v objevování jevu elektromagnetické indukce jsou roky 1819 a 1831. Roku 1819 bylo dánským fyzikem H. Ch. Oerstedem poprvé dokázáno, že existuje blízký vztah mezi elektrickým a magnetickým polem. Zjistil, že vodič protékáný proudem působí na magnetku v jeho blízkosti. Roku 1831 Michael Faraday objevil, že proměnné magnetické pole může generovat pole elektrické. [19]

3.4.1 Veličiny pro popis elektromagnetického pole

Existuje mnoho způsobů popisu pole. Nejčastěji používaný je popis pomocí těchto vektorů:

E – intenzita elektrického pole

H – intenzita magnetického pole

D – elektrická indukce

B – magnetická indukce

Pro jednoznačný popis pole je nutné znát tuto čtveřici vektorů v každém bodě prostoru. Popis pole ve vakuu je speciálním případem, kdy stačí znalost pouze dvou vektorů (jeden vektor elektrického pole a jeden magnetického pole). [7]

Magnetický tok definuje tok vektoru **B** plochou **S** ohraničenou křivkou **C**. Výpočet této veličiny pro nehomogenní pole je zobrazen v rovnici (1).

$$\Phi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (1)$$

Pro homogenní pole lze vztah vyjádřit v jednodušší podobě, kde symbol θ vyjadřuje úhel mezi vektory **B** a **S**.

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \theta \quad (2)$$

Lorentzova síla vyjadřuje sílu působící na částici s nábojem q pohybující se rychlostí v , v elektromagnetickém poli. [20]

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (3)$$

Tento vzorec je možné rozdělit na 2 části, elektrostatickou a magnetickou, jak je uvedeno v rovnici (4).

$$\vec{F} = \vec{F}_E + \vec{F}_M = q \cdot \vec{E} + q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (4)$$

3.4.2 Lenzův zákon

„Indukovaný proud vytváří takové magnetické pole, které působí proti změnám magnetického toku, jež jeho vznik vyvolaly.“ [19]

3.4.3 Faradayův zákon

„Indukované elektromotorické napětí je úměrné záporné hodnotě změny magnetického toku.“

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (5)$$

Rovnice (5) definuje výpočet elektromotorického napětí ε (lze také označit jako indukované napětí). Záporné znaménko ve vzorci odkazuje na Lenzův zákon. Uvedený vzorec je platný pro kruhový závit. V případě cívky o N závitů tak dochází k následující modifikaci vzorce, jak je patrné z rovnice.

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (6)$$

Po uzavřených křivkách lze elektromotorické napětí definovat vzorcem (7), kde síla \mathbf{F} představuje Lorentzovu sílu : [19]

$$\varepsilon = \frac{1}{q} \oint \vec{F} \cdot d\vec{l} = \oint (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (7)$$

3.4.4 Indukované napětí v cívce

Vzhledem k aplikaci ve vyvíjeném systému bude indukované napětí vypočteno pro kruhovou cívku o poloměru r s N závitů. [19] [20]

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{B} \cdot \vec{S}) = -\frac{d}{dt}(-BA) = \left(\frac{dB}{dt}\right) \pi r^2 \quad (8)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = E(N2\pi r) = -N \frac{d\Phi}{dt} = N \left(\frac{dB}{dt}\right) \pi r^2 \quad (9)$$

$$E = \frac{r}{2} \left(\frac{dB}{dt}\right) \quad (10)$$

3.4.5 Vlastní indukčnost

Elektromotorické napětí je možné definovat pomocí proudu a vlastní indukčnosti cívky.

$$\varepsilon = L \frac{dI}{dt} \quad (11)$$

S využitím dříve definovaných vztahů pro elektromotorické napětí ε , lze vlastní indukčnost cívky definovat následovně:

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad (12)$$

Vlastní indukčnost cívky tedy určuje „odpor“ cívky proti změně elektrického proudu. [20]

3.4.6 Vzájemná indukčnost

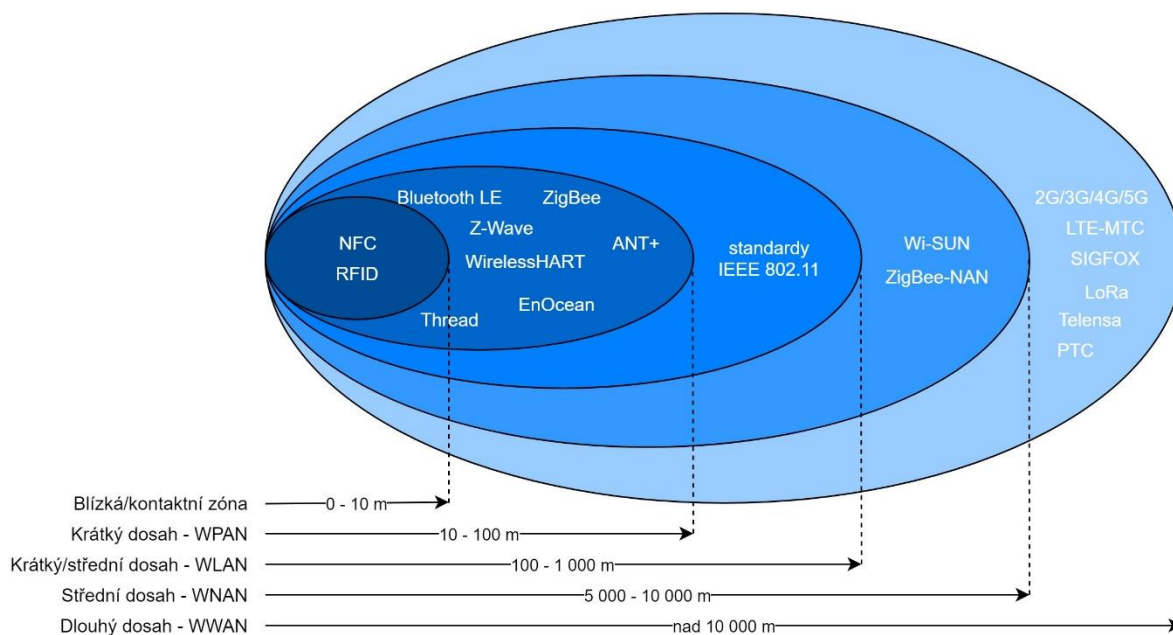
Pro stanovení definice vzájemné indukčnosti uvažujeme dvě soustředné cívky, primární a sekundární v těsné blízkosti. Primární cívka má N_1 závitů a protéká jí proud I_1 , který generuje magnetické pole \mathbf{B}_1 . Vzhledem k blízkosti cívek prochází část siločar tohoto magnetického pole také sekundární cívkou. Magnetický tok generovaný proudem primární cívky je označen symbolem Φ_{12} . Analogicky je značen počet závitů, proud a magnetické pole sekundární cívky. Pro takové dvě cívky pak platí vztah (14), kde symbol M_{21} označuje vzájemnou indukčnost cívek. [22]

$$N_2 \Phi_{21} = M_{21} I_1 \quad (13)$$

4 Technologie bezdrátového přenosu dat

4.1 Současné technologie bezdrátové komunikace

Pro přenos dat bylo vyvinuto mnoho technologií. Obecně vzato, při výběru bezdrátové technologie pro přenos dat, existují tři hlavní aspekty, na které je dobré se zaměřit, v závislosti na výsledné aplikaci. Těmito aspekty jsou: rychlost přenosu, požadovaný dosah a energetická náročnost přenosového systému. Na obrázku jsou zobrazeny technologie ve skupinách, v závislosti na jejich dosahu. Obrázek je převzat a upraven ze zdroje [16].



Obrázek 2 Technologie bezdrátového přenosu dat

V rámci realizovaného systému nejsou na dosah přenosu velké požadavky. Ideální je tedy vybírat ze skupiny krátkého dosahu, WPAN (Wireless Personal Area Network). Technologie v této skupině nabízejí dosah do cca 100 m. Výběr a porovnání bude tedy realizováno na základě parametru, který je ve vyvíjeném zařízení nejpodstatnější, a to energetická náročnost systému.

Revoluci ve směru energeticky úsporných zařízení způsobil příchod IoT – internetu věcí. V systémech bezdrátového přenosu začal být kladen důraz na celkovou minimalizaci rozměrů systému, především u přenosu naměřených dat ze senzorů a s tím související nutnost napájení baterií, pokud možno co nejmenší. Aby toto mohlo být realizováno, bylo nutné zajistit i minimální energetickou náročnost systémů zajišťujících přenos dat. Využitelnost těchto zařízení je pak v široké škále aplikací, počínaje chytrými domácnostmi, přes osobní elektroniku, měření a sledování v průmyslu, dopravě, či zemědělství, až po chytrá města. S ohledem na koncová zařízení jsou vyvíjeny stále větší požadavky na dostupnost, rychlost a cenu bezdrátových sítí.

Dále jsou stručně ohodnoceny systémy, které jsou vhodné právě pro takové nízkenergetické aplikace. Vybrány jsou pouze ty, které jsou nejčastěji využívané a dostupné na trhu.

4.1.1 ZigBee

ZigBee je nízkopříkonový standard, který poskytuje bezdrátovou komunikaci krátkého dosahu. Pracuje na frekvenci 2,4 GHz, stejně jako Bluetooth, či ANT. Ale stejně tak využívá frekvenci 784 MHz v Číně, 868 MHz v Evropě a 915 MHz v USA a Austrálii. Maximální přenosová rychlost této technologie je 250 kbit/s. Dosah v závislosti na vysílacím výkonu leží v rozmezí 10 m – 100 m. [6]

4.1.2 ANT+

ANT je technologie srovnatelná s Bluetooth, pracuje na frekvenci 2,4 GHz v ISM pásmu. Stejně jako Bluetooth LE je tento standard uzpůsoben k napájení senzorů pomocí malé baterie, avšak s výdrží měsíců až let. Protokol byl představen roku 2004 kanadskou společností Dynastream Innovations. Čipy podporující tento protokol nabízí například výrobce Nordic Semiconductor, či Texas Instruments. Přenosová rychlost této technologie je 1 Mbit/s s průměrným dosahem 100 m.[8]

4.1.3 Bluetooth

V rámci standardu Bluetooth lze rozlišit 2 hlavní směry vývoje této technologie: Bluetooth Classic a Bluetooth Low Energy (BLE). Zařízení se tak od vydání Core Specifications 4.0 (v této specifikaci bylo představeno Bluetooth Low Energy) dělí na single – mode a dual – mode. Single – mode zařízení podporují pouze jeden směr Bluetooth standardu a nejsou tak navzájem kompatibilní s jiným single – mode zařízením podporující druhý směr standardu Bluetooth. Na rozdíl od toho dual – mode zařízení poskytují zařízením kompatibilitu s oběma směry standardu. [11]

Využití Bluetooth Classic nacházíme v systémech přenášejících velké objemy dat, či streamování videa nebo audia. Hlavním cílem je tedy vysoká rychlost a kvalita, bez ohledu na spotřebu zařízení. Bluetooth Low Energy bylo vyvinuto s ohledem na využití v rámci IoT. Z tohoto důvodu poskytuje nízkou spotřebu energie a je vhodné pro aplikace napájené baterií.

4.2 Volba vhodné technologie

Vzhledem k požadavkům vyvíjeného zařízení byla zvolena technologie Bluetooth Low Energy. Velkou výhodou této technologie je její rozšířenív běžně používaných elektronických zařízeních, tedy možnost propojení se smartphonem, či notebookem. Tato technologie je v následující kapitole probrána podrobněji.

4.3 Bluetooth Low Energy

Technologie Bluetooth Low Energy (dále jen BLE) byla poprvé definována v rámci Bluetooth 4.0 Core Specification v roce 2010, společně se standardem Bluetooth Classic. Nejedná se o vylepšení klasické verze Bluetooth, ale spíše o novou technologii.

Hlavní cíl BLE je v minimalizaci spotřeby energie a minimalizaci ceny zařízení vzhledem k širokým možnostem využití v IoT (Internet of Things). Snížení energetické náročnosti BLE zařízení je docíleno následujícími způsoby:

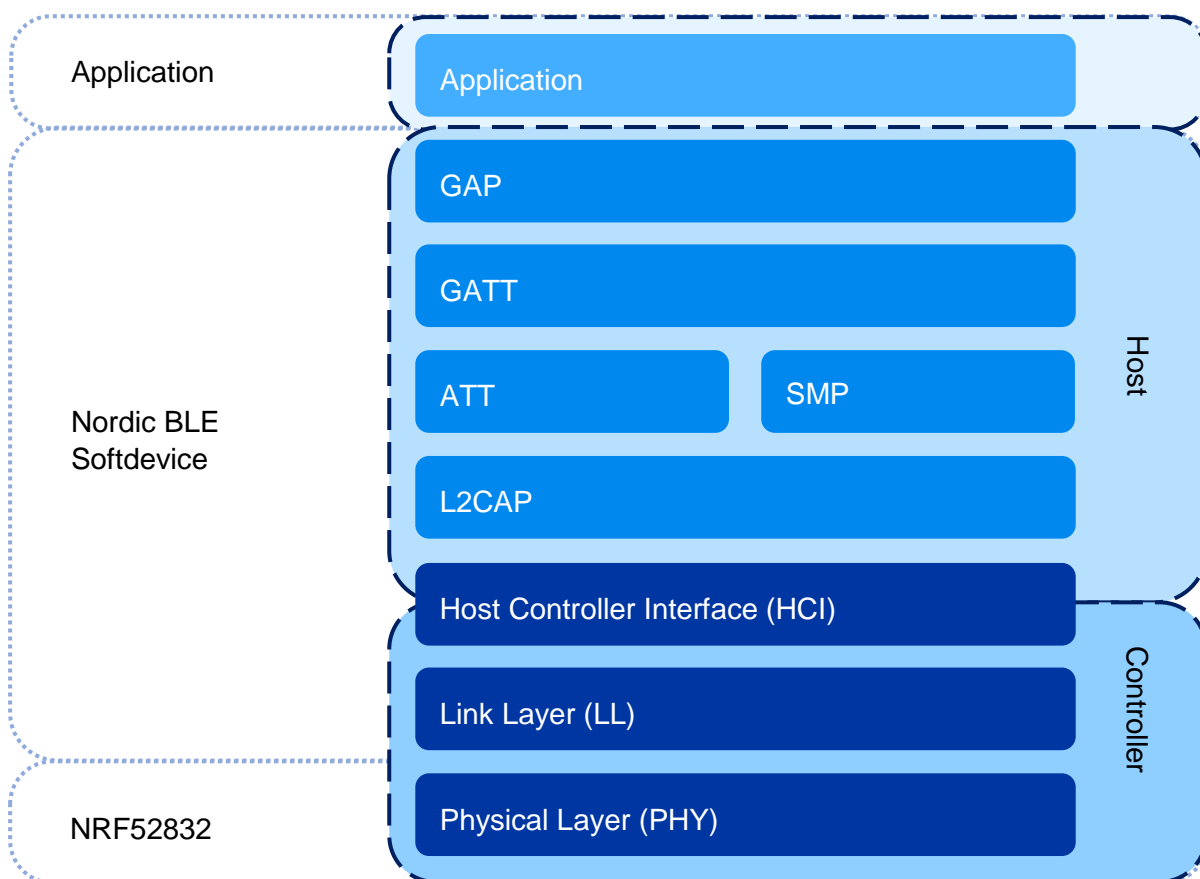
- maximalizace intervalu, kdy je komunikace neaktivní (udržování zařízení v módu spánku a probuzení pouze při zasílání dat – v předem definovaném intervalu, či po probuzení externím zařízením)
- vypínání radiové části, vždy když je to možné
- zasílání malých objemů dat
- nižší přenosová rychlost
- využití pouze 40 radiofrekvenčních kanálů (na rozdíl od 79, které používá Bluetooth Classic)

Výhoda aplikace s BLE je možnost napájení zařízení baterií. Takové zařízení pak může být napájeno baterií po dobu několika dní, až několika let v závislosti na principu funkce a požadavcích. V porovnání s jinými bezdrátovými technologiemi, BLE se řadí mezi technologie s nejnižší energetickou náročností.

V následující kapitole jsou stručně popsány jednotlivé vrstvy BLE protokolu.

4.4 Architektura Bluetooth Low Energy

Protokol BLE se skládá ze dvou základních částí: Controller a Host. V rámci Controller je zahrnuta fyzická a linková vrstva protokolu. Možnou realizací je SoC (System on Chip), který v sobě integruje radiovou část. K tomuto SoC je dále připojen externí kontrolér, který zajišťuje funkce části Host. V použitém Bluetooth modulu tuto funkci plní SoC od firmy Nordic Semiconductor nRF52832. Tento mikrokontroler v sobě zahrnuje veškeré vrstvy protokolu BLE. Jednotlivé vrstvy protokolu jsou zobrazeny na obrázku, popisky v tečkovaných rámečcích odkazují na kontrolér NRF52832 a způsob, jakým jsou v něm jednotlivé vrstvy implementovány.



Obrázek 3 Vrstvy Bluetooth stacku, převzato a upraveno [26]

Následující kapitoly se stručně věnují vybraným vrstvám BLE, více informací o zmíněných i nezmíněných vrstvách BLE je možné najít v [2].

4.4.1 Fyzická vrstva (PHY)

Nejnižší vrstvou BLE protokolu je fyzická vrstva. Tato vrstva je realizována analogovými obvody, které zajišťují modulaci a demodulaci analogových signálů a jejich převod do digitální podoby. Při přenosu je použito modulace GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying). [13]

Komunikaci probíhá ve frekvenčním pásmu 2400 MHz - 2 483,5 MHz. Tento frekvenční rozsah se řadí do pásma ISM (Industrial, Scientific, Medical), které je využito pro průmyslové, vědecké a medicínské aplikace. Výhodou tohoto pásma je volné, nelicencované využití, což je vhodné z hlediska finanční úspory při využívání technologie BLE. Také je ale zajištěna celosvětová kompatibilita mezi zařízeními podporujícími tento standard. Na stejném kmitočtu pracují i další bezdrátové technologie, například Wi-Fi, či ZigBee.

4.4.2 Linková vrstva (LL)

Linková vrstva přímo pracuje s vrstvou fyzikou. Jejím účelem je správa přenosu, tedy i práce s použitým frekvenčním pásmem. V rámci BLE je pásmo rozděleno na 40 kanálů, každý z nich vždy o šířce 2 MHz. Tři kanály jsou využity pouze pro advertising, 37 kanálů je určeno pro přenos dat během spojení. Úkolem této vrstvy je správa procesů propojování a zasílání dat. V rámci vrstvy je definována struktura Bluetooth paketu, procesu advertising a také definice datových kanálů.

