



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Tomáš Campř**

Studijní program: **Inteligentní budovy**

Název tématu česky: **Bezdrátový senzor vlhkosti a teploty stavebních konstrukcí**

Název tématu anglicky: **Contactless Humidity and Temperature Sensor of Building Constructions**

Pokyny pro vypracování:

Na základě dílčích výsledků vytvořených v předchozích projektech zkompletujte a odzkoušejte zařízení umožňující odměř vlhkosti a teploty stavebních konstrukcí. Senzor navrhnete tak, aby byl použitelný do konstrukce (izolace) domu pod fasádu. Dále navrhnete čtecí zařízení, které po přiložení na fasádu v přibližném místě senzoru zajistí indukční přenos energie do senzoru. Po dostatečném nabití zdroje v senzoru se provede odměř teploty a vlhkosti. Následně jsou hodnoty bezdrátově odeslány do čtečky. Tam se data zobrazí a uloží včetně časové značky. Navrhnete program pro PC, který zajistí stažení uložených dat ze čtečky a přehledně je zobrazí.

Seznam odborné literatury:

- [1] Vrána, J. a kol.: Technická zařízení budov v praxi. Grada Publishing, Praha 2007, ISBN 978-80-247-1588-9
- [2] Půbal, Z.: Účinky vlhkosti na konstrukce staveb z porézních materiálů. Tepelná ochrana budov, roč. 10, č. 5 (2007)

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D. (K13138)

Datum zadání diplomové práce: 27. ledna 2017

Platnost zadání do¹: 30. září 2018

Prof. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 27. 1. 2017

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ČVUT V PRAZE**

Diplomová práce

Bezdrátový senzor vlhkosti a teploty stavebních konstrukcí

Bc. Tomáš Campr

Katedra měření

Vedoucí práce: Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D.

9. ledna 2018

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Pavlu Mlejnkoovi, Ph. D. za cenné rady, ochotu a podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů, zejména skutečnost, že České vysoké učení technické v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 9. ledna 2018

.....

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

© 2018 Tomáš Campr. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě elektrotechnické. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci

CAMPR, Tomáš. *Bezdrátový senzor vlhkosti a teploty stavebních konstrukcí*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem bezdrátového senzoru vlhkosti a teploty stavebních konstrukcí. Senzor bude umístěn v izolační vrstvě stavební konstrukce bez možnosti pozdějšího přístupu. Z tohoto důvodu neobsahuje trvalý zdroj napájení v podobě primárního článku. Senzor je napájen přes indukční vazbu z externího zařízení, odměry hodnot jsou tedy vždy na vyžádání po vybuzení externím zařízením. Senzor bude sloužit k monitorování vlhkosti uvnitř konstrukce a umožní včasnou detekci zvýšení vlhkosti, která by mohla způsobit poškození nosné konstrukce.

Součástí návrhu je i vyčítací zařízení (čtečka), které slouží k vybuzení senzoru přes indukční vazbu. Zároveň přijímá a zpracovává data ze senzoru. Čtečku je možné propojit s počítačem přes USB pro stažení naměřených dat.

Klíčová slova inteligentní senzor, bezdrátový senzor, teplota, relativní vlhkost, bezdrátový přenos energie, monitoring stavební konstrukce

Abstract

This diploma thesis deals with a project of a wireless sensor to measure humidity and temperature in building constructions. The sensor will be placed in the isolation layer of a building construction without the possibility of later

access. For this reason it does not contain a permanent source of power supply in the form of a primary cell. The sensor is fed via an induction bond from an external device, that's why the measurements are always available on the asking, after being activated by the external device. The sensor will serve for measuring humidity inside the construction and it will enable an in-time detection of any humidity rise, which could cause damage to the supporting construction.

Part of the project is also a reading device, which serves for activation the sensor via the induction bond. At the same time it accepts and processes the data received from the sensor. The reader can be linked to a computer via USB for the download of the measured data.

Keywords smart sensor, wireless sensor, temperature, relative humidity, wireless power transmission, monitoring of building structure

Obsah

Úvod	1
1 Vlhkost a její měření	3
1.1 Vázaná	3
1.2 Vzdušná	4
1.3 Měření vlhkosti vzduchu	4
1.4 Současné možnosti	6
2 Rešerše metod bezdrátového napájení	9
2.1 Bezdrátový přenos energie	9
2.2 Měření cívek	12
3 Návrh bezdrátového senzoru a vyčítacího zařízení	17
3.1 Senzor	17
3.2 Čtečka	22
4 Návrh obvodových schémat	25
4.1 Senzor	25
4.2 Čtečka	26
5 Návrh desek plošných spojů	29
5.1 Senzor	29
5.2 Čtečka	30
6 Firmware	31
6.1 PICKit	31
6.2 MPLAB X IDE	31
6.3 Senzor	32
6.4 Čtečka	35

7 Software pro PC	45
8 Testování	47
9 Možný další vývoj	49
Závěr	51
Literatura	53
A Seznam použitých zkratk	57
B Naměřená hodnoty - cívky	59
C Obvodová schémata	63
D Desky plošných spojů	77
D.1 Senzor	77
D.2 Čtečka	78
E Fotografie finálního výrobku	81
E.1 Senzor	81
E.2 Čtečka	83
F Obsah příloženého archivu	85

Seznam obrázků

1.1	Odporový senzor relativní vlhkosti.	5
1.2	Kapacitní senzor relativní vlhkosti	5
1.3	Kryptonový senzor vlhkosti KH20	6
2.1	Nákres cívky s rozměry.	12
2.2	Zapojení obvodu pro měření přenosu a vlivu vyosení cívek.	13
2.3	Přenos cívek v závislosti na frekvenci a typu průběhu na primární straně. Cívky byly od sebe vzdáleny 3 mm a byly soustředné.	14
2.4	Závislost napětí U_2 na vychýlení sekundární cívky od středu primární cívky a různě vertikální vzdálenosti cívek.	14
3.1	Blokové schéma senzoru.	17
3.2	Blokové schéma vyčítacího zařízení.	23
5.1	Konkretní rozměry DPS antény pro frekvenci 868 MHz použité pro senzor	30
6.1	Obsah balení odesílaného senzorem. Šedivě podbarvené byty jsou odebrány přijímačem.	34
6.2	Blokový diagram firmwaru pro senzor.	35
6.3	Grafické znázornění využití začátku paměti.	38
6.4	Grafické znázornění záznamu ukládaného do paměti.	38
6.5	Grafické znázornění balení sloužícího k nastavení aktuálního času ve čtečce.	39
6.6	Blokový diagram znázorňující pohyb v uživatelském prostředí čtečky za pomoci tlačítek.	39
6.7	Blokový diagram znázorňující hlavní část programu.	40
6.8	Blokový diagram znázorňující spuštěný kód hlavní smyčky ve stavu OFF.	41
6.9	Blokový diagram znázorňující spuštěný kód hlavní smyčky ve stavu CHARGING.	41