Architektura paketů

V rámci BLE existují dva základní druhy paketů: datové a advertising pakety, které plní naprosto odlišný účel. Význam advertising paketů spočívá ve vyhledávání a propojení zařízení. Datové pakety jsou přenášeny, je-li vytvořeno propojení mezi zařízeními. Druh paketu je definován především tím, na kterém kanálu je vysílán. Jak již bylo řečeno, pro účely advertising jsou vymezeny 3 kanály, zatímco pro datové přenosy 37 kanálů.[13]

Preamble	Cílová adresa	Hlavička	Délka	Data	CRC
8b	32b	8b	8b	0 - 296b	24b

Obrázek 4 Bluetooth paket

4.4.3 HCI (Host Controller Interface)

HCI označuje rozhraní mezi vrstvami kontroleru a vrstvami host, umožňuje tedy jejich vzájemnou komunikaci. Tyto vrstvy mohou být rozděleny a realizovány na samostatných čipech, nebo mohou být všechny integrovány v jednom čipu, což je realizováno v případě kontroleru nRF52832.

4.4.4 ATT (Attribute Protocol)

V rámci protokolu ATT jsou definovány 2 role BLE zařízení: „Client“ a „Server“. Princip tohoto vztahu je následující: server zajišťuje a poskytuje data, klient zařizuje propojení a vyčítání dat poskytovaných serverem. Data, která poskytuje server jsou uspořádána v tabulce atributů. Každý atribut má definovány své parametry a hodnotu. Mezi hodnoty patří například informace o zařízení, sensorové hodnoty, či data o poloze. Vyčítání těchto dat pak probíhá pomocí zařízení klient, odkazem na určitou řádku této tabulky. [26]

Parametry atributů jsou následující:

typ atributu „UUID“ (Universally Unique ID) – 16 bitový či 128 bitový identifikátor typu atributu

„handle“ atributu – 16 bitový unikátní identifikátor, pomocí kterého na něj „Client“ odkazuje

oprávnění atributu – definice operací, které mohou mezi zařízením „Client“ a „Server“ probíhat

4.5 GATT (Generic Attribute Profile)

GATT zavádí hierarchickou strukturu atributů, přičemž veškeré atributy jsou seskupeny do služeb, služby dále obsahují jednotlivé charakteristiky. V rámci charakteristik jsou pak zahrnuty další jednotlivé atributy. [2]

4.6 BLE SoftDevice

Výrobce poskytované „SoftDevice“ jsou knihovny kompletních bezdrátových protokolů pro návrh systémů se SoC (System on Chip). Dostupné jsou v rámci SDK (Software Development Kit - probráno v kapitole 8.2.1 Nordic SDK), v podobě předkompilovaných souborů typu .hex. Práce s nimi je zajištěna pomocí Application Programming Interface (API), které je deklarováno v hlavičkových souborech programovacího jazyka C. [26]

V rámci použitých SDK „nRF SDK v12.3.0“ a „nRF SDK v13.0.0“ jsou dostupné následující verze SoftDevice

S132 SoftDevice – Zahrnuje BLE centrální a periferní protokol, umožňující až 20 propojení. Integruje v sobě vrstvy Host i Controller. Tento SoftDevice je použit v rámci softwarového řešení použitých modulů.

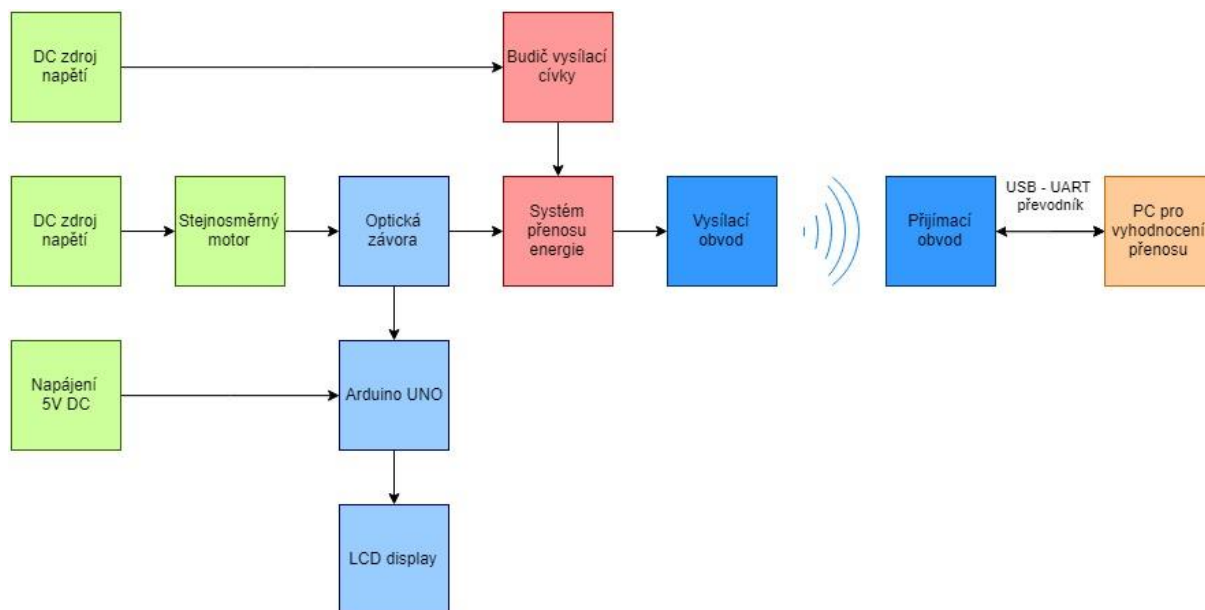
S140 SoftDevice – Nabízí možnosti stejného jako S132, navíc však poskytuje rozšíření o Bluetooth Low Energy v.5.

S212 SoftDevice – Poskytuje ANT™ protokol pro kontrolery nRF52832.

S332 SoftDevice – Tento typ současně kombinuje BLE A ANT™ protokoly.

5 Praktická část

Vývoj výsledného systému lze rozdělit na dva základní bloky: Realizace bezkontaktního napájení a realizace bezdrátového přenosu dat pomocí Bluetooth Low Energy. V této kapitole je detailně probráno hardwarové řešení zmíněných dvou problematik. Závěrečná část kapitoly je věnována ostatním komponentům potřebným pro sestavení výsledného měřicího systému. Na obrázku je znázorněno blokové schéma celého systému.



Obrázek 5 Blokové schéma výsledného zařízení

5.1 Postup při vývoji zařízení

Prvním krokem při vývoji byl výběr vhodné technologie bezdrátového přenosu a následně výběr modulu podporující tuto technologii. Vzhledem k nutnosti bezkontaktního napájení byl brán ohled především na energetickou náročnost napájených zařízení. Po prozkoumání dostupných možností byl vybrán BLE modul od firmy u-blox, NINA B1 11x-003B.

V tomto bodě bylo tedy možné začít s vývojem bezdrátového napájení, jelikož energie potřebná ke správné funkci modulu již byla známá z datového listu. Pro bezkontaktní přenos energie byla zvolena technologie indukční vazby, při které dochází k buzení proměnného elektromagnetického pole jednou cívkou a indukce elektrického napětí na cílce druhé.

V druhé části bylo realizováno propojení mezi dvěma Bluetooth moduly. Moduly byly naprogramovány pro vzájemnou komunikaci a zařazeny do celého systému.

Závěrečnou fází vývoje bylo umístění elektroniky na rotující kotouč, sestavení celého zařízení a zhodnocení funkčnosti systému při rotaci. Pro lepší přehled o měření byla navíc realizována optická závora, díky které je možné sledovat rychlost otáčení elektromotoru.

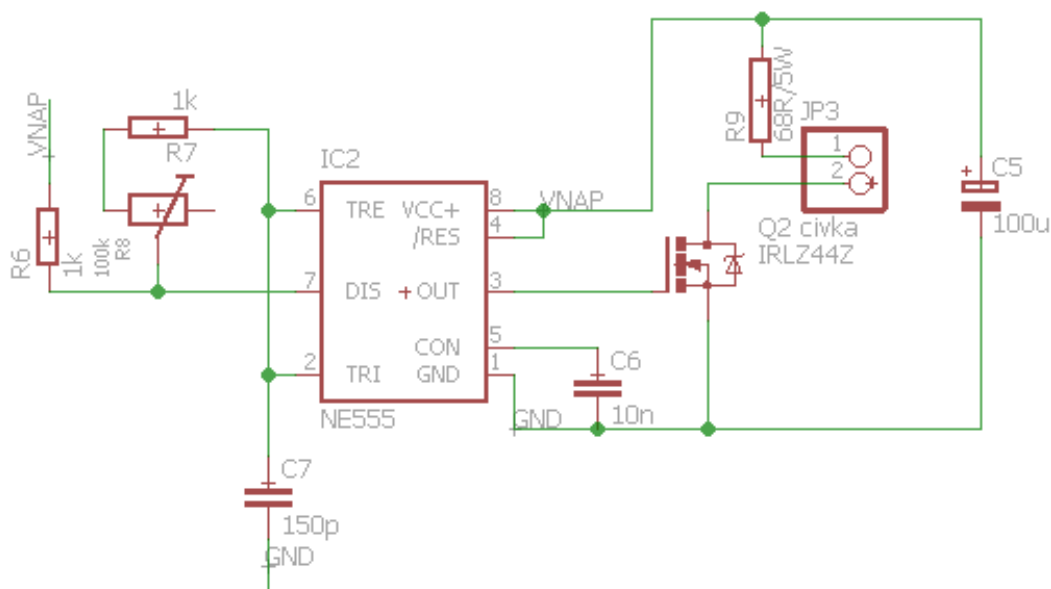
6 Realizace obvodu bezkontaktního napájení

Napájení měřicího systému na rotujícím kotouči je realizováno použitím dvou cívek. K přenosu energie dochází prostřednictvím indukční vazby mezi nimi. Teorie týkající se principu vazby mezi cívkami byla již probrána v kapitole 3.5 Teorie indukční vazby.

6.1 Obvod primární cívky

Pro vznik indukční vazby mezi cívkami je nutné budit primární, vysílací, cívku proměnným elektrickým proudem. Dochází tak ke vzniku proměnného magnetického pole generovaného touto cívkou. Jako buzení primární cívky byl zvolen obdélníkový signál. Generátor obdélníkového signálu byl vytvořen s použitím integrovaného obvodu, časovače NE555. Na výstupu tohoto časovače je umístěn tranzistor IRLZ44N.

Obvod buzení primární cívky byl převzat z již existujícího laboratorního přípravku a modifikován na parametry vyvíjeného zařízení. Na obrázku je schéma obvodu pro buzení cívky již existujícího laboratorního přípravku.



Obrázek 6 - Schéma buzení primární cívky laboratorního přípravku, převzato z [21]

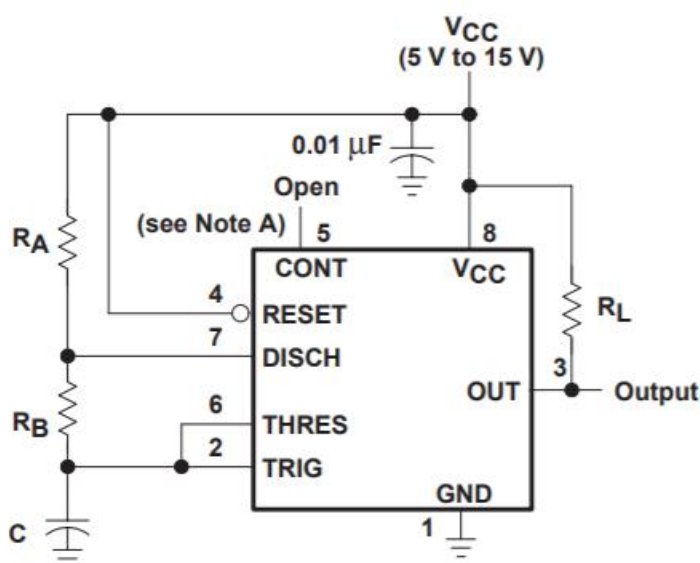
Modifikace vzorového zapojení

- přidání kondenzátoru C8 = 100 nF paralelně k rezistoru R9 (ve výsledném schématu realizovaného obvodu je označen R5)
- přidání elektrolytického kondenzátoru C6 = 330 µF paralelně ke kondenzátoru C5 (ve výsledném schématu realizovaného obvodu je označen C9)

6.1.1 Časovač NE555

Zapojení časovače odpovídá zapojení v datovém listu obvodu pro astabilní režim. Obvod nemá stabilní stav, v důsledku čehož se periodicky překlápí v závislosti na nabíjení a vybíjení kondenzátoru C. Na výstupním pinu obvodu OUT, je v tomto případě obdélníkový signál. Zatímco nabíjení kondenzátoru závisí na hodnotách obou rezistorů, jeho vybíjení probíhá pouze přes rezistor R_B . Střída obdélníků je tak závislá na hodnotách rezistorů R_A a R_B . Frekvenci výstupního signálu je možné nastavit pomocí rezistorů R_A a R_B a pomocí kondenzátoru C. Do série s rezistorem R_B byl navíc zařazen odporový trimr pro možnost úpravy frekvence a střidy výstupního signálu. Vztah pro výpočet frekvence je uveden v rovnici (15).

Základní princip tohoto obvodu spočívá v překlápění napěťové úrovně na výstupu obvodu v závislosti na hodnotách napětí na vstupech obvodu. Tohoto stavu je docíleno spojením vývodů 2 a 6 a zařazením kondenzátoru C.



Obrázek 7 - Zapojení časovače NE555 v astabilním režimu, převzato z [15]

Výpočet frekvence v zapojení dle datového listu je definován rovnicí [15]

$$f = \frac{1,44}{(R_A + 2 \cdot R_B) \cdot C} \quad (14)$$

Výpočet frekvence v realizovaném zapojení je definován rovnicí (16), kde je navíc zařazen člen R_T , který označuje odpor trimru.

$$f = \frac{1,44}{(R_A + 2 \cdot (R_B + R_T)) \cdot C} \quad (15)$$

Hodnoty prvků ve výsledném systému:

$$R_A = R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_B = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_T = R_T = 100 \text{ k}\Omega$$

$$C = C_4 = 150 \text{ pF}$$

Vypočtená frekvence ve výsledném systému:

$R_T = 785 \Omega$ (hodnota R_T byla nastavena a ponechána v průběhu veškerých měření)

$$f = \frac{1,44}{(1\,000 + 2 \cdot (1\,000 + 785)) \cdot 15 \cdot 10^{-11}} = 210,065 \text{ kHz} \quad (16)$$

Naměřená frekvence ve výsledném systému: $f = 207,8 \text{ kHz}$

6.1.2 Tranzistor MOSFET

Na výstupu časovače je umístěn tranzistor IRFZ44N. Jedná se o unipolární tranzistor typu N – MOSFET. Na hradlo GATE tranzistoru je přiveden výstupní signál z obvodu 555. Napětím na tomto hradle je řízeno otevírání a zavírání tranzistoru, který zde tedy plní funkci spínače proudu pro vysílací cívku. Výhodou tohoto tranzistoru je integrovaná dioda zapojená paralelně s tranzistorem, která brání v jeho průrazu.

6.2 Obvod sekundární cívky

Sekundární, přijímací, cívka poskytuje napájení pro systém umístěný na kotouči. Vzhledem ke střídavému průběhu napětí indukovaného na cívce, je nutné provést usměrnění. Za účelem usměrnění je do obvodu zařazen můstkový (Grätzův) usměrňovač vytvořený ze čtyřech Schottkyho diod. Schottkyho diody byly zvoleny vzhledem k frekvenci (až 500 kHz) střídavého napětí na vstupu můstku. Za usměrňovač je dále zařazen elektrolytický kondenzátor $C_6 = 330 \mu\text{F}$.

Před Bluetooth modulem je zařazen lineární stabilizátor napětí LF33CDT v pouzdře DPAK. Účelem této součástky je stabilizace napětí na 3,3 V. Dle datového listu je vstupní pracovní napětí stabilizátoru 2,5 V – 16 V. Při překročení dovoleného vstupního napětí 18 V dochází k odpojení výstupu stabilizátoru, což vede i k přerušování napájení měřicího obvodu. Vzhledem k tomuto faktu bylo nutné napájení přizpůsobit tak, aby k přepětí nedocházelo. Pomocí trimru byla vazba upravena tak, aby nedocházelo k indukci příliš velkých napětí na sekundární straně.

6.3 Parametry primární a sekundární cívky

Na obou stranách přenosového systému byly umístěny cívky AWCCA-50N50H od firmy Abracon, které jsou přímo určené pro realizaci bezdrátového napájení. Tyto cívky jsou dostupné s různými hodnotami parametrů. Parametry použitých cívek jsou dle datového listu produktu následující:

Vysílací cívka AWCCA-50N50H40-C02-B		Přijímací cívka AWCCA-50N50H35-C01-B	
Indukčnost (μH)	$6,3 \pm 10 \%$	Indukčnost (μH)	$24 \pm 10 \%$
Q-faktor	$72 \pm 30 \%$	Q-faktor	$160 \pm 30 \%$
SRF (MHz)	5,7	SRF (MHz)	3
Jmenovitý proud (A)	11,1	Jmenovitý proud (A)	5,4
Saturační proud (A)	40	Saturační proud (A)	21
DCR ($\text{m}\Omega$)	$19 \pm 20 \%$	DCR (Ω)	$72 \pm 20 \%$

Tabulka 2 Parametry použitých cívek

Parametry uvedené v datovém listu jsou měřeny pro testovací podmínky: 100 kHz a 1 V, při teplotě 20 °C. [23]

Indukčnost vyjadřuje schopnost cívky protékané proudem vytvářet magnetické pole.

Q-faktor (činitel jakosti cívky) definuje strmost rezonanční křivky.

SRF označuje frekvenci, při které dochází k rezonanci mezi vinutím cívky a její parazitní kapacitou.

Jmenovitý proud označuje efektivní hodnotu stejnosměrného proudu, který způsobí nárůst teploty cívky o definovanou hodnotu. V případě těchto cívek výrobce definoval jmenovitý proud pro nárůst teploty o 40 °C.

Saturační proud označuje efektivní hodnotu stejnosměrného proudu, který způsobí pokles účinnosti o předem definovanou hodnotu. V tomto případě výrobce stanovil takový proud, při kterém poklesne indukčnost o 5 % proti původní hodnotě indukčnosti cívky.

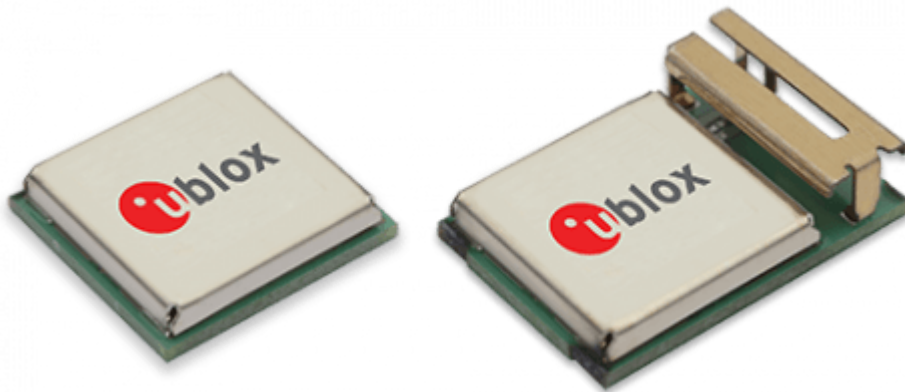
DCR (stejnoseměrný odpor) je parametr vyjadřující závislost odporu cívky na její teplotě. V případě použitých cívek byla cívka testována při teplotách (20 ± 15) °C.

7 Realizace bezdrátového přenosu dat

Bezdrátový přenos dat tvoří druhé podstatné téma této bakalářské práce. Během návrhu byly prostudovány možnosti pro přenos naměřených dat z měřicího systému. Z dostupných možností byla zvolena technologie Bluetooth Low Energy (BLE).

7.1 BLE moduly NINA B-11x-03B

Pro komunikaci s měřicím systémem a přenos dat z něj byly zvoleny dva moduly od firmy u-blox pracující s technologií Bluetooth Low Energy verze 4.2. Oba moduly zahrnují kompletní Bluetooth stack a mikrokontrolér nRF52832. Zvoleny byly především pro jejich nízkou spotřebu energie, což je velmi výhodné v aplikacích s bezkontaktním napájením. Další výhodou, kterou tyto moduly poskytují je jejich malé rozměry a možnost výběru varianty produktu dle antény (integrovaná, či externí). Na obrázku jsou zobrazeny právě tyto dvě varianty produktu.



Obrázek 8 - Bluetooth moduly uBlox

7.1.1 NINA B-111-03B – přijímací modul

Příjem dat z měřicího systému je realizován modulem NINA B-111-03B. Tento modul je vyobrazen na obrázku vlevo. Rozdíl mezi tímto modulem a modulem použitým pro vysílání signálu je v anténě, která na tomto modulu není integrovaná. Po konzultaci na katedře elektromagnetického pole [24] bylo doporučeno navržení speciální antény s kruhovou polarizací. Problematika návrhu speciální antény je řešena v kapitole 7.4 Návrh antény. Pro připojení externí antény má modul k dispozici speciální pin.

7.1.2 NINA B-112-03B – vysílací modul

Na pravé straně obrázku je vyobrazen modul NINA B-112-03B. Tento modul je umístěn na rotujícím kotouči a slouží k vysílání dat ze systému. Na rozdíl od přijímacího modulu obsahuje integrovanou PIFA anténu s lineární polarizací.

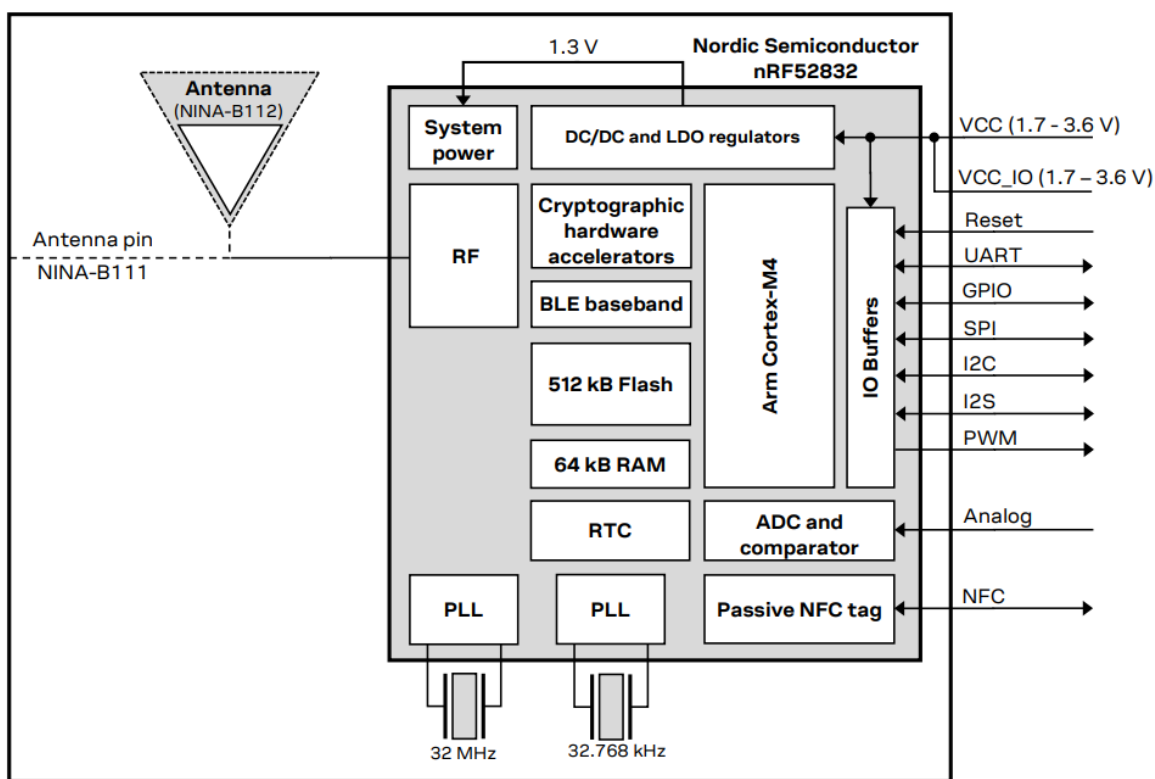
7.2 Parametry modulu NINA B-11x-03B

Jádrem modulů je integrovaný obvod typu SoC (System on Chip) nRF52832 od firmy Nordic Semiconductor. Tento mikroprocesor v sobě integruje jádro Arm Cortex M4, spolu s pamětí FLASH velikosti 512 kB a 64 kB RAM paměti. Radiová část čipu obsahuje 2,4 GHz transceiver.

Zásadní vliv na možnosti využití modulů má jejich nahraný software. Moduly jsou od výrobce dodávány s výchozím firmwarem u-blox connectivity software (uCS). V této softwarové konfiguraci je definováno UART rozhraní, pomocí kterého probíhá základní konfigurace modulů. Dále je k dispozici 7 GPIO pinů.

Paměť modulů s uCS je však možné smazat a implementovat vlastní software. V tomto případě jsou pak k dispozici širší možnosti čipu nRF52832, což zahrnuje devatenáct GPIO pinů, které je možné nastavit jako periferie UART, I2C, SPI, či I2S. Osm z těchto devatenácti pinů je možné také využívat jako analogové. V rámci čipu je k dispozici jeden analogově digitální převodník, jeden analogový komparátor a jeden nízkopříkonový analogový komparátor. [17]

Blokové schéma čipu nrf52832 je zobrazeno na obrázku. [25]



Tabulka 3 Blokové schéma čipu nRF52832

Základní elektrické parametry uvedené v datovém listu [25]:

<i>Napájení</i>				
Symbol	Parametr	Min	Typ	Max
VCC	Vstupní napájecí napětí	1,7 V	3 V	3,6 V
<i>Proudová spotřeba</i>				
Režim	Podmínky	Typická hodnota		
Sleep	No clocks running, no RAM data retention	300 nA		
Sleep	No clocks running, 64 kB RAM data retention	620 nA		
Standby	RTC and 64 kB RAM data retention. System running on 32.768 kHz clock from crystal	2,2 μ A		
Active	Radio RX only	5,4 mA		
Active	Radio TX only, +0dBm output power	5,3 mA		
<i>RF výkon</i>				
Parameter		Typická hodnota		
Citlivost přijímače		- 95 dBm		
Výstupní výkon		+ 4 dBm		

Tabulka 4 Parametry Bluetooth modulu NINA B1

7.3 Návrh antény přijímacího modulu

Parametry použitých modulů jsou dle datového listu následující [25]:

Vysílací modul NINA-B112-03B-00		Přijímací modul NINA-B111-03B-00	
Bluetooth verze	5.0	Bluetooth verze	5.0
Pracovní frekvence	2,4 Ghz, 40 kanálů	Pracovní frekvence	2,4 Ghz, 40 kanálů
Výstupní výkon	+4 dBm	SRF (MHz)	+4 dBm
EIRP	+7 dBm	EIRP	+6 dBm
Citlivost	-95 dBm	Citlivost	-95 dBm
Zisk	2	Zisk	-
Datová rychlost	1 a 2 Mbps	Datová rychlost	1 a 2 Mbps

Tabulka 5 Parametry radiové části modulu NINA B1

Bluetooth modul umístěný na rotující kotouči obsahuje integrovanou PIFA anténu s lineární polarizací. Vzhledem k rotaci tak může nastat problém s příjmem signálu na modul, který má také anténu s lineární polarizací. Veškeré BLE moduly dostupné na trhu však mají integrovanou právě anténu s lineární polarizací.

Z tohoto důvodu byl opatřen modul bez antény a navržena speciální anténa tak, aby byla schopna přijímat signál z rotujícího modulu. Pro tyto účely je velmi výhodné použít anténu s polarizací kruhovou. Polarizace hraje důležitou roli při přenosu informace mezi dvěma zařízeními. Vlivem špatného výběru antény tak může dojít až k úplnému přerušení komunikace. Kruhová polarizace má výhodné vlastnosti především proto, že dovede sledovat změny v natočení lineárně polarizované vlny a umožní tak bezproblémový přenos.

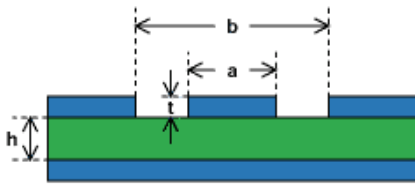
Návrh antény pro přijímací modul byl inspirován z diplomové práce [16]. Anténa byla navržena a simulována v programu CST. Prvotní návrhy byly přímo převzaty z dostupné diplomové práce. Bylo však nutné strukturu upravit pro požadované vlastnosti a přizpůsobit na připojení k modulu.

7.3.1 Struktura antény

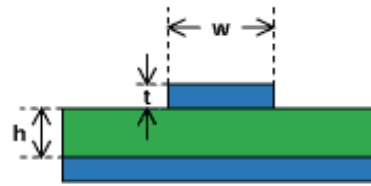
Anténa se skládá ze tří základních částí. První částí struktury je koplanární vedení, které je přímo napojeno na BLE modul. Druhou částí antény je mikropáskové vedení, které navazuje na koplanární vedení a spojuje ho s poslední částí antény, zpoždovacím meandrem, který zajišťuje fázový rozdíl mezi vyzařovanými/přijímanými signály na jednotlivých keramických anténách.

Koplanární vedení je složeno ze tří vodivých desek na jedné straně desky a zemní plochy z druhé strany desky plošného spoje. Používá se také varianta bez zemní plochy. Tohoto vedení se nejčastěji využívá na propojení antény s pinem čipu. [7]

Mikropáskové vedení je otevřené vedení po obou stranách desky. Jedna strana desky je pokovena a tvoří tak zemní plochu vedení. Na druhé straně je vytvořen mikropásek o šířce w . [7]



Obrázek 10 Koplanární vedení, převzato z [27]



Obrázek 9 Mikropáskové vedení, převzato z [27]

Antény s lineární polarizací

Zvoleny byly čipové keramické antény výrobce Johanson Technology pro pásmo 2,4 GHz – 2,5 GHz. Vyzařovací charakteristika a další bližší informace je možné dohledat v datovém listu antén [29].

Výsledná anténa byla vyrobena v domácích podmínkách vyleptáním plošného spoje, společně s obvody přijímacího Bluetooth modulu.

7.3.2 Princip antény

Princip navržené antény spočívá v použití dvou lineárně polarizovaných keramických antén. Tyto dvě antény mezi sebou svírají úhel 90° . Zároveň je důležité vytvořit ve struktuře antény výkonový dělič, který zajistí posun fáze vyzařovaného signálu tak, aby jedna keramická anténa vyzařovala/přijímala vůči druhé signál s fází posunutou o 90° . Tímto způsobem by mělo dojít k vytvoření kruhové polarizace antény.

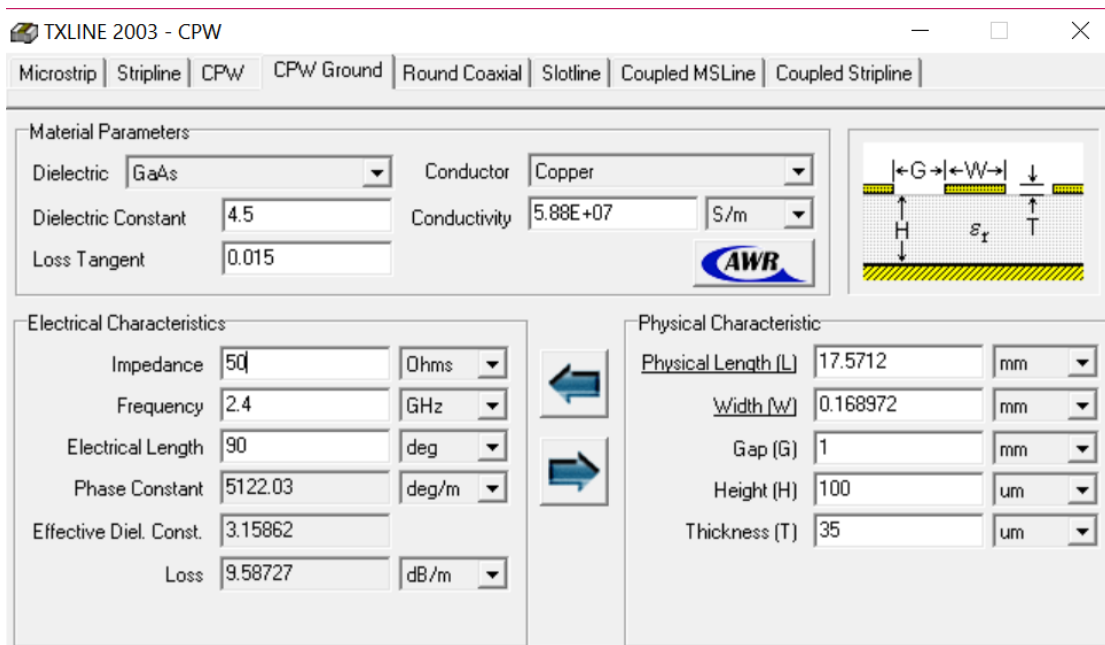
7.3.3 Postup při návrhu

1. Nejprve byla vytvořena základní struktura antény, přičemž rozměry struktury byly částečně vypočteny pomocí programu TX Line a částečně byly převzaty z existující diplomové práce. Na obrázku je vidět výpočet parametrů v programu TX Line. Parametry ovlivňující chování struktury jsou především konstanta dielektrika ϵ a ztrátový činitel $\text{tg}\varphi$ desky plošného spoje, ze kterého je anténa vyrobena. V případě použité DPS jsou parametry následující:

$$\epsilon = 4,5$$

$$\text{tg}\varphi = 0,015$$

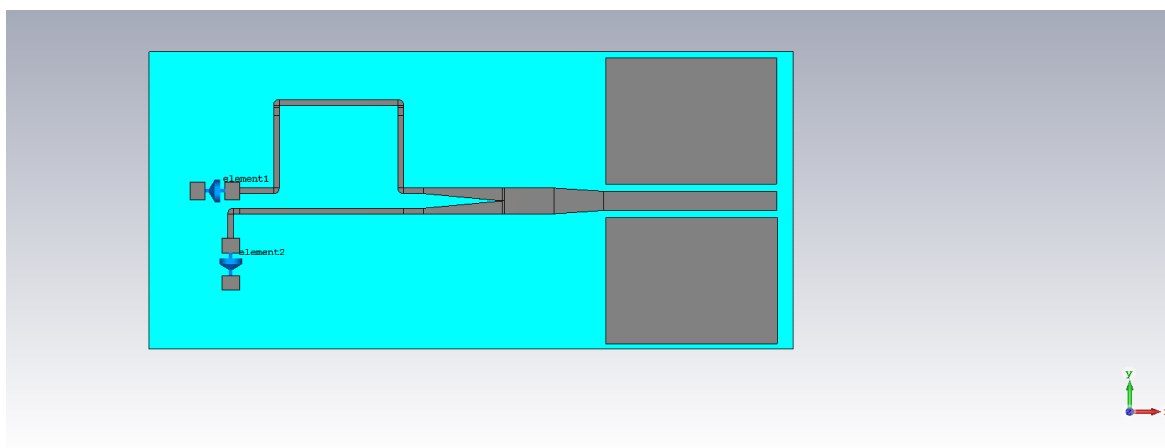
Dále bylo nutné nastavit správnou impedanci, která ovlivňuje impedanční přizpůsobení modulu k anténě. Tato impedance je stanovena na 50Ω , dle hodnoty uvedené v datovém listu modulu NINA-B1. Frekvence přenášeného signálu je rovna 2,4 GHz. Dle zadaných parametrů tedy byla spočtena délka a šířka koplanárního vedení. Analogicky tak byly vypočteny i parametry pro mikropáskové vedení.



Obrázek 11 Pracovní prostředí programu TXLINE

2. Prvotní návrh struktury byl simulován, přičemž první výsledky simulace nebyly příliš uspokojivé. Dalším krokem tedy byla úprava parametrů antény pro požadované výsledky. Doladování antény bylo realizováno úpravou jednotlivých parametrů vytvořeného zpoždovacího meandru. Hlavním cílem bylo získat na výstupu z antény dva signály s fázovým posunem 90° .
3. Poslední fází návrhu již byla výroba samotné antény. Anténa byla připojena na pin ANT přijímacího Bluetooth modulu uBlox NINA - B1 - 111.

Navržená anténa v programu CST



Obrázek 12 Navržená anténa v programu CST

8 Softwarové řešení

Ze softwarového hlediska nabízí výrobce dvě verze modulu. První varianta je dodávána s předem nainstalovaným u-blox connectivity software (uCS), zatímco druhá varianta, otevřená platforma (open CPU), poskytuje vývojáři možnost implementace vlastního softwaru. Má-li modul dostupnou periférii SWD, je možné na čip nahrát vlastní aplikaci, ale také kompletní uCS. Mezi těmito dvěma variantami je tedy možné přecházet.

8.1 uCS

U-blox Connectivity Software umožňuje nastavení Bluetooth modulů pomocí definovaných AT příkazů skrze rozhraní UART. Pro konfiguraci modulu je tedy zapotřebí počítač s USB portem a USB – UART převodník. K účelu práce s modulem nabízí výrobce volně dostupný pomocný software S-center. Tento software poskytuje možnosti běžného terminálu, avšak navíc i prvky pro snazší a rychlejší práci s modulem u-blox. Modul je možné konfigurovat i s použitím běžných terminálových programů, jako například Putty, či Br@y. V rámci vývoje systému byla konfigurace provedena s využitím obou těchto možností.

Bluetooth Classic zahrnuje profil SPP (Serial Port Profile), který zajišťuje vytvoření bezdrátové sériové linky. V rámci standardu Bluetooth Low Energy není obecně definovaný takový profil pro přenos dat. Výhodou firmwaru uCS je možnost propojení zařízení pomocí Bluetooth Low Energy SPS (Serial Port Service), což vykonává obdobnou funkci jako SPP u Bluetooth Classic.

8.1.1 Přehled základních AT příkazů

V rámci výchozího firmwaru modulu jsou definovány AT příkazy pro základní konfiguraci modulu. Přehled všech těchto příkazů je uveden v dokumentu []. Zde jsou uvedeny AT příkazy používané pro práci s měřicím systémem.