6.10	Blokový diagram znázorňující spouštěný kód hlavní smyčky ve stavu RECIEVED.	42
6.11	Blokový diagram znázorňující spouštěný kód hlavní smyčky ve stavu DATA.	42
6.12	Blokový diagram znázorňující spouštěný kód hlavní smyčky ve stavu READING.	43
6.13	Blokový diagram znázorňující kód obsluhy USB.	44
7.1	Okno programu pro vyčítání dat ze čtečky.	45
D.1	Vrchní vrstva DPS senzoru v měřítku 1:1.	77
D.2	Vrchní vrstva DPS senzoru v měřítku 2:1.	77
D.3	Spodní vrstva DPS senzoru v měřítku 2:1.	78
D.4	Vrchní vrstva DPS čtečky v měřítku 1:1.	78
D.5	Vrchní vrstva DPS čtečky v měřítku 2:1.	79
D.6	Spodní vrstva DPS čtečky v měřítku 2:1.	80
E.1	Fotografie senzoru s viditelnou částí elektroniky.	81
E.2	Fotografie senzoru umístěného v elektroinstalační krabici o průměru 80 mm	82
E.3	Fotografie spodní strany čtečky s umístěnými prvky ovládání.	83
E.4	Fotografie rozmístění elektroniky uvnitř čtečky.	84

Seznam tabulek

2.1	Vypočtené hodnoty pro primární a sekundární cívku	12
3.1	Porovnání vlastností jednotlivých mikrokontrolérů	19
3.2	Porovnání klíčových vlastností senzorů	20
6.1	Přehled nastavení programovatelných I/O pinů mikrokontroléru použitého v senzoru	32
6.2	Přehled nastavení programovatelných I/O pinů mikrokontroléru použitého v čtečce	36
8.1	Měření při vzdálenosti cívek cca 4 mm	47
8.2	Měření při vzdálenosti cívek cca 22 mm	47
B.1	Hodnoty naměřené kolem rezonanční frekvence při sinusovém prů- běhu	59
B.2	Hodnoty naměřené v okolí rezonanční frekvence při obdélníkovém průběhu	60
B.3	Hodnoty napětí na odporu R_2 při vychylování sekundární cívky od středu primární cívky a vertikální vzdálenosti cívek od sebe 3 mm	60
B.4	Hodnoty napětí na odporu R_2 při vychylování sekundární cívky od středu primární cívky a horizontální vzdálenosti cívek od sebe 40 mm	61
B.5	Hodnoty napětí na odporu R_2 při vychylování sekundární cívky od středu primární cívky a horizontální vzdálenosti cívek od sebe 77 mm	61

Úvod

Dřevostavby se v ČR těší stále větší oblibě, což dokazuje každým rokem zvyšující se počet dokončených dřevostaveb[1]. Lidé volí dřevo jako stavební materiál, protože je ekologické, jeho montáž nevyžaduje mokré procesy (mimo základovou desku a betonové podlahy), což umožňuje stavět po celý rok a celý proces výstavby je možné zrychlit použitím prefabrikovaných dílů.

Nevýhodou dřeva oproti jiným materiálům je jeho hořlavost a schopnost pohlcovat vodu (hygroskopicitu). Zatímco projevy hořlavosti se projeví velmi rychle, zvýšená vlhkost může zůstat dlouho skryta, než se projeví navenek stopami vlhkosti do interiéru či exteriéru. Zvýšená vlhkost v konstrukci vytváří ideální podmínky pro výskyt plísní, hnilob či dřevokazných hub. Ke zvýšení vlhkosti v konstrukci může dojít kvůli konstrukčním chybám či poruchám na technických rozvodech (voda, odpady). Velké úniky tekutin do konstrukce se projeví většinou velmi rychle, ale u drobných úniků může být doba mnohonásobně delší (řádově měsíce či roky).

Z tohoto důvodu je důležité monitorovat vlhkost v konstrukcích po celou životnost stavby. Běžně dostupná zařízení pro měření vlhkosti stavebních materiálů vyžadují fyzický kontakt s měřeným materiálem a tím pádem není možno měřit aktuální stav uvnitř konstrukce v izolační vrstvě.

Tato práce si klade za cíl navrhnout bezdrátový senzor vlhkosti a teploty stavebních konstrukcí, který bude umístěn v izolační vrstvě stavební konstrukce bez možnosti pozdějšího přístupu. Senzor bude sloužit k monitorování vnitřního stavu stavební konstrukce. Jelikož senzor bude zabudován, nebude k němu možný pozdější přístup, je potřeba využít jiný způsob napájení nežli bateriový či akumulátorový. Bezdrátové napájení magnetickou indukcí z externího zařízení je jednou z možných variant.

Součástí návrhu bude i vyčítací zařízení (čtečka), které bude zajišťovat vybuzení senzoru bezdrátovou vazbou. Zároveň bude přijímat naměřená data senzorem, která následně opatří aktuální časovou značkou a uloží je do paměti. Uložená data bude možné přenést do počítače.

Vlhkost a její měření

Vlhkost se vztahuje k obsahu vodní páry ve vzduchu nebo k obsahu vody ve dřevě či jiném pevném materiálu. Měřit lze různé typy vlhkosti a různých jednotkách.

1.1 Vázaná

Jedná se o vlhkost navázanou v pevných částech stavby jako jsou zejména nosné konstrukce, ať už ze dřeva či jiného porézního materiálu.