Testování správné komunikace s modulem

Příkaz: AT

Odpověď: OK

Nastavení role zařízení

Příkaz: AT + UBTLE = <parametr>

Odpověď: OK

Parametr: volba role zařízení

0: zakázáno

1: role Central

2: role Peripheral (výchozí role zařízení NINA B1)

3: role Central a Peripheral současně

Vyhledávání BLE zařízení v dosahu

Příkaz: AT + UBTD = 4, 1

Odpověď: výpis dostupných zařízení v následujícím formátu

+UBTD:<adresa>,<RSSI>,<název zařízení>,<datový typ>,<data>

Vytvoření ACL (Asynchronous Connection-Less)

Příkaz: AT + UUBTACL = <adresa>

Odpověď: OK

+ UUBTACL:0,0,<adresa>

Vyčtení dostupných služeb (po propojení ACL)

Příkaz: AT + UBTGDP = 0

Odpověď: výpis jednotlivých služeb v následujícím formátu

+UBTGDP: <conn_handle>,<start_handle>,<end_handle>,<UUID>

OK

Vyčtení charakteristik služby

Příkaz: AT + UBTGDCS = <conn_handle>,<start_handle>,<end_handle>

Odpověď: Výpis jednotlivých charakteristik v následujícím formátu

+ UBTGDCS: <conn_handle>,<attr_handle>,<vlastnosti>,<value_handle>,<UUID>

OK

Vyčtení deskriptorů charakteristiky

Příkaz: AT + UBTGDCCD = <conn_handle>, <value_handle>, <service_end_handle>

Odpověď: Výpis dostupných deskriptorů v následujícím formátu

+ UBTGDCCD:<conn_handle>,<value_handle>,<service_end_handle>

OK

Nastavení klientské charakteristiky

Příkaz: AT+UBTGWC=<conn_handle>,<desc_handle>,<config>

Odpověď: OK

Parametr <config>:

0: žádná

1: povolení oznámení (notifications)

2: povolení označení (indications)

3: povolení oznámení a označení

Uložení nastavení

Příkaz: AT&W

Odpověď: OK

Restart zařízení

Příkaz: AT+CPWROFF

Odpověď: OK

Tovární nastavení zařízení

Příkaz: AT+UFACTORY

Odpověď: OK

Vyčtení hodnoty RSSI propojeného zařízení

Příkaz: AT+UBTRSS=<adresa>

Odpověď: +UBTRSS:<RSSI>

OK

V případě neúspěšné operace je odpovědí na příkaz vždy ERROR.

8.2 Open CPU

Druhá varianta produktu vyžaduje implementaci vlastní aplikace, moduly jsou dodávány bez výchozího firmwaru. Výrobce modulů doporučuje k vývoji vlastní aplikace využívat Nordic SDK, Arm Mbed OS nebo Wirepas connectivity software.

8.2.1 Nordic SDK

V rámci této práce bylo využito Nordic SDK. Pojmem Nordic SDK (Software Development Kit) je označen soubor pomocných vývojových prostředků od firmy Nordic Semiconductor. Jedná se tedy o drivery, knihovny, vzorové příklady a dokumentaci, které slouží především k usnadnění tvorby vlastní aplikace pro vývojáře. Soubory SDK jsou volně ke stažení, v podobě .zip souboru, na stránkách Nordic Semiconductor. Vydány jsou v několika verzích. Jednotlivé verze se mezi sebou liší především v podpoře produktů a ve verzích SoftDevice. Tyto pomocné vývojové prostředky jsou volně ke stažení na následujícím odkazu [30].

8.3 Softwarové řešení vysílacího modulu

V rámci SDK je vytvořena podpora pro programy Keil uVision, Segger Embedded Studio a IAR Embedded Workbench. Pro vývoj požadované aplikace bylo zvoleno vývojové prostředí Keil uVision 5, jehož velkou výhodou je bezplatné použití. Jediným omezením je velikost zkompilevaného kódu, který nesmí překročit velikost 32 kB.

Vzhledem k požadavkům vyvíjeného měřicího systému bylo zapotřebí vytvořit dva samostatné programy, jeden pro možnost hodnocení kvality přenosu a druhý pro vyhodnocení parametrů bezkontaktního napájení.

Postup při programování modulu

- 1. Smazání výchozího firmwaru modulu** - Moduly jsou od výrobce dodávány s firmwarem uCS, ten je nutné z modulů smazat.
- 2. Konfigurace pinů modulu** - V rámci SDK jsou definovány vývojové desky firmy Nordic Semiconductor, na které je možné vzorové příklady nahrát. Čip nRF52832 je použit ve vývojové desce PCA10400. Z tohoto důvodu jsou využívány programy vytvořené pro implementaci na tuto vývojovou desku. Obvod vysílacího modulu byl navržen pro práci s uCS, dle datového listu modulu. Konfigurace pinů tedy neodpovídala konfiguraci pinů na desce PCA1040. Bylo tedy nutné modifikovat hlavičkový soubor s definicí pinů *pca10400.h*.
- 3. Modifikace kódu dle požadavků** – Modifikace programu byla realizována prostřednictvím vývojového prostředí Keil uVision 5.
- 4. Nahrání programu do modulu** – Programování modulu bylo provedeno ve vývojovém prostředí Keil uVision 5.
- 5. Nahrání SoftDevice do modulu** – SoftDevice byl do modulu nahrán s využitím programu nRF Connect v podobě souboru .hex. Tento soubor je součástí SDK.

8.3.1 Program pro testování funkčnosti přenosu

Pro vytvoření programu k testování přenosu systému bylo využito „nRF52 SDK v12.3.0“. Tato verze poskytuje podporu čipu nRF52832 a experimentálně také čipu nRF52840. Na rozdíl od předchozích verzí již nenabízí podporu pro produktovou řadu nRF51. SoftDevice S132 v4.0.2 podporuje Bluetooth 4.2. Experimentálně je zde představeno i SoftDevice S140 v5.0.0-2alpha, který podporuje Bluetooth 5.0. Nejnovější verzí SDK je „nRF52 SDK v15.0.0“. Vzhledem k omezení velikosti kompilovaného souboru ve vývojovém prostředí Keil uVision 5, nebylo možné použít vzorový příklad z této verze SDK.

Testovací posloupnost

Prvním cílem bylo generování testovací posloupnosti čísel a přenos jednotlivých hodnot pomocí BLE na přijímací modul. Díky této posloupnosti je možné vyhodnotit správnou funkci přenosu. Posloupnost odesílaná z vysílacího modulu musí být předem známá, aby bylo možné zhodnotit, zda byly hodnoty přeneseny správně.

K těmto účelům bylo využito vzorového příkladu „ble_app_hrs“. Tento program pro měření tepové frekvence v sobě zahrnuje tři služby:

- Heart Rate Service (služba pro měření tepové frekvence)
- Battery Service (služba hodnocení stavu baterie)
- Device Information Service (služba obsahující informace o zařízení)

Společně se SoftDevice je zajištěn přenos hodnot pomocí Bluetooth Low Energy. V rámci programu je definována role zařízení Peripheral. Pro přenos dat je tedy nutné, aby zařízení Central inicializovalo propojení a výčet dat z modulu.

Ve výchozím nastavení, bez modifikace programu, je v rámci programu definována knihovna Sensor Data Simulator, která zahrnuje funkce pro generování simulovaných hodnot.

V rámci této práce je využita služba Battery Service, která díky datovému simulátoru zajišťuje periodické zasílání jednotlivých hodnot v definovaném rozsahu a s definovaným krokem. Modifikace programu probíhala úpravou následujících symbolických konstant (maker bez parametrů), které jsou definovány v řádkách 92 – 94.

```
92 #define MIN_BATTERY_LEVEL          0
93 #define MAX_BATTERY_LEVEL          100
94 #define BATTERY_LEVEL_INCREMENT    1
```

Obrázek 13 Definice parametrů testovací sekvence

Konstanta MIN_BATTERY_LEVEL definuje minimální hodnotu posloupnosti, MAX_BATTERY_LEVEL definuje maximální hodnotu posloupnosti a konstanta BATTERY_LEVEL_INCREMENT definuje krok mezi jednotlivými členy posloupnosti. Zmíněné konstanty lze definovat v rozsahu 0 – 255.

Pro nastavení periody odesílání jednotlivých hodnot je definováno makro BATTERY_LEVEL_MEAS_INTERVAL v řádce 91.

```
91 #define BATTERY_LEVEL_MEAS_INTERVAL APP_TIMER_TICKS(10, APP_TIMER_PRESCALER)
```

Obrázek 14 Definice periody testovací sekvence

Výsledný modifikovaný program je zahrnut mezi přílohy na CD.

8.3.2 Program pro vyhodnocení kvality napájení

Pro hodnocení kvality napájení bylo zapotřebí zajistit odečítání hodnoty napětí z analogového pinu 25 modulu NINA B1 a přenos naměřených dat pomocí BLE. Soubor se zdrojovým kódem použitým pro tuto funkci modulu byl převzat z [28]. Implementace programu probíhala stejným způsobem jako u předchozího programu.

Soubor „ble_app_uart_saadc“, použitý pro vyhodnocování kvality napájení, plní ve výchozí verzi (bez modifikací) následující funkce: snímání hodnoty napětí na 4 různých analogových vstupech mikrokontroleru, možnost vyčítání naměřených hodnot přímo z kontroléru skrze rozhraní UART a přenos snímaných dat pomocí BLE a Nordic Service UART (NUS). NUS představuje bezdrátovou náhradu sériové linky od firmy Nordic Semiconductor.

AD převodník čipu nRF52832

Kontrolér nRF52832 v sobě zahrnuje diferenciální AD převodník, označovaný jako SAADC (Successive Approximation Analog-to-Digital Converter) s rozlišením až 14 bitů. V rámci periférií kontroléru dovoluje použití 8 analogových vstupů. Na vstupu ADC nabízí také využití externího zesilovače s nastavitelným zesílením v rozsahu 1/6 až 4. Další nastavitelnou hodnotou je volba referenčního napětí ADC, v tomto případě jsou k dispozici 2 možnosti: referenční napětí o hodnotě 0,6 V nebo referenční napětí rovno VDD/4.

Modifikace programu pro požadovanou aplikaci

V první řadě není nezbytné snímat a přenášet data ze 4 vstupních analogových pinů. Funkce zajišťující snímání hodnot a jejich přenos mohly být tedy redukovány tak, aby byl využíván pouze 1 vstup. Konfigurace vstupu ADC je realizována využitím registrů *CH[n].CONFIG* ($n=0..7$), kde n značí počet využívaných analogových vstupů. Pro vybraný kanál bylo nastaveny následující parametry:

```
799 | nrf_saadc_channel_config_t channel_0_config =
800 |     NRF_DRV_SAADC_DEFAULT_CHANNEL_CONFIG_SE(NRF_SAADC_INPUT_AIN0);
801 | channel_0_config.gain = NRF_SAADC_GAIN1_4;
802 | channel_0_config.reference = NRF_SAADC_REFERENCE_INTERNAL;
```

Obrázek 15 Modifikace programu SAADC

Na obrázku jsou zobrazeny 4 řádky funkce *saadc_init()*, která vykonává inicializaci kanálů ADC. Pro odečítání napětí na pinu 25 modulu NINA B1 bylo nastaveno zesílení vstupního zesilovače na hodnotu $\frac{1}{4}$ a jako referenční napětí byla zvolena interní reference mikrokontroléru, tedy 0,6V.

Výsledný modifikovaný program je zahrnut mezi přílohy na CD.

8.4 Softwarové řešení přijímacího modulu

Na přijímací straně přenosového systému je modul s výchozím u-blox Connectivity Software. Tato varianta byla zvolena vzhledem k možnosti přehledné a rychlé konfigurace modulu.

8.4.1 Postup při propojování BLE modulů

Za účelem přenosu dat bylo potřeba nastavit ACL propojení mezi moduly. Toto propojení umožňuje přenos s využitím GATT služeb. Na obrázku je zobrazeno terminálové okno programu s-center s příkazy k vytvoření propojení mezi moduly. Použité příkazy jsou popsány v předchozí kapitole.

Propojení modulů je nutné realizovat vždy, když dojde k jeho porušení (odpojení modulu od napájení, reset modulu). V této konfiguraci nedochází k automatickému propojování zařízení. V rámci firmwaru uCS je však možné takové propojení realizovat s využitím SPS (Serial Port Profile). V režim SPS jsou oba moduly v datovém módu a fungují jako bezdrátová alternativa sériové linky – data přivedená na UART_TX pin prvního modulu jsou pomocí BLE přenesena a přivedena na UART_RX pin druhého modulu. Tento způsob komunikace funguje obousměrně. Podmínkou pro vznik tohoto propojení je firmware uCS nahraný v obou modulech.

```

Console Window
AT+UBTLE=1
OK
AT&W
OK
AT+CPWROFF
OK

+STARTUP
AT+UBTD=4,1
+UBTD:C34795E6A3BEr,-56,"NINA_B1_Transmitter",2,02010514094E494E415F42315F5472616E736D6974746572
+UBTD:C34795E6A3BEr,-54,"",1,11079ECADC240EE5A9E093F3A3B50100406E
+UBTD:C34795E6A3BEr,-45,"NINA_B1_Transmitter",2,02010514094E494E415F42315F5472616E736D6974746572
+UBTD:C34795E6A3BEr,-44,"",1,11079ECADC240EE5A9E093F3A3B50100406E
+UBTD:0598A23092A0p,-51,"",2,1EFF060001092002E2DFC6D6D4B2DAA6953AA3EB32C448CF7B078AD32E2C65
+UBTD:05055EB6FFB1p,-84,"",2,1EFF060001092002583933136657C7D7EB22C6F381C21F6CF76C9CAEDD2CC5
+UBTD:0598A23092A0p,-51,"",2,1EFF060001092002E2DFC6D6D4B2DAA6953AA3EB32C448CF7B078AD32E2C65
+UBTD:C34795E6A3BEr,-57,"NINA_B1_Transmitter",2,02010514094E494E415F42315F5472616E736D6974746572
+UBTD:C34795E6A3BEr,-54,"",1,11079ECADC240EE5A9E093F3A3B50100406E
+UBTD:04A3BC107743p,-60,"",2,1EFF060001092002A3E32BDA0D8F3A12A478FE771D92EF11593A47D1CF81E5
+UBTD:C34795E6A3BEr,-45,"NINA_B1_Transmitter",2,02010514094E494E415F42315F5472616E736D6974746572
+UBTD:C34795E6A3BEr,-44,"",1,11079ECADC240EE5A9E093F3A3B50100406E
OK
AT+UBTACL=C34795E6A3BEr
OK

+UBTACL:0,0,C34795E6A3BEr
AT+UBTGDP=0
+UBTGDP:0,1,9,1800
+UBTGDP:0,10,13,1801
+UBTGDP:0,14,65535,6E400001B5A3F393E0A9E50E24DCCA9E
OK
AT+UBTGDCS=0,14,65535
+UBTGDCS:0,15,0C,16,6E400002B5A3F393E0A9E50E24DCCA9E
+UBTGDCS:0,17,10,18,6E400003B5A3F393E0A9E50E24DCCA9E
OK
AT+UBTGDCD=0,18,65535
+UBTGDCD:0,18,19,2902
OK
AT+UBTGWC=0,19,1
OK

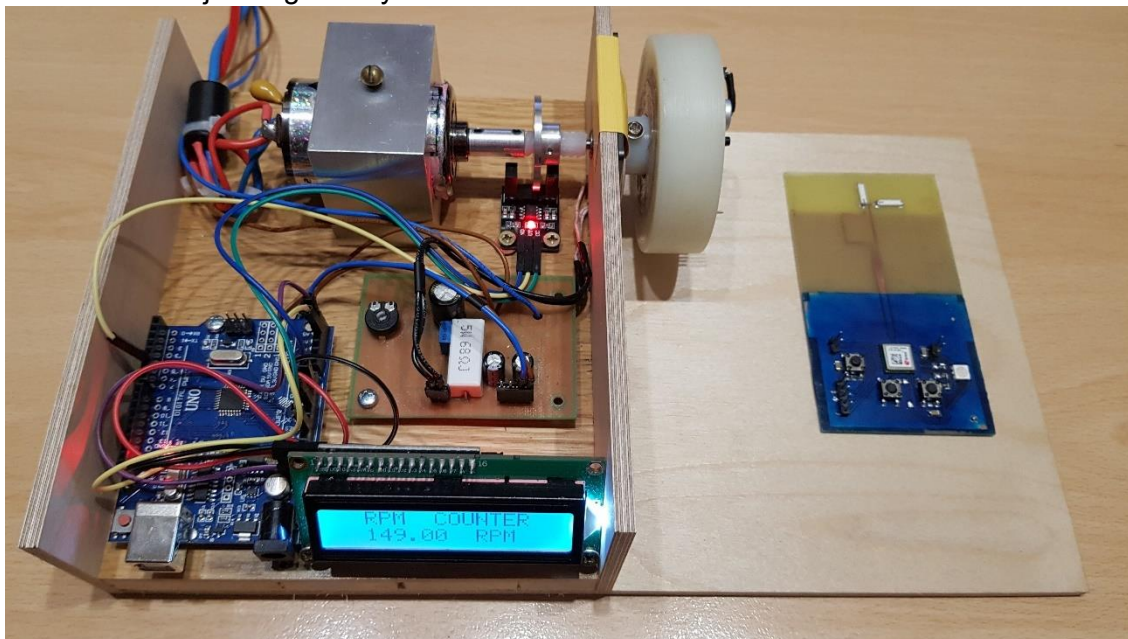
+UBTGN:0,18,6F01
AT+UBTGWC=0,19,0
OK

AT+UBTGWC=0,19,0
  
```

Obrázek 16 Pracovní prostředí programu S-center

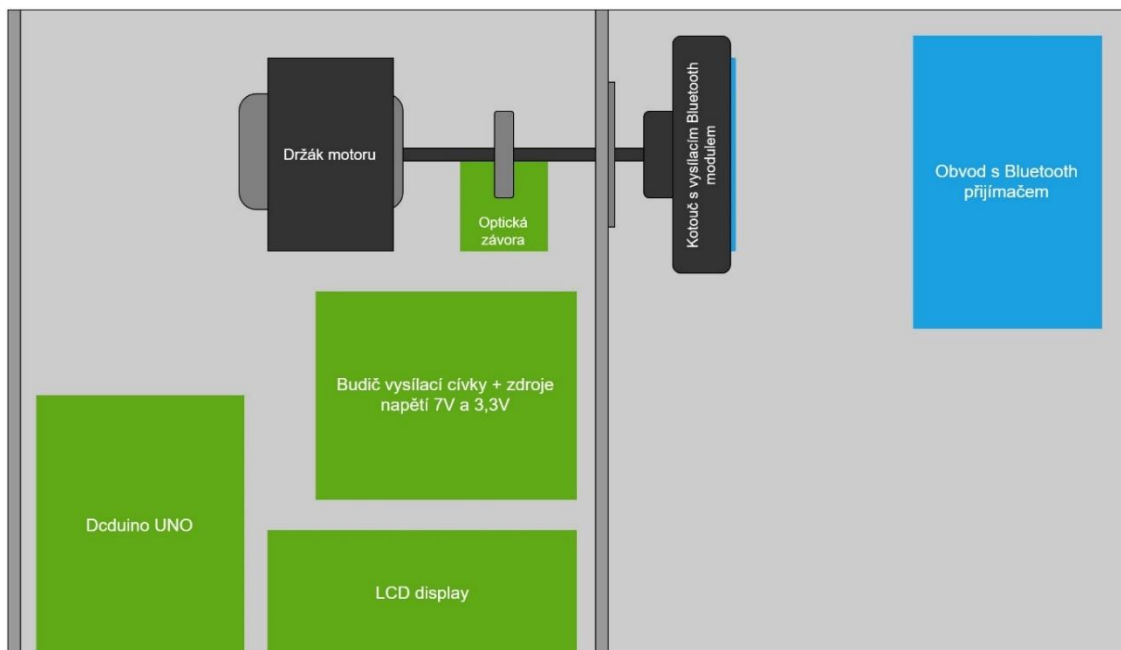
9 Realizace zařízení pro testování systému

Na obrázku 15 je fotografie výsledného zařízení.



Obrázek 17 Fotografie systému

Na obrázku 16 je zobrazeno schéma celého zařízení.



Obrázek 18 Schéma výsledného systému

9.1 Kotouč

Důležitým prvkem celého systému je kotouč, na kterém je umístěna přijímací cívka pro napájení, ale také veškerá elektronika zajišťující přenos dat. Nákres byl vytvořen v programu Autodesk Inventor a je obsažen v příloze práce. Materiálem kotouče je polyamid. Parametry použitého materiálu jsou následující:

- název: Polyamid
- hustota: $1,14 \text{ g.cm}^{-3}$
- hmotnost:

V rámci návrhu je nutné řešit problémy spojené s rotací systému. Jedním problémem je odstředivá síla působící na komponenty umístěné na kotouči. Druhý problém je vyvážení kotouče, jehož absence vede k nežádoucím vibracím a přílišnému mechanickému namáhání kotouče při rotaci. Během sestavování systému byl tento problém zaznamenán. Částečným řešením bylo uchycení hřídele do ložiska. Za tímto účelem byla vytvořena stěna, ve které je zapuštěné ložisko. Zároveň byla tato stěna využita k uchycení vysílací cívky. Dalším možným důvodem vibrací může být nestejně rozložení hmoty na kotouči. Tento problém by mohl být do budoucna řešen přesným vyvážením kotouče.

9.2 DC motor

Parametry motoru:

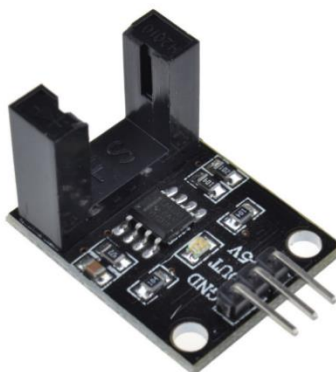
Počet závitů: 27

Průměr hřídele: 3,17mm

Rotaci systému zajišťuje stejnosměrný motor od firmy Carson. Bližší parametry motoru nejsou známy. Regulace otáček motoru je zajištěna změnou jeho napájecího napětí. Celý systém byl vzhledem k mechanickému provedení testován do hodnoty 6 000 otáček za minutu.

9.3 Optická závora

Pro měření rychlosti otáčení bylo zvoleno použití optické závory. Závora byla zakoupena jako hotový modul, který má tři piny: UCC, GND, OUT. Napájení modulu je realizováno připojením na pin 5V DCduina UNO. Výstup z modulu je zpracován také pomocí Dcduina UNO.



Obrázek 19 Optická závora

9.4 Dcduino UNO

K vyhodnocení výstupních signálů optické závory a zobrazení hodnot na display, bylo využito Dcduino UNO. Jedná se o plně kompatibilní klon Arduino UNO. Obecně je Arduino open-source platforma od firmy Atmel. Velkou výhodou je především grafické uživatelské rozhraní a velká nabídka knihoven, což poskytuje rychlý a dostupný způsob vytvoření vlastní aplikace. Firma nabízí několik typů vývojových desek, které se hardwarově liší. Velkou výhodou klonu oproti originálnímu Arduino je především pořizovací cena. Parametry jsou pro obě zařízení stejné.

mikrokontroler – Atmel ATmega328

frekvence hodin – 16 MHz (frekvence kontroleru)

velikost paměti FLASH – 32 kB

počet digitálních I/O pinů – 16

napájecí napětí – 7 V – 12 V

operační napětí – 5 V

převodník UART – USB – CH340

Napájení Dcduina je v rámci systému realizováno z výstupu stabilizátoru 8 V, který je umístěn na navržené desce společně s budičem vysílací cívky a stabilizátorem napětí 3,3 V pro napájení obvodů Bluetooth přijímače.

10 Měření systému

V rámci této kapitoly budou proměřeny následující parametry měřicího systému:

1. Napětí indukované na sekundární cívce
 - závislost mezi budicím napětím primární cívky a indukovaným napětím na sekundární cívce
 - vliv rotace na indukované napětí
 - vliv frekvence na indukované napětí
2. Kvalita přenosu definovaná parametrem RSSI
 - testování definovanou sekvencí při rotaci systému
 - vliv rotace na kvalitu přenosu
 - vliv vzdálenosti vysílače a přijímače signálu

10.1 Měření napětí indukovaného na sekundární cívce

Napětí indukované k napájení měřicího systému bylo měřeno ve dvou stavech. Prvním případem byl stav bez rotace systému. V druhém případě bylo napětí měřeno v závislosti na otáčkách motoru, tedy i rychlosti otáčení měřicího systému. Dále byl testován vliv frekvence na indukční přenos výkonu.

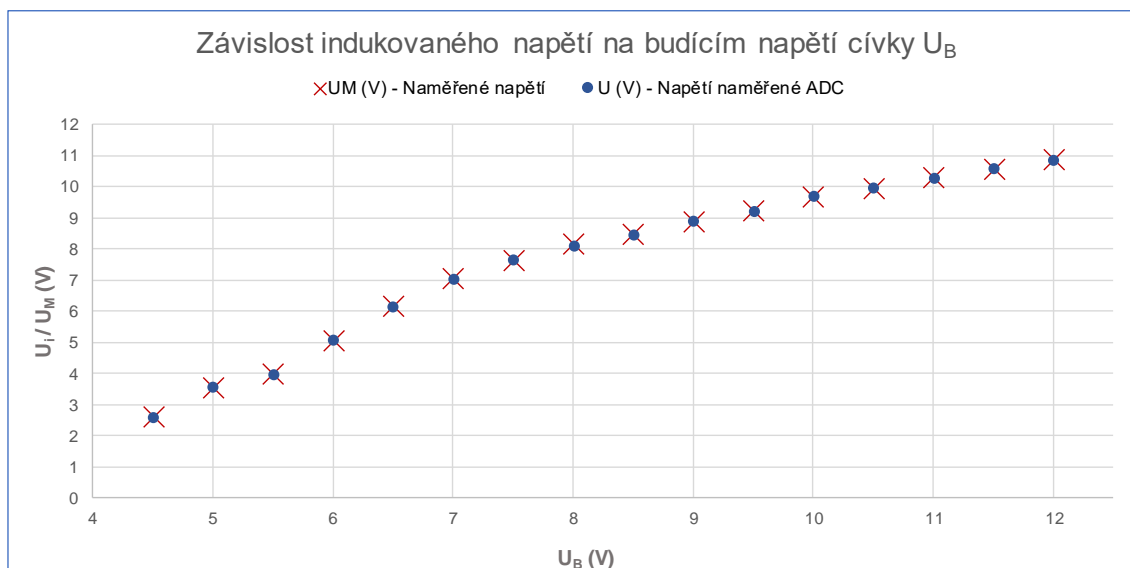
10.1.1 Stav bez rotace

Během tohoto měření bylo snímáno napětí na vstupním pinu stabilizátoru napětí LF33CDT ve stavu bez rotace. Proměřena byla závislost indukovaného napětí na budicím napětí obvodu primární, vysílací, cívky. V tomto stavu byla zároveň ověřena funkčnost snímání a vyhodnocení napětí pomocí použitého Bluetooth modulu. Měření napětí bylo realizováno dvěma způsoby: pomocí digitálního multimetru VOLTcraft VC830 a pomocí modulu NINA B1. V modulu byl nahrán program pro snímání napětí, jehož hodnota byla pomocí integrovaného ADC převedena do digitální formy a s využitím BLE přenesena na přijímací modul. Přijímací modul byl připojen k PC prostřednictvím UART rozhraní a převodníku USB – UART. Přijaté hodnoty byly zobrazeny v programu S-center.

Postup měření

1. Propojení přijímacího modulu s PC pomocí převodníku USB – UART.
2. Připojení voltmetru na vstupní pin stabilizátoru LF33CDT.
3. Propojení Bluetooth modulů pomocí S-center (konfigurace viz. kapitola 8.4.1 Postup při propojování modulů).
4. Odečítání hodnot napětí na voltmetru a přenesených hodnot napětí na PC.

Během měření bylo na zdroji zvedáno budicí napětí primární cívky s krokem 0,5 V.



Vyhodnocení měření

Z grafu je patrné, že hodnoty napětí naměřené měřicím obvodem a přenesené na přijímací obvod odpovídají skutečné hodnotě napětí, měřené multimetrem. Průměrná odchylka hodnot naměřených voltmetrem a hodnot naměřených modulem je ± 16 mV. Během měření nebylo možné zajistit odečítání z přístrojů v identickou chvíli, což mohlo také zapříčinit vznik odchylky.

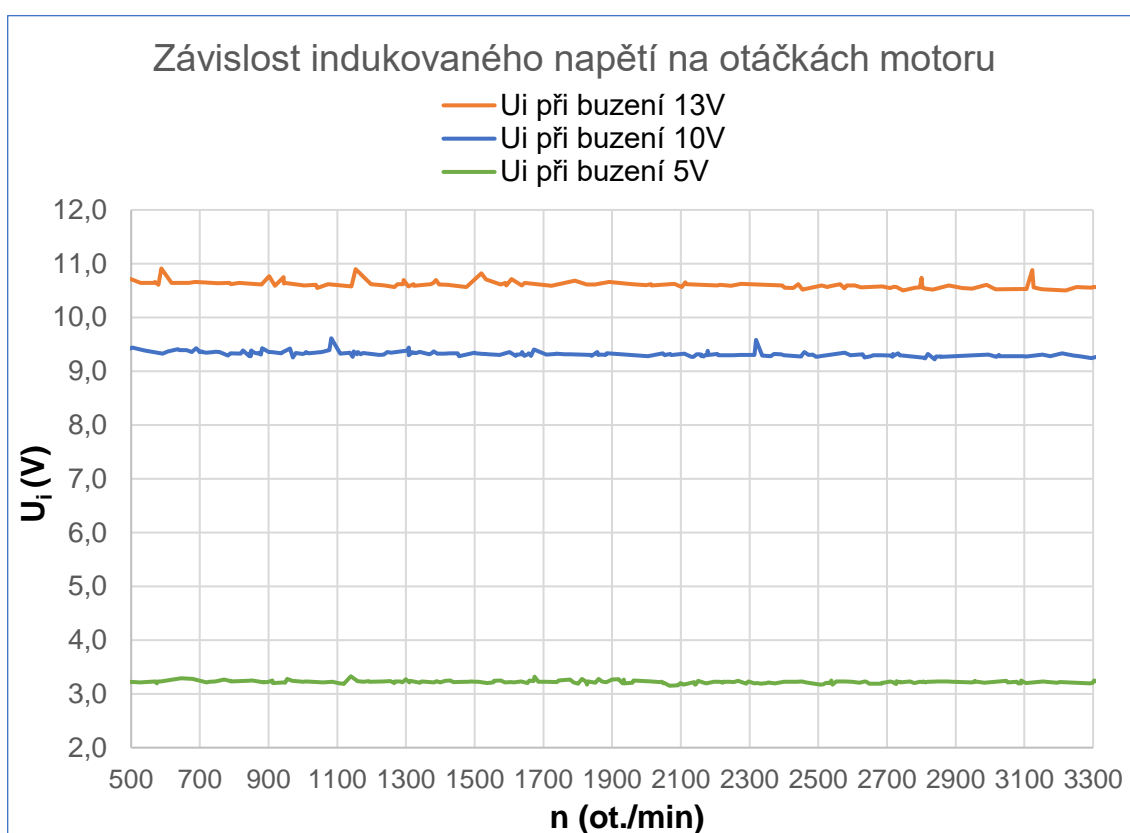
Z grafu je dále patrné, že se vzrůstajícím budícím napětím roste také napětí indukované přijímací cívkou.

10.1.2 Stav s rotací

Při tomto měření bylo snímáno indukované napětí v závislosti na otáčkách motoru. Měření probíhalo pro tři různé hodnoty budicího napětí, a tedy i tři různé hodnoty indukovaného napětí. Výsledné křivky byly vyneseny do grafů. V následujícím grafu jsou vyneseny tři křivky s odlišnou hodnotou budicího napětí (5 V, 10 V a 13 V). V příloze práce jsou pak zahrnuty tyto tři křivky v samostatných grafech, které umožňují detailnější náhled na průběh napětí při rotaci systému.

Postup měření

Postup měření byl stejný jako při měření stavu bez rotace kotouče. Rozdíl byl pouze ve vynechání měření externím multimetrem, které rotace systému neumožňuje (vynechání bodu 2.).



Vyhodnocení měření

Na všech třech křivkách grafu je patrné zvlnění a výskyt občasných napěťových špiček. V tomto zapojení se kondenzátor periodicky nabíjí a vybíjí, což způsobuje určité zvlnění napětí na vstupu stabilizátoru. Frekvence nabíjecích a vybíjecích cyklů kondenzátoru není shodná s frekvencí odečítání hodnot napětí analogově digitálním převodníkem. Odečtená hodnota napětí se tedy nachází pokaždé v jiném místě těchto cyklů.

Vliv rychlosti otáčení se v rozsahu (0 - 3 300) ot./min neprojevil.

10.2 Měření parametrů přenosu dat

Kvalita přenosu dat byla hodnocena ve dvou stavech, při rotaci a bez rotace systému. Prvním měřením bylo testování přenosu mezi moduly testovací sekvencí. Zhodnocení kvality bylo realizováno pomocí parametru přenosu RSSI, který je možné vyčíst pomocí AT příkazu definovaného v rámci softwaru u-blox. Tento parametr byl sledován v závislosti na rotaci systému a dále v závislosti na vzdálenosti mezi přijímacím a vysílacím modulem.

10.2.1 RSSI (Received Signal Strength Indication)

RSSI představuje parametr, který definuje výkon signálu přijatý anténou. Síla signálu je závislá na vzdálenosti vysílacího a přijímacího zařízení a výkonnosti vysílací části systému. Definice parametru RSSI je vždy závislá na výrobci zařízení. Neexistuje standardizovaný vztah mezi RSSI a jinou fyzikální veličinou. [18]

U výrobce modulů, firmy u-blox, se hodnota RSSI pohybuje typicky v rozmezí -20 až -100 dBm. Čím blíže je hodnota 0, tím větší je síla signálu. Typicky hodnota RSSI klesá s rostoucí vzdáleností vysílací a přijímací části systému.

V rámci firmwaru uCS je RSSI udáváno v dBm.

Parametry měření RSSI u modulu u-Blox NINA B1, dle datového listu [17]:

platný rozsah $RSSI_{AC}$	(-90 dBm až -20 dBm) \pm 2 dB
rozdílení $RSSI_{RESOLUTION}$	1 dB
vzorkovací perioda $RSSI_{PERIOD}$	0,25 μ s

10.2.2 Testování přenosu dat

Za účelem testování funkčnosti přenosu byla mezi moduly zasílána posloupnost čísel 0 až 100. Cyklicky se opakovalo přičítání čísla 1 do dosažení 100, po čemž následovalo odečítání 1 zpět k nule. Tato číselná posloupnost umožnila snadnou kontrolu funkčnosti přenosu. Posloupnost byla zasílána s frekvencí 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz a 1000 Hz ve stavu bez rotace a s rotací systému. V modulu byl nahrán program, který zajistil cyklické zasílání frekvence.

Postup měření

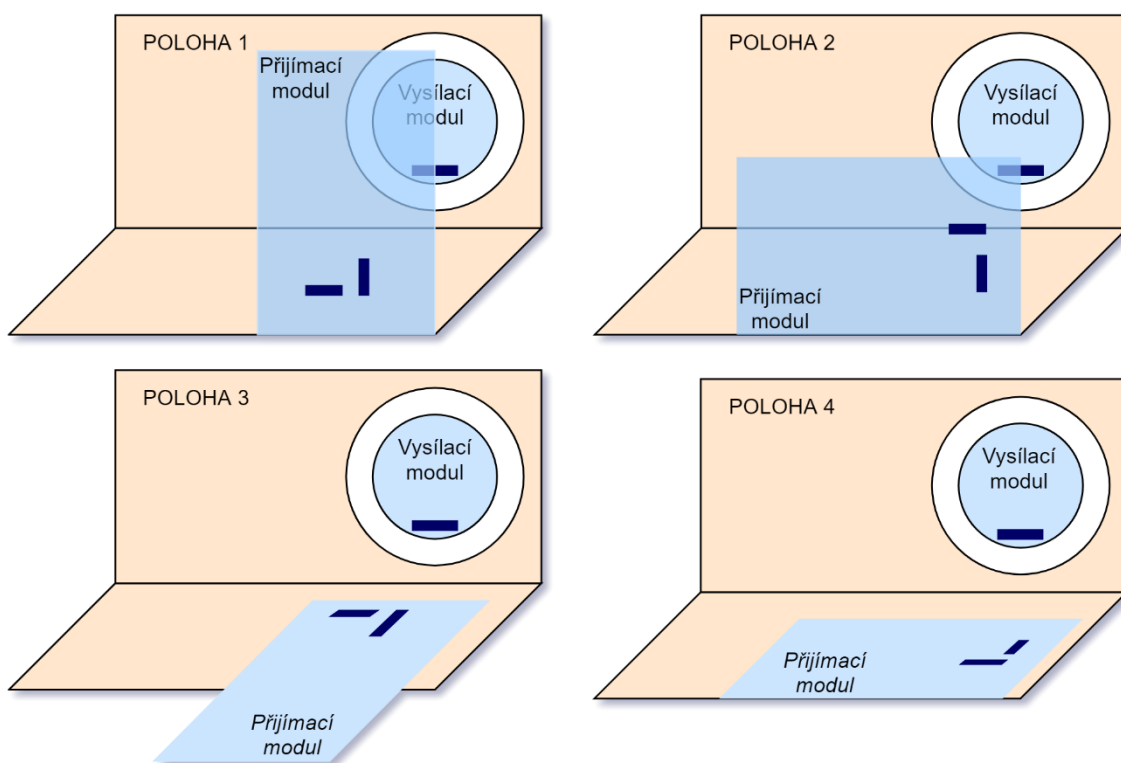
1. Propojení přijímacího modulu s PC pomocí převodníku USB – UART.
2. Propojení Bluetooth modulů pomocí S-center (konfigurace viz. kapitola 8.4.1 Postup při propojování modulů).
3. Odečítání přenesených hodnot na PC.
4. Porovnání odesílané a přijímané posloupnosti.