Absolutní vlhkost dřeva se vyjadřuje podílem hmotnosti vody k hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu:

$$W_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_v}{m_0} [\%] \quad (1.1)$$

m_w = hmotnost mokrého dřeva

m_v = hmotnost vody

m_0 = hmotnost absolutně suchého dřeva

Relativní vlhkost dřeva se vyjadřuje podílem hmotnosti vody ke hmotnosti mokrého dřeva:

$$W_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 = \frac{m_v}{m_w} [\%] \quad (1.2)$$

m_w = hmotnost mokrého dřeva

m_v = hmotnost vody

m_0 = hmotnost absolutně suchého dřeva

1.2 Vzdušná

Izolační vrstvy budovy obsahují velké množství vzduchu a slouží k udržení tepla uvnitř budovy. Pokud dojde k zvýšení vlhkosti (vzdušné či vázané) v této vrstvě, zhorší se její izolační vlastnosti a může docházet i k tvorbě plísní.

Vlhkost vzduchu je možné vyjádřit více způsoby. Absolutní vlhkost udává hmotnost vodní páry v jednotce objemu vzduchu:

$$\Phi = \frac{m_v}{V_{vz}} [g/m^3] \quad (1.3)$$

m_v = hmotnost vodní páry

V_{vz} = objem vzduchu

Relativní vlhkost vzduchu udává poměr mezi okamžitým množstvím vodních par ve vzduchu a množstvím par, které by měl vzduch o stejném tlaku a teplotě při plném nasycení.

$$\phi = \frac{m_v}{M_v} [\%] \quad (1.4)$$

m_v = hmotnost vodní páry

M_v = hmotnost vodní páry, kterou by obsahoval stejný objem vzduchu, kdyby byl při stejné teplotě a tlaku vodními parami nasycen

Rosný bod je teplota, při které je vzduch maximálně nasycen vodními parami (relativní vlhkost vzduchu dosáhne 100 %).

1.3 Měření vlhkosti vzduchu

1.3.1 Mechanické

1.3.1.1 Vlasový vlhkoměr

Je založen na schopnosti lidského vlasu absorbovat určité množství vody úměrné relativní vzdušné vlhkosti. Absorpce je doprovázena změnou délky, která se převádí mechanismem na výchylku ručičky. Délka vlasu je přímo úměrná množství absorbované vody. Metoda patří k historicky nejstarším.

1.3.1.2 Psychometr

Psychometr se skládá ze dvou teploměrů, z nich jeden má baňku obalenou ve vlhkém obalu (mokrý). Tyto dva teploměry se umístí do proudu měřeného vzduchu a mokrý teploměr bude ukazovat teplotu nižší nežli teploměr neupravený (suchý). Příčinou poklesu teploty na mokřím teploměru je odpařování vody z mokřého obalu. Tato změna skupenství je doprovázena spotřebou tepla.

Intenzita odpařování závisí na relativní vlhkosti přiváděného vzduchu. Odečtením teplot z obou teploměrů získáme tzv. Psychrometrickou diferenci podle které lze určit relativní vlhkost vzduchu dle tabulek.

1.3.2 Elektrické

1.3.2.1 Odporové senzory

Odporové senzory vlhkosti využívají změnu vodivosti některých hygroskopických materiálů při absorpci vody. Tento materiál je vložen mezi dvě elektrody a je měřen jeho odpor. Závislost odporu na vlhkosti je inverzní exponenciála.

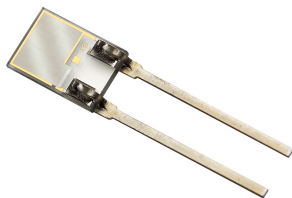


Obrázek 1.1: Odporový senzor relativní vlhkosti.

Zdroj: http://www.conrad-electronic.co.uk/medias/global/ce/9000_9999/9300/9340/9340/156545_BB_00_FB.EPS_1000.jpg

1.3.2.2 Kapacitní senzory

Kapacitní senzory vlhkosti využívají změnu permitivity některých hygroskopických materiálů při absorpci vody. Tento materiál je vložen mezi dvě elektrody a je měřena kapacita mezi elektrodami. Přestože je množství absorbované vody malé, díky její velké dielektrické konstantě jsou změny měřitelné. Řádově činí 0,1% z celkové kapacity na každé procento relativní vlhkosti. Senzory se vyrábí s integrovaným zpracováním signálu, který převede kapacitu na napětí o lineárním průběhu.



Obrázek 1.2: Kapacitní senzor relativní vlhkosti

Zdroj: https://www.epluse.com/uploads/tx_eeproducts/humidity_sensor_hc201.jpg

1.3.2.3 Teplotní vodivost

Senzor využívá závislosti tepelné vodivosti vzduchu na jeho vlhkosti. Senzor obsahuje dva shodné NTC termistory, tvořící jednu větev můstku. Jeden z nich je uzavřen v pouzdře vyplněné suchým dusíkem a druhý je vystaven okolnímu vzduchu. Termistory prochází proud a ty se zahřívají, ale každý na jinou teplotu, jelikož vlhký vzduch má jinou tepelnou vodivost, nežli suchý dusík, a proto se termistory ustálí na rozdílné teplotě, čímž dojde rozvážení můstku. Tento senzor měří absolutní vlhkost.

1.3.2.4 Absorbance záření

Senzor využívá vlastnost vodní páry absorbovat ultrafialové nebo infračervené záření v délkách 121 nm či 123 nm v ultrafialové části spektra nebo 6,25 um v infračervené oblasti. Tento typ senzoru vyniká rychlostí odezvy a měří absolutní vlhkost.



Obrázek 1.3: Kryptonový senzor vlhkosti KH20

Zdroj: <https://s.campbellsci.com/images/14-10266.png>

1.4 Současné možnosti

1.4.1 Farsens bezdrátový senzor vlhkosti a teploty

Bezdrátový a bezbateriový senzor nabízený firmou Farsens[3] je navržený jako UHF RFID tag. Pracuje na frekvenci 860 až 960 MHz. Senzor měří relativní vlhkost v rozsahu 0 až 100 % s odchylkou $\pm 3,5$ % a teplotu v rozsahu -30 až ± 85 °C a odchylkou ± 1 °C. Výrobce udává, že je možné senzor napájet bezdrátově až do vzdálenosti 5 metrů při vysílacím výkonu 2W. Rozměr senzoru je 137 x 16 mm. Cena senzoru je 40 €. Výrobce doporučuje sadu (čtečka + anténa) pro vyčítání hodnot ze senzoru stojí 1749 €.

1.4.2 ON Semiconductor bezdrátový senzor vlhkosti

Bezbatiový a bezdrátový senzor vlhkosti firmy ON semiconductor[4] je UHF RFID pasivní tag pracující na frekvenci 866 až 868 MHz. Vlhkost je převáděna 5-bitovým převodníkem (32 hodnot). Bohužel výrobce neuvádí na jakou vzdálenost senzory fungují. Cena jednoho senzoru je \$5,5, cenu vyčítacího zařízení se mi bohužel dohledat nepovedlo.

1.4.3 Wireless Sensor Tag Pro bezdrátový senzor teploty a vlhkosti

Bezdrátový senzor[5] je napájený baterií CR2032. Rozsah měření je pro vlhkost 5 až 95 % s odchylkou ± 1 % a pro teplotu -40 až 120 °C s odchylkou $\pm 0,04$ °C. Senzor zajišťuje kontinuální měření s intervalem 30s až 4 hodiny. Výdrž je udávána od 2 měsíců do 7 let, dle nastavení četnosti měření. Senzor je vybaven integrovanou pamětí pro případ, že by byl mimo dosah. Fungovat by měl na vzdálenost až 210 m při přímé viditelnosti na přijímač. Velikost senzoru je 41 x 41 x 8,5 mm. Cena senzoru je \$34. Cena čtečky je \$39.

1.4.4 OmniSence S-10 senzor teploty, relativní vlhkosti a obsahu vlhkosti ve dřevě

Senzor[6] je napájen Li-SOCl₄ baterií. Teplotu měří s odchylkou $\pm 0,4$ °C a vlhkost s odchylkou $\pm 3,5$ %. Senzor by měl vydržet na baterii 15 a více let. Maximální dosah je 100 m bez překážek. Rozměry senzoru jsou 57,2 x 38 x 25,4 mm. Cena senzoru je \$84. Cena vyčítací stanice je \$300.

1.4.5 UCCEB Moisture guard senzor teploty, relativní vlhkosti a obsahu vlhkosti ve dřevě

Senzor[7] je napájen po sběrnici z řídicí jednotky. Teplotu měří s odchylkou $\pm 0,3$ °C, relativní vlhkost v rozsahu 0 - 100 % s odchylkou $\pm 3,5$ % a obsah vlhkosti ve dřevě v rozsahu 7 - 30 % s odchylkou ± 2 %. Senzor je připojen k řídicí jednotce po dvou vodičové sběrnici a zajišťuje kontinuální odměry. Čidlo může být k řídicí jednotce připojeno kabelem dlouhým až 1200 metrů. Velikost senzoru je 42 x 31 x 18 mm. Cena senzoru je přibližně 3 500 Kč a cena čtečky je přibližně 13 000 Kč

1.4.5.1 Shrnutí

Uvedené senzory byly vybrány jako možné konkurenční výrobky. Žádný z nich nenabízí dostupnou možnost, jak dlouhodobě, za rozumný peníz a bezdrátově snímat stav vlhkosti uvnitř stavební konstrukce.

Rešerše metod bezdrátového napájení

2.1 Bezdrátový přenos energie

2.1.1 Elektromagnetická indukce

Faradayův zákon elektromagnetické indukce[12]

$$U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta B \cdot S}{\Delta t} \quad (2.1)$$

U_i = elektromotorické napětí

Φ = magnetický indukční tok

B = magnetická indukce

S = Plocha cívky

Elektromagnetická indukce je jev, při kterém ve vodiči dochází ke vzniku indukovaného napětí a indukovaného proudu v důsledku časové změny magnetického indukčního toku, tj. důsledkem umístění vodiče v nestacionárním magnetickém poli. Velikost indukovaného napětí závisí na velikosti změny magnetického pole a rychlosti této změny. Toto pole může vzniknout:

1. Pohybováním permanentního magnetu v blízkosti vodiče
2. Pohybováním vodiče v blízkosti permanentního magnetu
3. Průtokem střídavého proudu vodičem

Třetí možnost je nejčastěji využívána při přenosu elektrické energie, kde se využívá dvojice vodičů (cívek). Přičemž jedna z cívek je buzena střídavým proudem, což vyvolá střídavé magnetické pole a do tohoto pole je umístěna druhá cívka, na kterém toto pole naindukuje napětí. Tento jev se nazývá vzájemná indukčnost.

2.1.2 Elektromagnetické vlnění

2.1.2.1 Laser

Laserová dioda je zdrojem vysoce koherentního monochromatického elektromagnetického záření, které je vyzařováno v úzkém paprsku. Tento svazek dopadá na fotovoltaický článek, kde je zpět přeměněn na elektrickou energii a tím dojde k přenosu energie mezi dvěma body i na velkou vzdálenost[13].

Pro uskutečnění přenosu je nutná přímá viditelnost mezi zdrojem a přijímačem, což značně komplikuje využití pro napájení zařízení, které bude umístěno uvnitř stavební konstrukce.

2.1.2.2 Mikrovlny

Mikrovlny jsou elektromagnetické vlnění o vlnové délce ležící mezi 10 cm a 1 mm (3 GHz až 300 GHz), jsou tedy ohraničené z jedné strany infračerveným zářením a z druhé strany rádiovými vlnami. Lze je snadno generovat pomocí magnetronu. Jedná se o neionizační nedestruktivní záření o nízké energii, které při nízkých výkonech není pro živé organismy nebezpečné. Mikrovlny se používají v nespočtu různých odvětví, jako jsou mikrovlnné trouby, radary, WiFi technologie i mobilní telefony. Mikrovlny reagují různě při průchodu různými látkami. Např. vzduchem, sklem, umělou hmotou mikrovlny jednoduše pronikají, naopak v materiálech, které mikrovlny pohlcují (např. voda) se přeměňují na teplo. Opačný případem jsou materiály, které mikrovlny zcela odráží, např. kovy. Problematický je přenos většího výkonu, kdy se mikrovlny stávají životu nebezpečné pro všechny živé organismy.