Vyhodnocení měření

Přenos posloupnosti mezi moduly byl vždy úspěšný při všech zmíněných frekvencích zasílání v obou stavech systému. Rotace tedy neměla vliv na funkčnost přenosu.

10.2.3 Měření kvality přenosu dat v závislosti na poloze modulů

Během tohoto měření byl otestován vliv vzájemné polohy modulů na parametr RSSI. Polohy, pro které byl stav vyčítán jsou zobrazeny na obrázku (17). Tmavě modré obdélníky zde vyznačují antény modulů. Pro toto měření je irelevantní, jaký program je právě nahrán v modulu. Jedinou podmínkou je možnost propojení modulů. V obou programech používaných v této práci je nastaven vysílací výkon modulů na hodnotu 0 dBm.

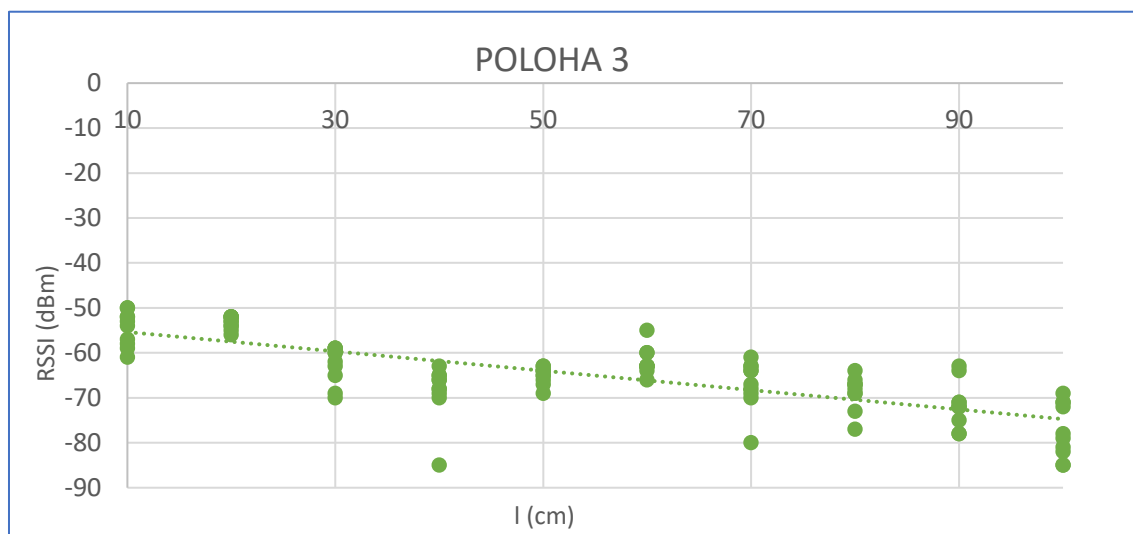
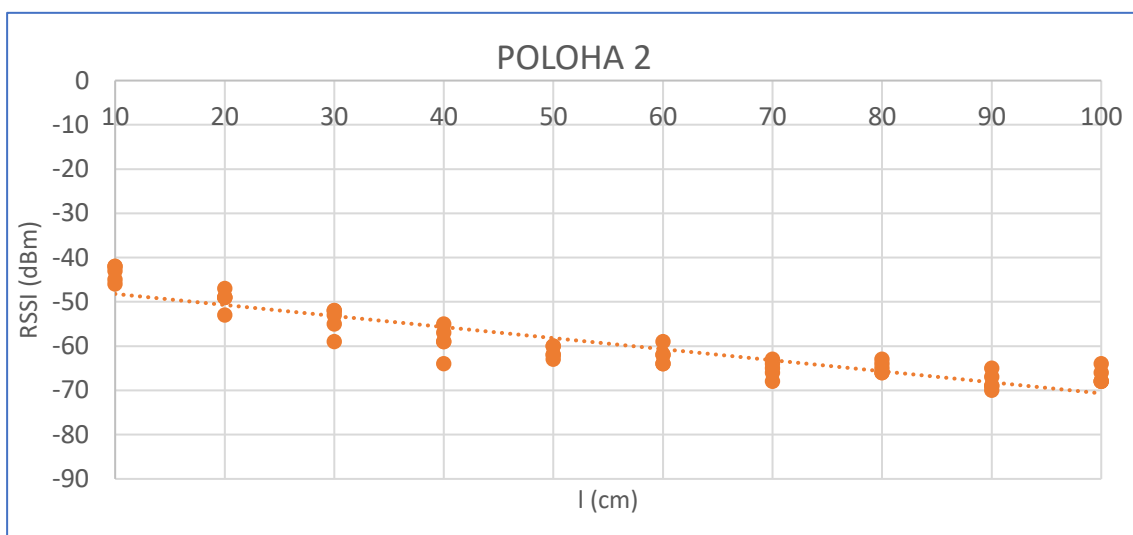
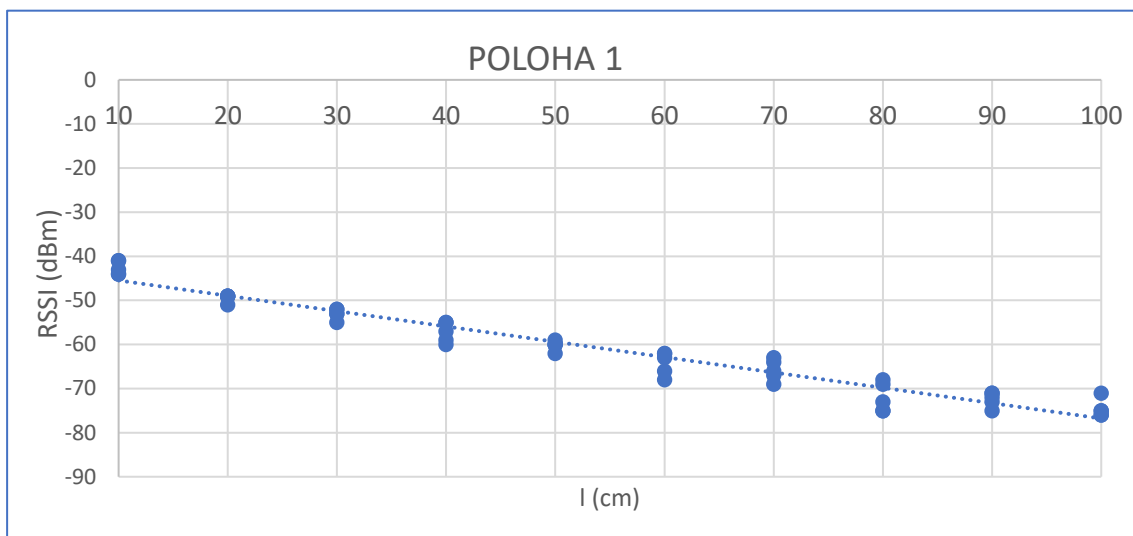


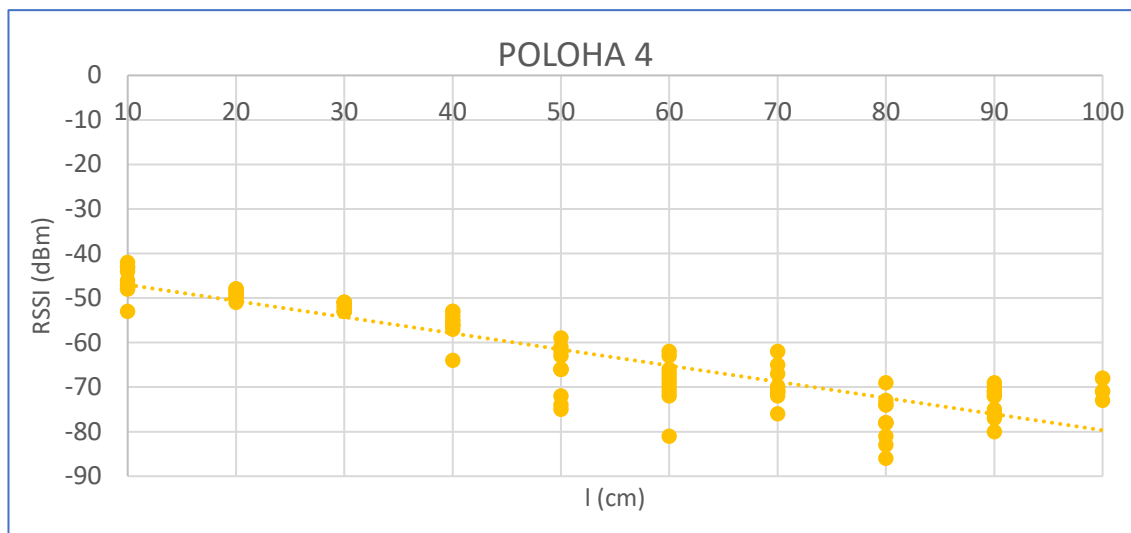
Obrázek 20 Polohy při měření kvality

Postup měření

1. Propojení přijímacího modulu s PC pomocí převodníku USB – UART.
2. Propojení Bluetooth modulů pomocí S-center (konfigurace viz. kapitola 8.4.1 Postup při propojování modulů).
3. Nastavení přijímacího modulu do pozice pro měření.
4. Vyčítání hodnot RSSI pomocí PC.

Měření bylo provedeno pro vzdálenost (10-100) cm od vysílacího modulu s krokem 10 cm pro každou uvedenou polohu.





Vyhodnocení

Ze všech grafů je patrný klesající trend křivek, tudíž i klesající síla signálu v závislosti na vzdálenosti vysílacího a přijímacího modulu. Dále je v grafech viditelný vliv vzájemné polohy modulů. Nejlepší výsledky jsou patrné u polohy 2, kdy RSSI i přes vzdálenost 100 cm neklesá pod -70 dBm. Obecně lze říci, že v poloze 1 a 2 dosahuje lepších výsledků. Tento výsledek se dal očekávat vzhledem k vyzařovacím charakteristikám antén, viz. datové listy modulu NINA B1 [25] a antén integrovaných v rámci speciální antény [29].

10.2.4 Měření kvality přenosu v závislosti na rotaci systému

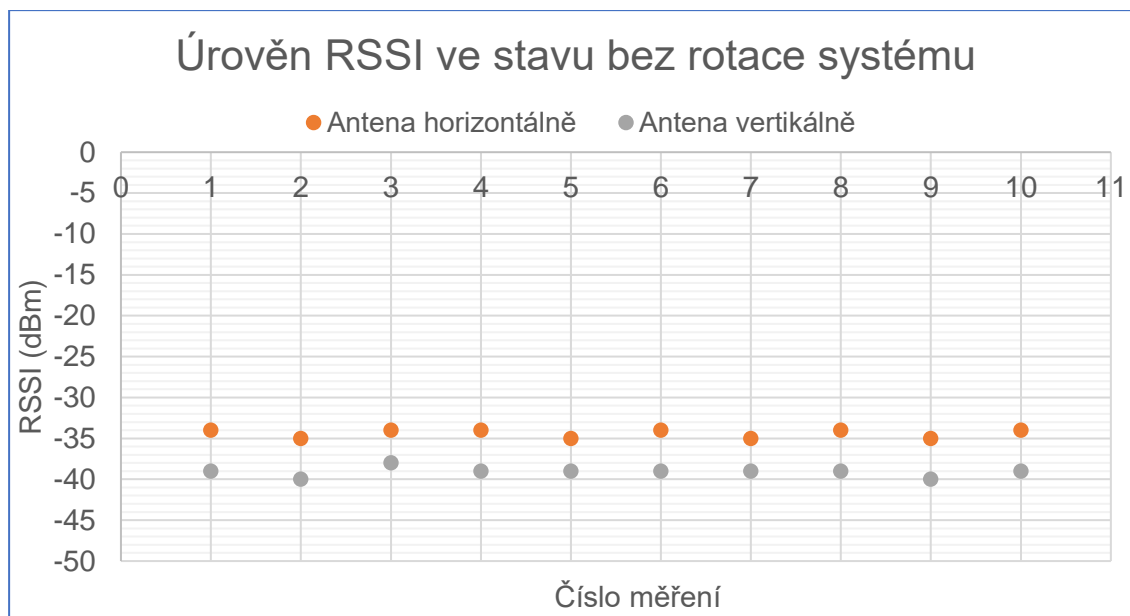
V rámci tohoto měření byl opět porovnáván rozdíl mezi stavem, kdy zařízení rotuje a stavem bez rotace. Dle předchozího měření byla zvolena vzájemná poloha číslo 2, vzhledem k nejlepším výsledkům při přenosu. Moduly byly od sebe umístěny ve vzdálenosti 5 cm.

Postup měření

1. Propojení přijímacího modulu s PC pomocí převodníku USB – UART.
2. Připojení Dcduino UNO k PC.
3. Propojení Bluetooth modulů pomocí S-center (konfigurace viz. kapitola 8.4.1 Postup při propojování modulů).
4. Vyčítání hodnot RSSI a rychlosti otáčení pomocí PC.

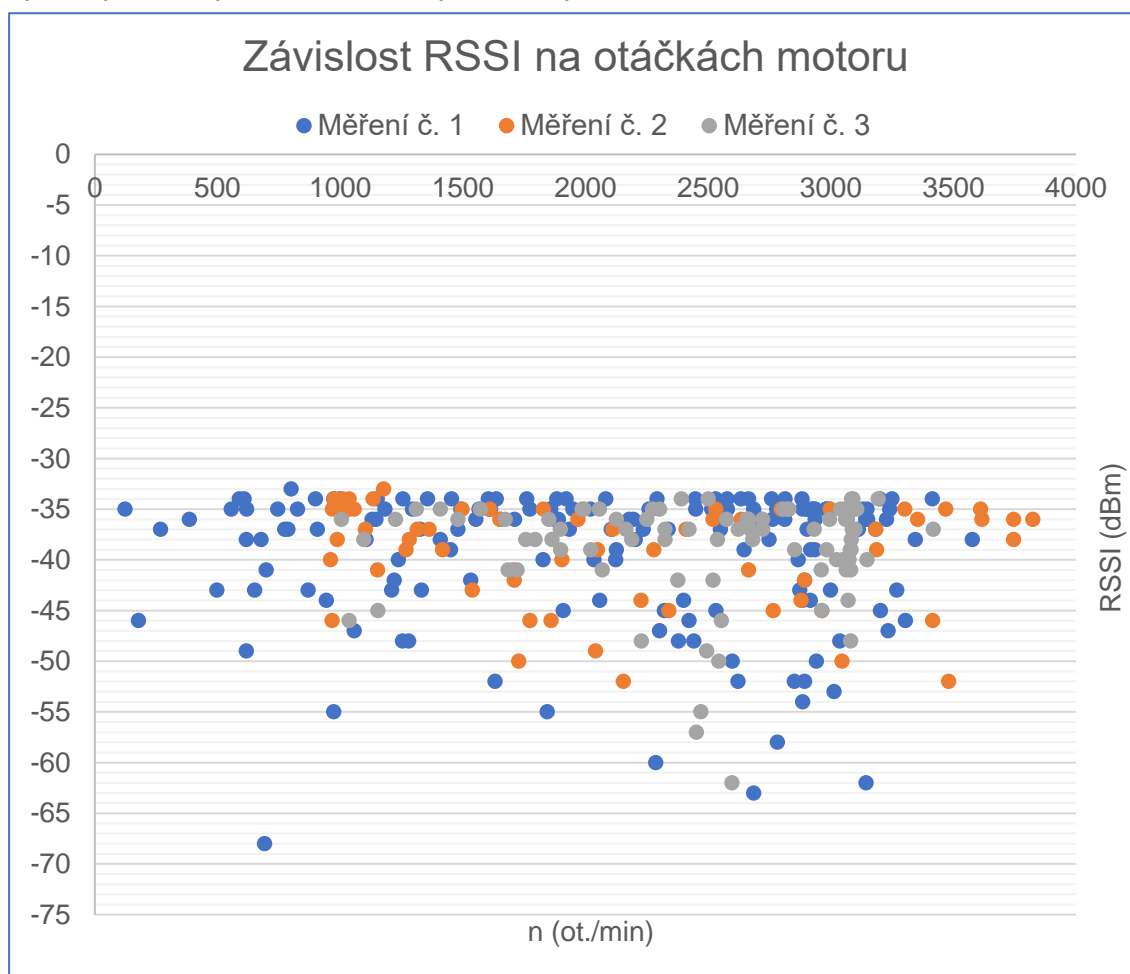
Stav bez rotace

Toto měření probíhalo bez rotace systému. Moduly byly vůči sobě v poloze číslo 4, ve vzdálenosti 5 cm. Měření bylo navíc provedeno pro 2 odlišné polohy modulu umístěného na kotouči. Vždy bylo zaznamenáno 10 hodnot parametru RSSI.



Stav s rotací

Během tohoto měření bylo systémem rotováno v rozsahu (0 – 4 000) ot./min. Regulace otáček byla prováděna postupným zvyšováním/snižováním napětí na zdroji napájecím elektromotor. Hodnota otáček systému byla pomocí Dcduino vyčítána na PC na terminálovém okně programu Arduino IDE. Zároveň se snímáním rychlosti otáčení byly vyčítány hodnoty RSSI. Měření bylo pro zvýšení přesnosti provedeno 3x.



Vyhodnocení

Z prvního grafu je patrné, že hodnota RSSI ve vzdálenosti modulů 5 cm činí -35 dBm až -40 dBm, přičemž hraje roli, v jakém nastavení je vysílací anténa vůči anténě přijímací. V horizontální úrovni vysílací antény dosahuje přenos lepších parametrů než pro úroveň vertikální. Z druhého grafu je patrný vliv otáček na parametr RSSI. Hodnota parametru není konstantní, ale kolísá v rozsahu -33 dBm až -68 dBm. Tento jev mohl být zapříčiněn algoritmem vyhodnocujícím hodnotu parametru RSSI vzhledem k nestandardním podmínkám při jeho měření.

11 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo vytvoření měřicího systému, který je schopen samostatně fungovat a komunikovat s okolím při své rotaci. Bylo tedy nutné vyřešit 2 problémy: bezkontaktní napájení systému a přenos dat z tohoto systému.

První fází návrhu tedy bylo prostudování možností v oblastech bezkontaktního napájení a datového přenosu. Pro bezkontaktní napájení byla zvolena technologie indukční vazby, pro datový přenos byla zvolena technologie Bluetooth Low Energy.

K realizaci bezkontaktního napájení byly pořízeny 2 cívky. Aby došlo k vytvoření indukční vazby mezi nimi, byl navržen obvod buzení primární cívky. K realizaci datového přenosu bylo potřeba sehnat dva Bluetooth Low Energy moduly, mezi kterými bude probíhat komunikace. Po prostudování nabídky zařízení dostupných na trhu, byly zvoleny moduly od firmy u-blox. Dalším krokem byl návrh schémat a vytvoření desek plošných spojů.

Ze softwarového hlediska bylo nutné naprogramovat vysílací moduly tak, aby plnily požadovanou funkci. Měřicí systém je schopen snímat hodnotu napětí indukovaného při bezkontaktním napájení, což poskytuje možnost hodnocení tohoto způsobu přenosu energie při rotaci.

Poslední fází návrhu byla mechanická část, kdy byla sjednocena soustava zajišťující rotaci systému, soustava bezkontaktního napájení a přijímací a vysílací modul. Bylo tak vytvořeno jedno výsledné zařízení.

V rámci bakalářské práce bylo dosaženo následujících výsledků:

- Byl navržen a realizován měřicí systém, který je bezkontaktně napájen a je schopen datového přenosu.
- Byly proměřeny parametry spojené s bezkontaktním napájením a datovým přenosem ve stacionárním stavu, ale také za účelem vyhodnocení vlivu rotace na tyto parametry.

Z výsledků měření je patrné, že rotace (maximální hodnota 4 000 ot./min), neovlivňuje funkčnost přenosu energie indukční vazbou. Ani funkčnost přenosu dat z Bluetooth modulu není vlivem rotace narušena. Pouze pro parametr RSSI bylo zjištěno ovlivnění hodnoty při rotaci systému.

Původně bylo zamýšleno testovat systém i při vyšších otáčkách (až 10 000 ot./min), avšak vzhledem k mechanickému provedení byla nastavena hranice 4 000 otáček za minutu. Již při těchto otáčkách dochází ke značným vibracím celého zařízení. Pro vyšší otáčky by zároveň bylo vhodné vyřešit fixaci součástí na DPS. Možným řešením by bylo zalití DPS epoxidem. Tato varianta by však znemožnila používání tlačítek připojených k modulu. V rámci budoucího rozšíření by tedy bylo vhodné vyřešit mechanickou část zařízení pro zpřístupnění možnosti testování i pro vyšší otáčky.

12 Zdroje

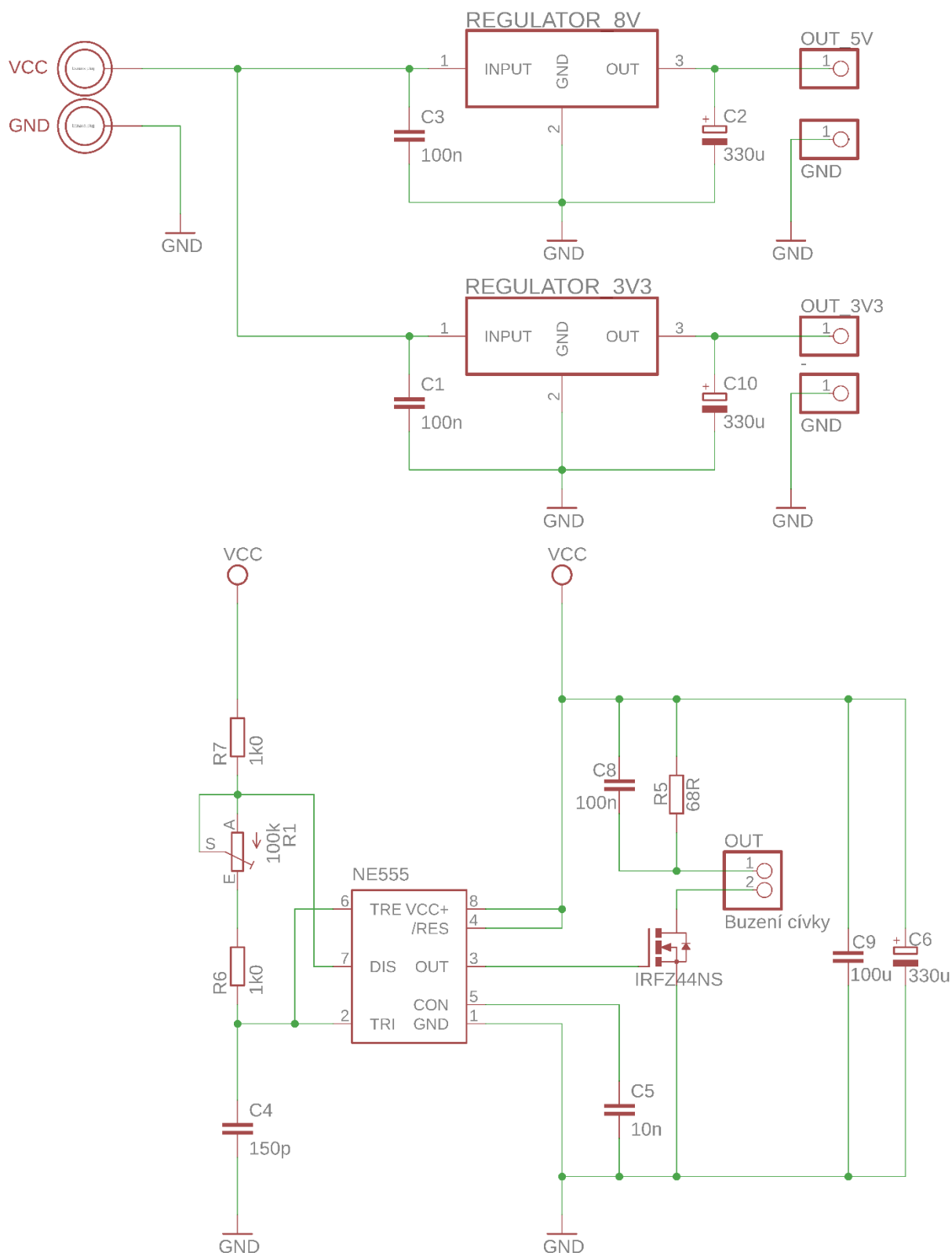
- [1] Ali Abdolkhani (June 29th 2016). Fundamentals of Inductively Coupled Wireless Power Transfer Systems, Wireless Power Transfer Eugen Coca, IntechOpen, DOI: 10.5772/63013.
Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/wireless-power-transfer-fundamentals-and-technologies/fundamentals-of-inductively-coupled-wireless-power-transfer-systems>
- [2] HEYDON, Robin. *Bluetooth Low Energy: The developer's handbook*. Crawfordsville: Prentice Hall Pearson Education, 2012. ISBN 978-0-13-288836-3.
- [3] REICHL, Jaroslav. *RLC obvody* [online]. 2006,1-9 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: http://www.jreichl.com/fyzika/vyuka/texty/rlc_obvody.pdf
- [4] PRAUS, Petr. *Fyzika II: Elektromagnetická indukce* [online]. , 1-28 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://lynette.natur.cuni.cz/~zl/FyzikaII/FyzikaII- elektromagneticka-indukce.pdf>
- [5] JIŘÍČEK, Zbyněk. *NÁVRH ANTÉNNÍHO SYSTÉMU S KRUHOVOU POLARIZACÍ PRO KMITOČTOVÉ PÁSMO 2,4GHz* [online]. Brno, 2008 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://dSPACE.vutbr.cz/handle/11012/26397?show=full>. Diplomová práce. VUT Brno.
- [6] FARAHANI, Shanin. *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. 2011. ISBN 9780080558479.
- [7] NOVOTNÝ, Karel. *Vlny a vedení: přednášky*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03317-1.
- [8] RF Wireless World. What is ANT+? [online]. [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/ANT-basics.html>
- [9] Cross-Layer Design of Coded Multicast for Wireless Random Access Networks [online]. , 11 [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: <https://www.dtc.umn.edu/s/resources/jsac2011dec.pdf>
- [10] SHIDUJAMAN, Mohammad, Hooman SAMANI a Mohammad ARIF. Wireless power transmission trends [online]. IEEE, 2014, 2014, , 1-6 [cit. 2019-01-08]. DOI: 10.1109/ICIEV.2014.6850770. ISBN 978-1-4799-5180-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6850770/>
- [11] EE Times. Bluetooth 4.0: An introduction to Bluetooth Low Energy—Part II [online]. [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1278966

- [12] Wireless Power Consortium. WPC [online]. [cit. 2019-01-08].
Dostupné z: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/about/about-wpc>
- [13] DAVIDSON, Robert, Carles CUFÍ, Akiba a Kevin TOWNSEND. Getting Started with Bluetooth Low Energy. O'Reilly Media, 2014. ISBN 9781491900550.
- [14] Wikiwand. Wireless power transfer [online]. [cit. 2019-01-08].
Dostupné z: [http://www.wikiwand.com/en/Wireless_power_transfer#/Near-field_\(nonradiative\)_techniques](http://www.wikiwand.com/en/Wireless_power_transfer#/Near-field_(nonradiative)_techniques)
- [15] Texas Instruments. NE555: datový list [online]. [cit. 2019-01-08].
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf>
- [16] MAHMOUD, Mahmoud Shuker a Auday A. H. MOHAMAD. A Study of Efficient Power Consumption Wireless Communication Techniques/ Modules for Internet of Things (IoT) Applications. Advances in Internet of Things [online]. 2016, 06(02), 19-29 [cit. 2019-01-08]. DOI: 10.4236/ait.2016.62002. ISSN 2161-6817.
Dostupné z: <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/ait.2016.62002>
- [17] Nordic Semiconductor. NRF52832 Product Specification: Produktová specifikace [online]. [cit. 2019-01-08].
Dostupné z: http://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52832_PS_v1.4.pdf
- [18] GAO, Vincent. Bluetooth. Proximity And RSSI [online]. 2015 [cit. 2019-01-08].
Dostupné z: <https://blog.bluetooth.com/proximity-and-rssi>
- [19] Magnetic Induction. [online]. [cit. 2019-01-08].
Dostupné z: <http://www.pas.rochester.edu/~cline/P114/>
- [20] Elektřina a magnetizmus: XI. Indukčnost a magnetická energie [online]. [cit. 2019-01-08].
Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/elmg/kurz_11_coil.pdf
- [21] Konzultace s Ing. Adamem Bouřou, Ph.D., v rámci konzultace bylo poskytnuto schéma přípravku bezkontaktního přenosu energie
- [22] SAADC — Successive approximation analog-to-digital converter [online]. In: . [cit. 2019-01-08].
Dostupné z: <http://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fcom.nordic.infocenter.nrf52832.ps.v1.1%2Fsaadc.html>
- [23] Abracon. AWCCA-50N50: datový list [online]. [cit. 2019-01-08].
Dostupné z: <https://abracon.com/Magnetics/wireless/AWCCA-50N50.pdf>

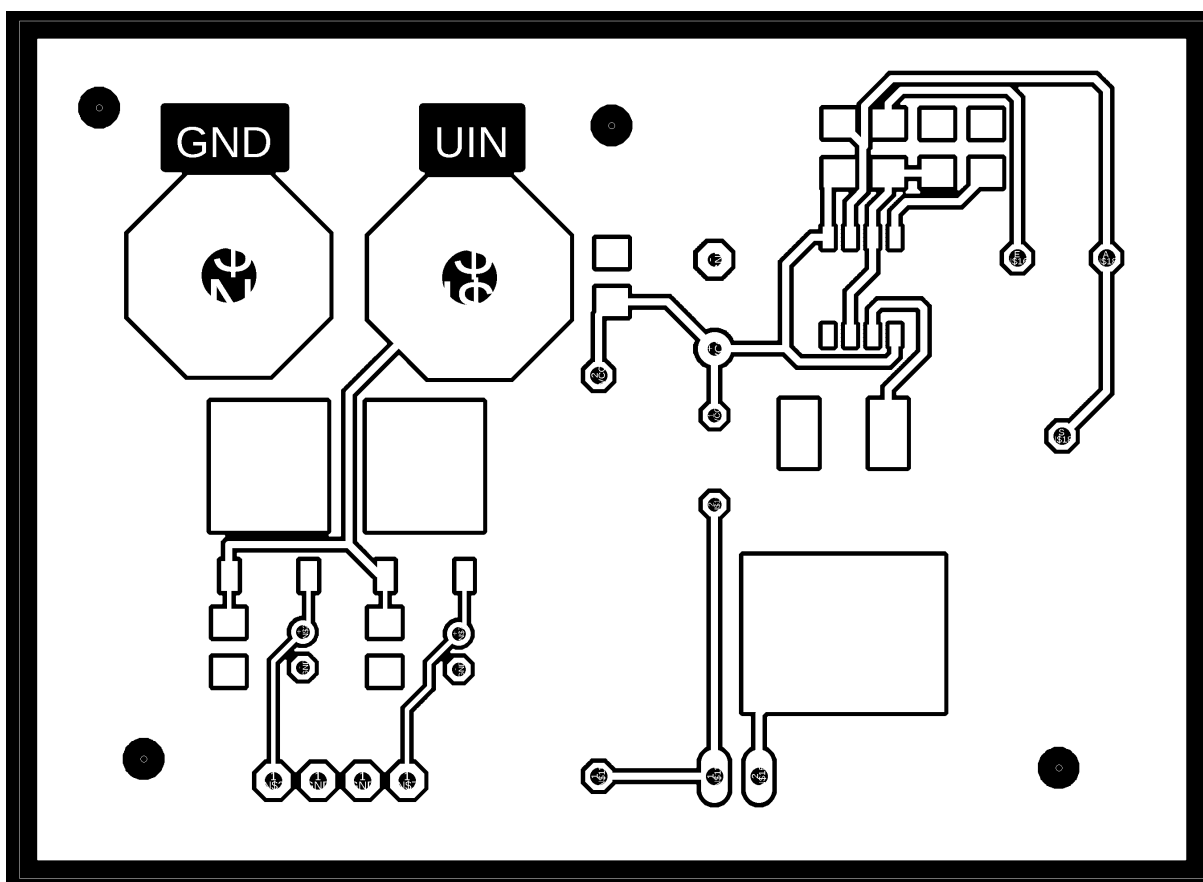
- [24]
Konzultace návrhu kruhově polarizované antény s Ing. Milanem Švandou,
Ph.D. z katedry elektromagnetického pole.
- [25]
u-blox. NINA-B1 series: datový list [online]. [cit. 2019-01-08].
Dostupné z: https://www.u-blox.com/sites/default/files/NINA-B1_DataSheet_%28UBX-15019243%29.pdf
- [26]
Bluetooth low energy Characteristics, a beginner's tutorial [online]. 2016 [cit. 2019-01-08].
Dostupné z: <https://devzone.nordicsemi.com/tutorials/b/bluetooth-low-energy/posts/ble-characteristics-a-beginners-tutorial>
- [27]
Maxim integrated. Introduction to Common Printed Circuit Transmission Lines: Application note 2093 [online]. [cit. 2019-01-08].
Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/2093>
- [28]
Příklady kódu s ADC pro čip nRF52832, dostupné z:
<https://github.com/NordicPlayground/nRF52-ADC-examples>
- [29]
Johanson Technology, P/N 2450AT45A100: datový list [online]. [cit. 2019-01-08].
Dostupné z:
http://www.farnell.com/datasheets/1668986.pdf?_ga=2.150158198.1779715740.1546916401-1019154325.1541685585
- [30]
nRF52 SDK [online]. [cit. 2019-01-08].
Dostupné z: https://developer.nordicsemi.com/nRF5_SDK/

Příloha A – Výrobní podklady

Budič cívky + zdroje pro napájení - schéma



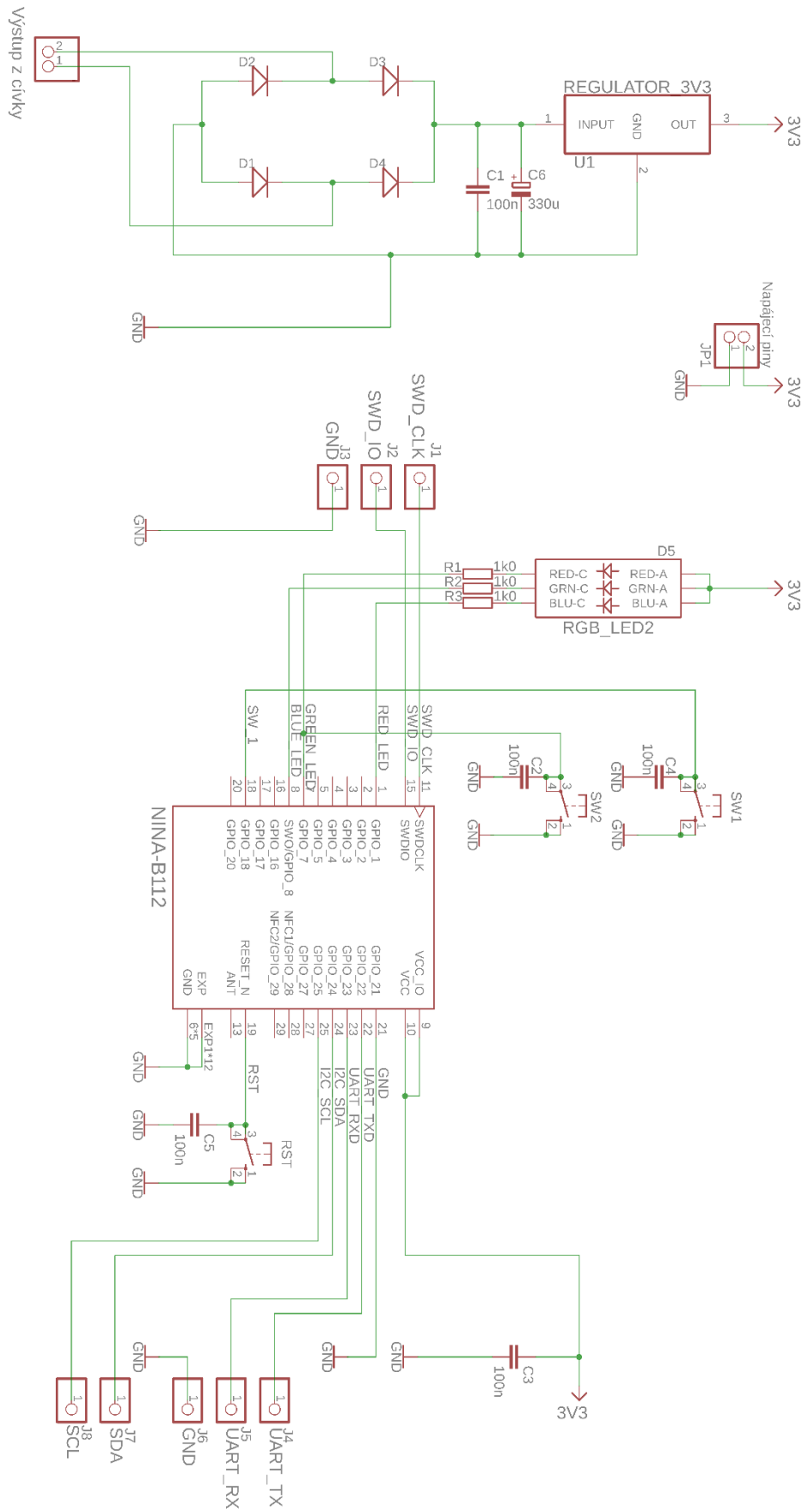
Budič + zdroje pro napájení – DPS



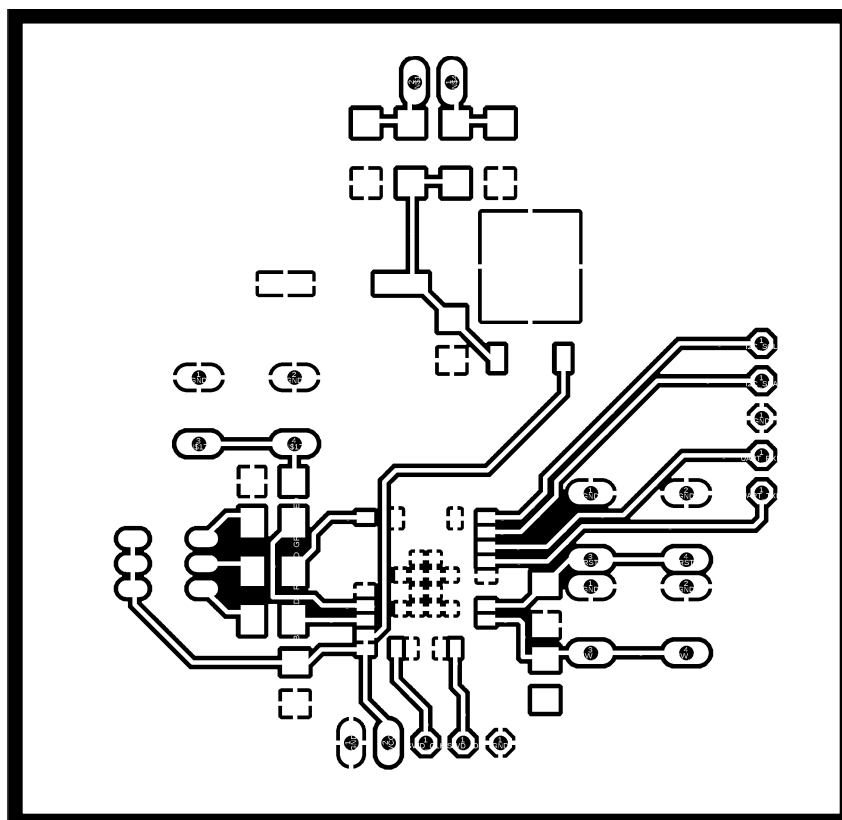
Budič + zdroje pro napájení - Seznam součástek