2.1.3 Energy harvesting

Základní myšlenka energy harvesting[14][15] (EH) je využití energie z okolí pro napájení elektronických obvodů, které mají v současné době spotřebu v řádu μW až mW , a nahradit tak napájení bateriové, jelikož životnost integrovaných obvodů se počítá v desítkách let, zatímco životnost baterií se počítá pouze v řádu let.

2.1.3.1 Tepelná energie

Teplotní gradienty v okolním prostředí mohou být využity přímo k přeměně na elektrickou energii. Přeměna energie je založena na Seebeckovu jevu. K výrobě použitelné úrovně napětí a výkonu je zapotřebí velkého rozdílu teplot ($>10^\circ\text{C}$) na velmi malé vzdálenosti, jelikož tloušťka článků se pohybuje v rozmezí 2-5 mm. Teplotní gradient na tloušťce konstrukce může sice v zimních měsících dosahovat až hodnot okolo 40°C . Z této úvahy vychází, že teplotní gradient okolo $1^\circ\text{C}/\text{cm}$, což je příliš malý rozdíl pro generování el. energie pro napájení senzoru. Z toho důvodu není vhodné využít termoelektrický článek

pro napájení senzoru. Tento problém by bylo možné vyřešit použitím teplovodivého materiálu (Al, Cu, ...) pomocí kterých by se teplotní gradient přivedl přímo na Peltierův článek. Tímto krokem by v konstrukci vznikl tepelný most a tím pádem by mohlo dojít ke kondenzaci vody uvnitř konstrukce, což je nežádoucí jev.

2.1.3.2 Mechanická energie

Piezelektrický princip K přeměně mechanické energie na elektrickou se využívá piezelektrických vlastností vhodného materiálu, který při mechanickém namáhání generuje napětí, úměrné frekvenci a velikosti deformační síly působící na materiál.

Elektromagnetický princip Kmitáním permanentního magnetu dochází k vytvoření nestacionárního magnetického pole, do kterého je umístěna cívka, na které se podle Faradayova zákona indukuje napětí.

Ani jeden z výše uvedených principů přeměny mechanické energie není možné využít pro napájení senzoru, jelikož ve stavební konstrukce není k dispozici žádný zdroj mechanické energie.

2.1.3.3 Světelná energie

Solární článek umožňuje přeměnit světelný tok na elektrickou energii. Zdrojem světelného toku může být slunce či umělé osvětlení. Oproti ostatním zdrojům umožňuje získání vyšších elektrických výkonů. Pro napájení senzoru tento způsob není vhodný, jelikož senzor bude umístěn uvnitř konstrukce bez přístupu ke světelnému zdroji.

2.1.3.4 Světelná energie

Další zdroje energie pro EH může představovat akustický hluk, RF vysílání, proudění vzduchu apod., ale jejich výstupní výkon je velmi nízký ($<0,1\mu\text{W}/\text{cm}^2$) a je velmi těžké ho zpracovat a následně využít pro napájení.

2.1.4 Vyhodnocení

Nejllepší metodou bezdrátového napájení se jeví elektromagnetická indukce, jelikož na rozdíl od laseru nevyžaduje přímou viditelnost mezi přijímačem a vysílačem. Mikrovlny by mohly rušit jiné zařízení, jelikož volná pásma pro využití jsou dosti přeplněná a maximální povolený vysílací výkon je 100 mW.

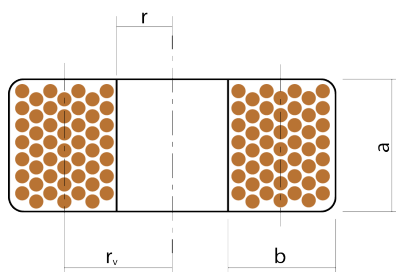
Alternativní napájecí možnosti v podobě energy harvestingu nejsou vhodné pro použití pro napájení čidla, protože dodávaný elektrický výkon je silně závislý na vnějších vlivech.

2.2 Měření cívek

Návrhem cívek se zabýval již Bc. Jakub Klíma ve svém projektu, kde došel k závěru, že jedním z možných řešení je primární cívka o průměru 150 mm s 284 závitů a sekundární cívka o průměru 60 mm s 200 závitů. Tyto cívky byly vyrobeny, ale nebyly změřeny jejich vlastnosti, z tohoto důvodu jsem se rozhodl, že změřím jakých parametrů tyto cívky dosahují. Vzhledem k tomu, že simulace nebyly dostatečně dobře popsány, tak jsem netušil jaké výsledky mohu očekávat.

2.2.1 Výpočty

2.2.1.1 Indukčnost cívek



Obrázek 2.1: Nákres cívky s rozměry.

$$L = \frac{0,315r^2N^2}{6r + 9a + 10b} \quad (2.2)$$

- L = indukčnost v μH
- r_v = poloměr vinutí v cm
- N = počet závitů
- a = délka vinutí v cm
- b = výška vinutí v cm

	Primární cívka	Sekundární cívka
r [cm]	7,4	3
N [závity]	284	200
a [cm]	2	2
b [cm]	0,2	0,2
L [H]	21,6	2,98

Tabulka 2.1: Vypočtené hodnoty pro primární a sekundární cívku

2.2.1.2 Výpočet rezonančního kmitočtu pro primární cívku

Pro výpočet rezonanční frekvence[17] bylo potřeba zvolit kondenzátor, který se zapojí do série s cívkou. Kapacita kondenzátoru byla zvolena 1,2 nF, jelikož jsem chtěl dosáhnout rezonančního kmitočtu v řádech kHz, aby nehrozil vysoký útlum v materiálech stavební konstrukce.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

Po dosazení hodnot do vzorce vyjde rezonanční kmitočet $f_0 = 30\,494 \text{ Hz}$.

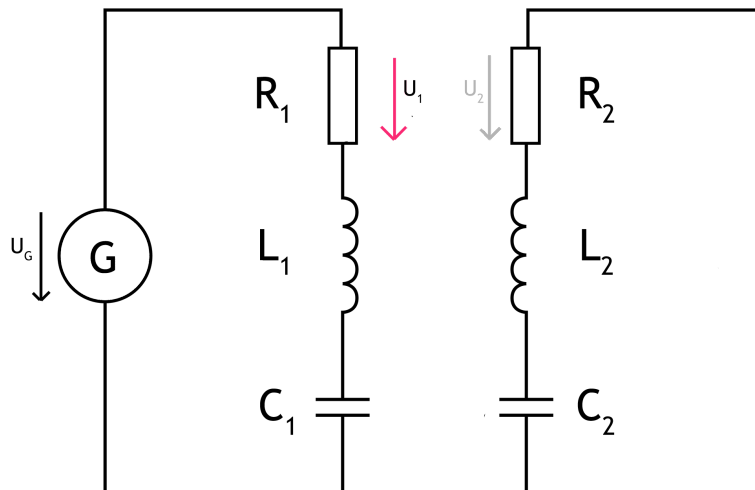
Nyní bylo nutné dopočítat kondenzátor pro sekundární cívku, aby byly obě cívky v rezonanci, což způsobí zvýšení kmitočtu.

$$C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} \quad (2.4)$$

Kondenzátor pro sekundární cívku vyšel $C = 8,3 \text{ nF}$, k čemu je nejbližší hodnota 8,2 nF, která se běžně vyrábí.

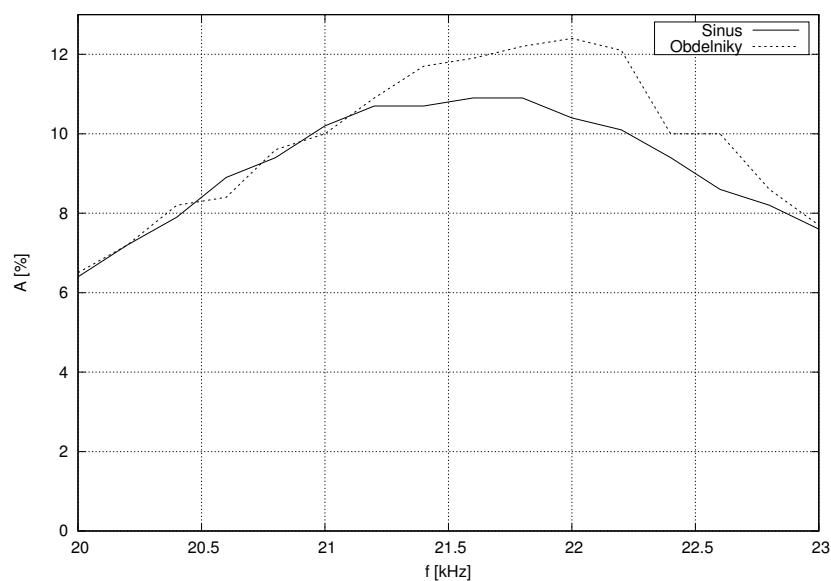
2.2.2 Měření

Zapojení obvodu je vidět na obrázku. Primární cívka byla buzena generátorem funkcí G, odpory R_1 a R_2 byly do obvodu přidány záměrně, z důvodu měření protékajícího proud obvodem. Hodnoty odporů: $R_1 = 1,3 \Omega$ a $R_2 = 433 \Omega$. Napětí U_1 na odporu R_1 a napětí U_2 na odporu R_2 bylo měřeno osciloskopem.

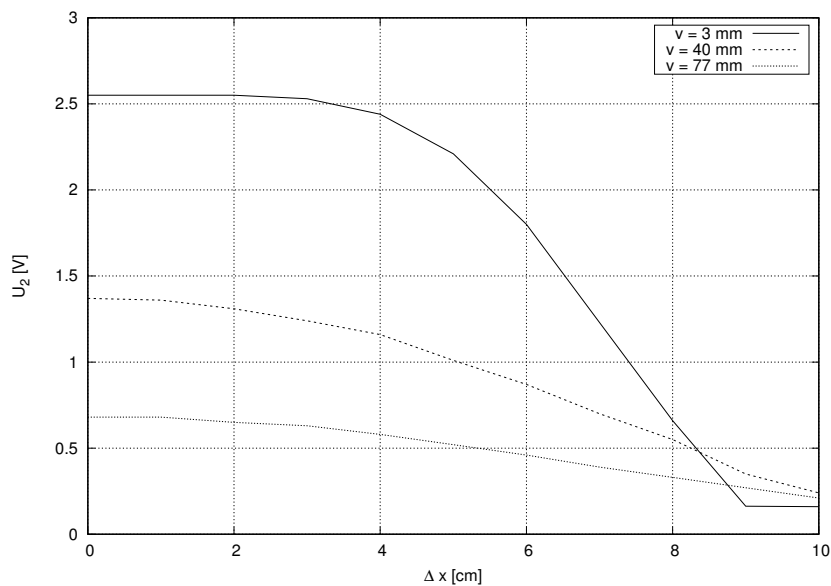


Obrázek 2.2: Zapojení obvodu pro měření přenosu a vlivu vyosení cívek.

2. REŠERŠE METOD BEZDRÁTOVÉHO NAPÁJENÍ



Obrázek 2.3: Přenos cívek v závislosti na frekvenci a typu průběhu na primární straně. Cívky byly od sebe vzdáleny 3 mm a byly soustředné.



Obrázek 2.4: Závislost napětí U_2 na vychýlení sekundární cívky od středu primární cívky a různé vertikální vzdálenosti cívek.