Součástka	Název	Hodnota	Pouzdro
Stabilizátor napětí 3,3 V	U1	LF33CDT	DPAK
Stabilizátor napětí 8 V	U2		DPAK
Kondenzátor	C1, C3, C8	100 nF	1206
Kondenzátor	C2, C6, C10	330 uF, elektrolytický	F
Kondenzátor	C5	10 nF	1206
Kondenzátor	C4	150 pF	1206
Tranzistor	T1	IRZF44N	D2PAK
Integrovaný obvod	IC 1	NE555	
Trimr	TR1	10 k Ω	
Konektor	J3, J4, J5, J6, J7, J8	Oboustranný kolík 2,54 mm	
Rezistor	R3	68 Ω	
Rezistor	R1, R2	1 k Ω	1206
Konektor	J1, J2	Banánky	

Vysílací obvod - Schéma



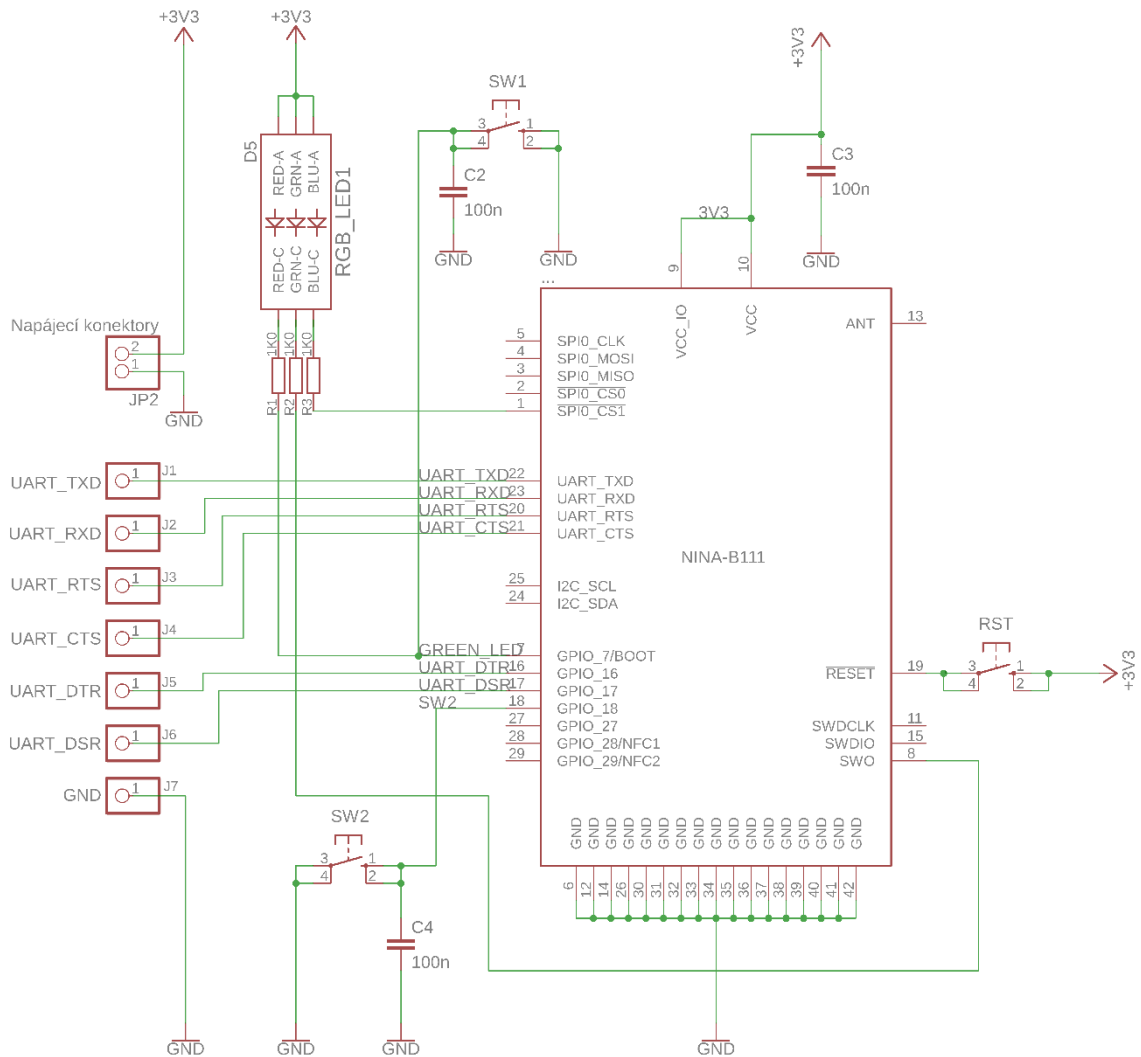
Vysílací obvod - DPS



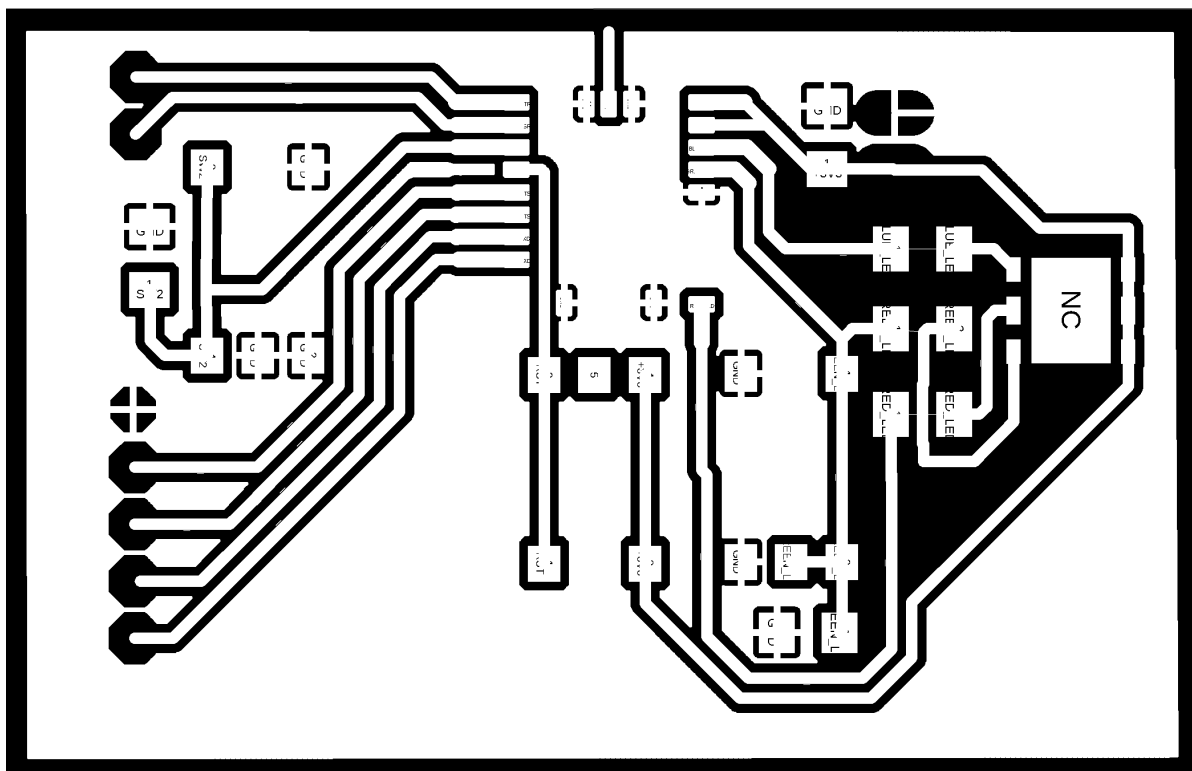
Vysílací obvod – Seznam součástek

Součástka	Ozačení	Hodnota/popis	Pouzdro
Schottkyho dioda	D1, D2, D3, D4	60V / 1A	SMA
Kondenzátor	C1, C2, C3, C4, C5	100 nF	1206
Kondenzátor	C6	330 uF, elektrolytický	F
Rezistor	R1, R2, R3	1k Ω	1206
Stabilizátor napětí 3,3 V	U1	LF33CDT	DPAK
LED dioda	D5	RGB	5050
Bluetooth modul	NINA-B112	u-Blox NINA B1	
Konektor	JP1	Oboustranný kolík, 2,54 mm	
Konektor	J1, J2, J3, J4, J5, J6, J7, J8, J9	Oboustranný kolík, 2,54 mm	

Přijímací obvod (bez antény) - Schéma



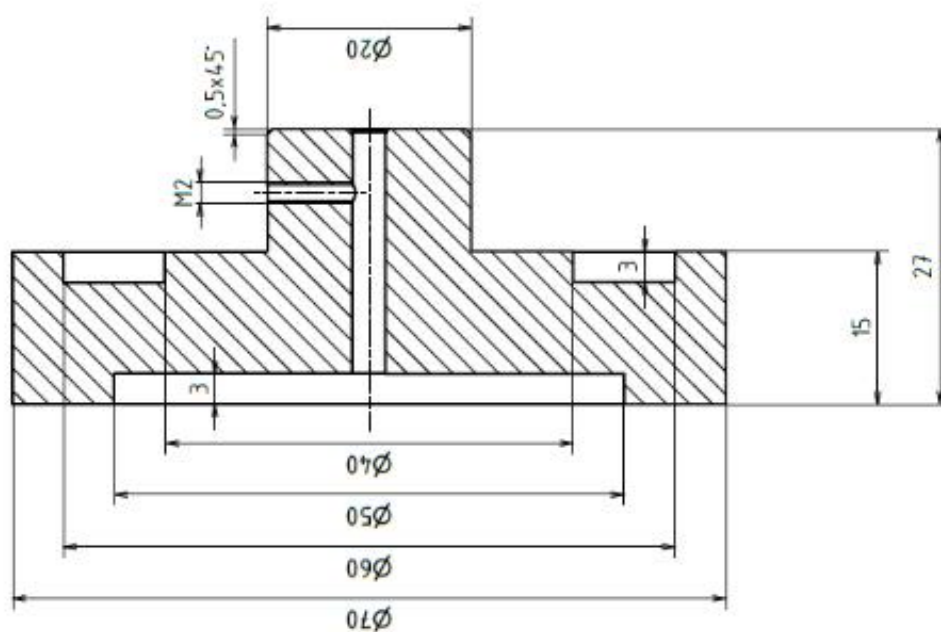
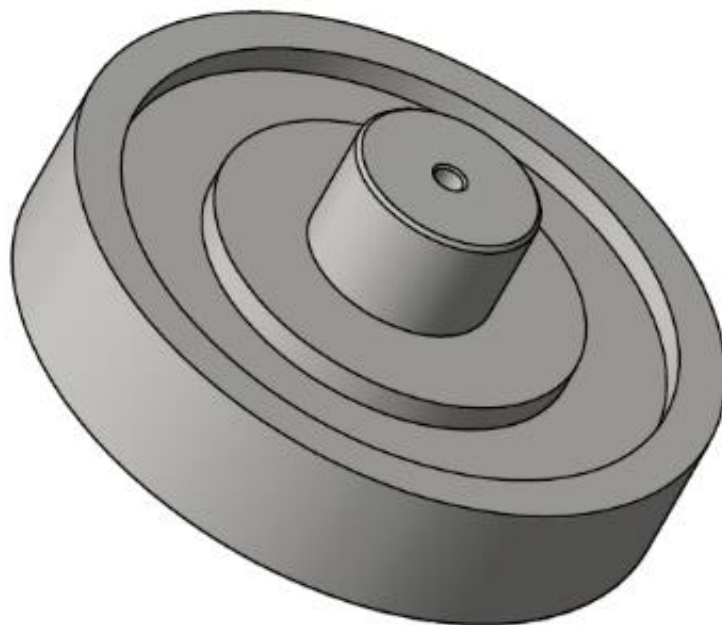
Přijímací obvod (bez antény) - DPS



Přijímací obvod (bez antény) – Seznam součástek

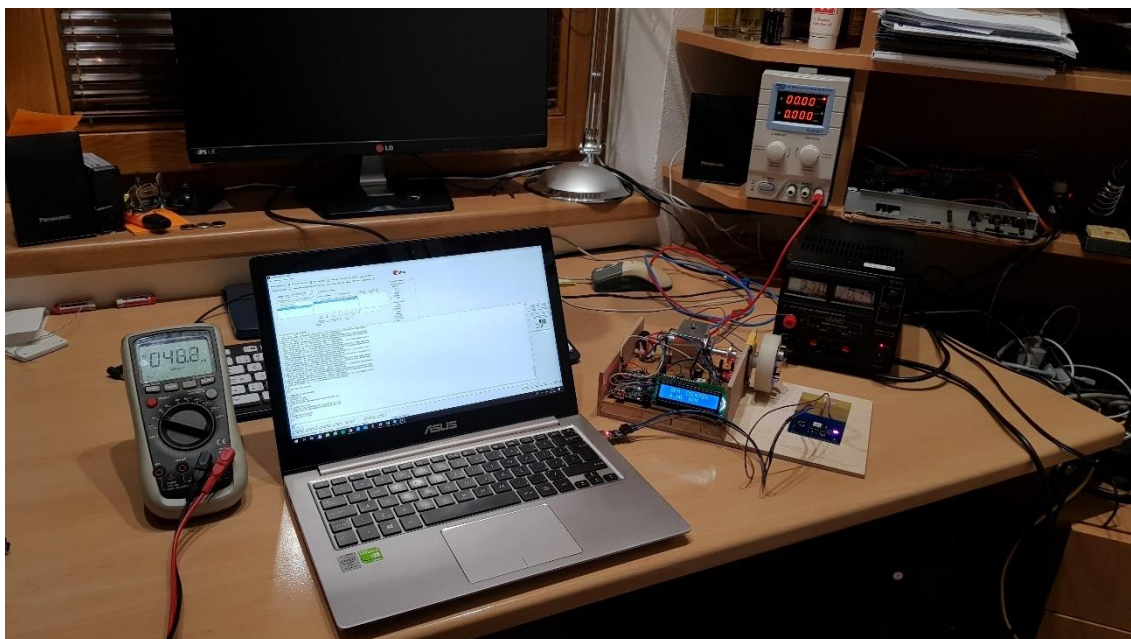
Součástka	Název	Hodnota	Pouzdro
Kondenzátor	C1, C2, C3, C4	100 nF	1206
Rezistor	R1, R2, R3	1k Ω	1206
LED dioda	D5	RGB	5050
Bluetooth modul	NINA-B111	u-Blox NINA B1	
Konektor	J1, J2, J3, J4, J5, J6, J7, J8, J9	Oboustranný kolík, 2,54 mm	

Schéma – kotouč

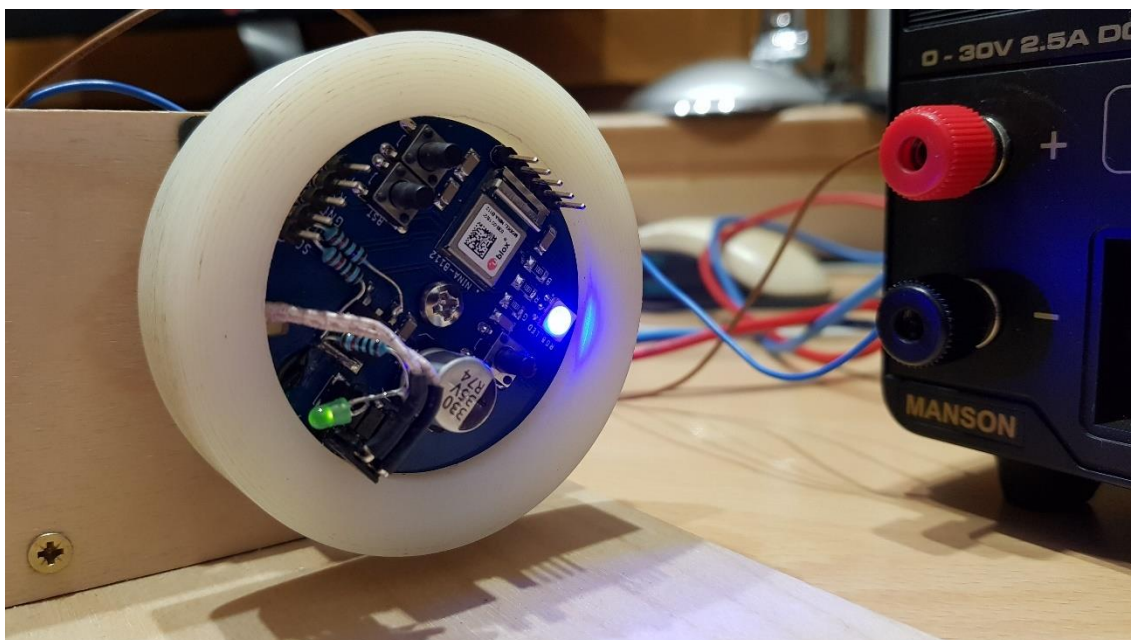


Příloha B – Fotodokumentace

Měřicí pracoviště



Měřicí systém na kotouči



Kompletní zařízení