2.2.3 Závěr měření

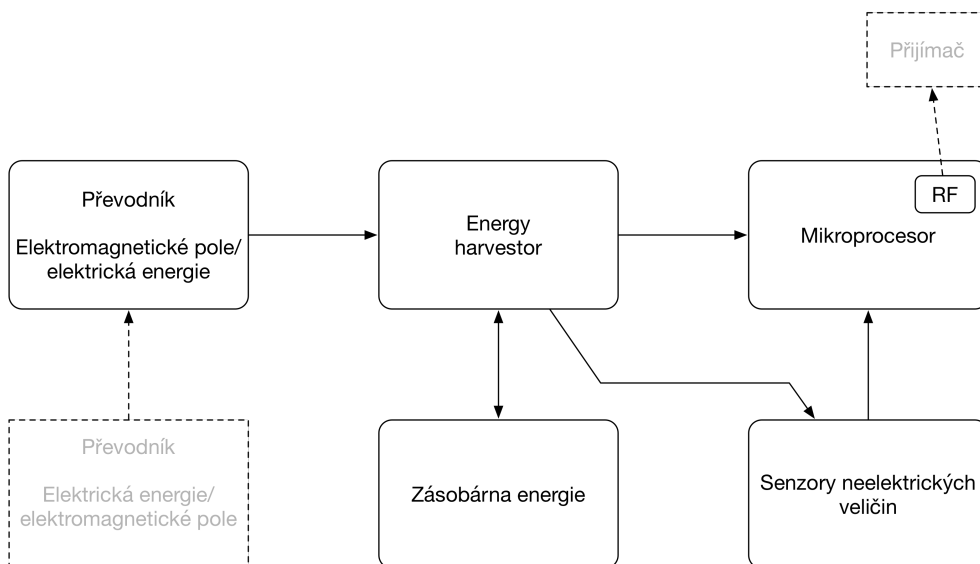
Měřením bylo zjištěno, že vypočtená hodnota rezonanční frekvence, neodpovídá realitě, což bylo způsobeno nepřesností měření rozměrů cívek. Reálná hodnota indukčnosti primární cívky $L_1 = 44,82 \text{ mH}$, $C1 = 1,2 \text{ nF}$ a rezonanční frekvence $f_0 = 21,7 \text{ kHz}$. Hodnoty pro sekundární cívku jsou $L_2 = 3,59 \text{ mH}$, $C2 = 15 \text{ nF}$. Z měření vyplývá, že je vhodnější používat obdélníkový průběh oproti sinusovému, jelikož obdélníkový průběh má vyšší přenos energie a zároveň je jednodušší ho generovat v uC.

Měření také ukázalo, že přenos energie je možný i na vzdálenost okolo 8 centimetrů, ale úroveň napětí při této vzdálenosti je již příliš nízká pro přímé napájení senzoru, proto bude nutné využít pomocný obvod, energy harvester, který energii upraví na požadované napětí a uloží do kondenzátoru.

Návrh bezdrátového senzoru a vyčítacího zařízení

3.1 Senzor

Bezdrátový senzor bude umístěn v izolační vrstvě konstrukce objektu, z čehož plyne, že po zabudování již k němu nebude přístup a je nutné na to při návrhu pamatovat. Vzhledem k tomu, že se předpokládá funkčnost senzoru po celou dobu životnosti stavby, je nutné využít jiný způsob napájení než bateriový či akumulátorový. Z předchozí kapitoly vyplývá, že nejvhodnější možností je bezdrátové napájení na principu magnetické indukce s využitím energy harvestingu.



Obrázek 3.1: Blokové schéma senzoru.

3.1.1 Mikrokontrolér

Hlavním prvkem senzoru je uC, který se stará o načtení dat z čidla teploty a vlhkosti, jejich zpracování a odeslání dat do čtecího zařízení. Úkol uC nebude výpočetně náročný a proto je možné volit úsporné varianty uC, ideálně takové, které budou mít již integrovanou část pro bezdrátovou komunikaci.

3.1.1.1 Microchip PIC12LF1840T39A

Mikrokontrolér[18] z dílny Microchip Technology Inc. je přímo určený pro využití v bezdrátové aplikaci, jelikož má v sobě integrovaný vysílač pro frekvence 310, 433, 868 a 915 MHz. Jeho další předností je minimální spotřeba elektrické energie, kterou výrobce udává při uspaném RF modulu pouhých 530 nA při napájecím napětí 3 V a při vysílání je proud 9,67 mA. Rozsah napájecího napětí je 1,8 - 3,6 V. uC podporuje komunikaci po sběrnici I2C, kterou je možno využít pro komunikaci s čidly. Čip je umístěn ve 14 vývodovém TSSOP pouzdře.

3.1.1.2 Atmel ATA8742

Atmel svůj uC[19] vybavil pouze vysílačem pro frekvenci 433 MHz, spotřeba uvedená výrobcem je 200 nA v sleep módu a 9,8 mA při vysílání, obě hodnoty proudu platí pro napájecí napětí 3 V. Rozmezí napájecího napětí je 2 - 4 V. Čip je vybaven rozhraním SPI pro komunikaci s čidly a je umístěn v pouzdře QFN24 5x5mm.

3.1.1.3 Silicon Labs Si4010-C2

Mikrokontrolér Si4010-C2[20] vyniká velkou šířkou vysílacího pásma od 27 MHz až do 960 MHz. Tento uC nevyžaduje externí krystal ke správné funkci čipu, což by mohlo pomoci k větší kompaktnosti výsledného obvodu. Rozmezí napájecího napětí je 1,8 - 3,6 V. Spotřeba je bohužel udávána pouze v standby módu a to menší než 10 nA. Nevýhodou toho uC je absence rozhraní I2C či SPI pro komunikaci s čidly, tudíž by tento nedostatek bylo nutné řešit programově. Čip je možné dostat v dvojím provedení, jedním je 10 vývodový MSOP a druhým je 14 vývodový SOIC.

3.1.1.4 Texas Instruments CC430F5123

Mikrokontrolér[21] od TI je jako předchozí čipy vybaven vysílačem v oblasti 310, 433 a 868 Mhz, ale navíc umožňuje na těchto frekvencích i přijímat. Spotřeba se v klidovém režimu pohybuje okolo 1 uA a při vysílání se spotřeba pohybuje okolo 15 mA, což je oproti konkurenci lehce horší. Široké rozmezí napájecího napětí je od 1,8 V do 3,6 V. Čip disponuje I2C i SPI rozhraním pro komunikaci s čidly. Pouzdro je 48VQNF 7x7 mm.

	Microchip PIC12LF18 40T39A	Atmel ATA8742	Silicon Labs Si4010C2	Texas In- struments CC430F5123
SPI/I2C	I2C	SPI	-	I2C/SPI
Pásmo	433/868 Mhz	433 Mhz	433/868 Mhz	433/868 Mhz
Napětí	1,8 - 3,6	2 - 4V	1,8 - 3,6 V	1,8 - 3,6 V
TX proud	9,67 mA	9,8 mA	Neudává	15 mA
Počet I/O	6	12	4 nebo 8	30
Cena	\$1.72	\$1,83	\$2.37	\$2.50

Tabulka 3.1: Porovnání vlastností jednotlivých mikrokontrolérů

3.1.2 Senzor teploty a vlhkosti

Vzhledem k faktu, že hlavním úkolem je měřit teplotu a vlhkost, tak čidlo je nepostradatelnou součástí a velmi důležitá je přesnost, proto jsem se přiklonil k výběru hotových a zkalibrovaných čidel, jelikož to následně ulehčí nasazení i za cenu vyšších nákladů.

3.1.2.1 Texas Instruments HDC1080

HDC1080[22] je senzor relativní vlhkosti a teploty od Texas Instruments, který měří v rozsahu 0 - 100 % relativní vlhkost a teplotu měří v rozsahu -40 °C až 125 °C. Typická přesnost pro relativní vlhkost je $\pm 2\%$ a pro teplotu $\pm 0,2\text{ °C}$. Obě hodnoty převádí 14bitový převodník. Rozsah napájecího napětí je od 2,7 V až 5,5 V, spotřeba se pohybuje pod 1 mW. Typická doba odezvy na změnu měřené hodnoty je 15 s. Senzor komunikuje po sběrnici I2C.

3.1.2.2 Sensirion SHT21

Senzor SHT21[23] kombinuje měření relativní vlhkosti a teploty v jednom pouzdře. Rozmezí hodnot jsou pro relativní vlhkost 0 - 80 % (0 - 100 % v režimu rozšířeného pásma) a pro teplotu je to -20 až 100 °C (-40 až 120 °C v režimu rozšířeného pásma). Typické hodnoty tolerance pro měření relativní vlhkosti $\pm 2\%$ a pro teplotu jsou $\pm 0,3\text{ °C}$. Napájecí napětí se může pohybovat v rozsahu od 2,1 V do 3,6 V a spotřeba se v režimu měření pohybuje okolo 1 mW. Senzor je vybaven 12-bitovým A/D převodníkem pro převod relativní vlhkosti a 14-bitovým A/D převodníkem pro převod teploty. Typická doba odezvy na změnu hodnoty je 8 s. Senzor komunikuje po sběrnici I2C.

3.1.2.3 Silicon labs Si7021

Senzor Si7021[24] umí měřit relativní vlhkost i teplotu. Rozsah pro zachování vysoké přesnosti je pro relativní vlhkost 0 - 80 % a pro teplotu činný rozsah -10 až 85 °C. Přesnost v těchto rozsazích činí $\pm 3\%$ pro relativní vlhkost a $\pm 0,4\text{ °C}$

3. NÁVRH BEZDRÁTOVÉHO SENZORU A VYČÍTACÍHO ZAŘÍZENÍ

pro teplotu. Rozmezí napájecího napětí je 1,9 V až 3,6 V. Spotřeba se pohybuje v aktivním režimu okolo 0,5 mW. Typická doba odezvy na změnu měřené hodnoty je 17 s. Senzor komunikuje po sběrnici I2C.

Parametr	SHT21	HDC1080	Si7021
Napájecí napětí	2,1 až 3,6 V	2,7 až 5,5 V	1,9 až 3,6 V
Typický proud při měření (3 V)	300 μ A	300 μ A	150 μ A
Rozsah měření teploty	-40 až 125 °C	-40 až 85 °C	-10 °C až 85 °C
A/D převodník pro teplotu	14 bit	14 bit	14 bit
Typická odchylka	$\pm 0,3$ °C	$\pm 0,2$ °C	$\pm 0,4$ °C
Rozsah měření rel. vlhkosti	0 - 100%	0 - 100%	0 - 80 %
Typická odchylka	2%	2%	3%
A/D převodník pro RV	12 bit	14 bit	12 bit
Komunikace	I2C	I2C	I2C
Pouzdro	DFN 3x3 mm	PWSON 3x3 mm	DFN 3x3 mm
Cena	\$5.12	\$3.30	\$4.44

Tabulka 3.2: Porovnání klíčových vlastností senzorů

3.1.3 Napájení

Senzor nebude mít trvalé napájení v podobě akumulátoru či baterie, ale bude vždy jednorázově bezdrátově napájen pomocí indukční vazby z čtečky. Tato vazba nedokáže dodat dostatečné množství energie pro přímé napájení chodu senzoru, proto bude potřeba energii nejdříve uložit. Po nashromáždění dostatečného množství energie integrovaný obvod vyšle signál uC, čímž ho probudí a ten může začít pracovat. Tuto funkci mají speciální čipy, které se nazývají energy harvestory (dále jen EH).

3.1.3.1 Powercast P2110

Tento EH[25] je úzce zaměřený na příjem energie z RF vysílání na frekvenci 915 MHz, které vysílá speciální vysílač od stejné firmy. Vstupní úroveň signálu musí být v rozmezí -11,5 až 10 dBm. Výstupní napětí je regulovatelné od 1,8 do 5,25 V při maximálním výstupním proudu 50 mA. Čip má signalizaci nashromáždění dostatku energie v přídavném kondenzátoru. Nevýhodou tohoto řešení je vysoká cena pohybující se okolo \$25 za kus.

3.1.3.2 Texas Instruments BQ25504

BQ25504[26] je čip určený pro získávání energie z libovolného zdroje stejnosměrného zdroje, který bude mít napětí v rozmezí 80 mV do 3 V. Pro nastartování procesu je potřeba minimální napětí 330 mV, které poté může klesnout na zmíněných 80 mV. Energii je možné skladovat v širokém spektru akumulátorů (Li-ion, Li-Pol, LiFePO₄,...) či superkondenzátoru. Výstupní napětí je regulovatelné v rozmezí 2,5 až 5,25 V. EH je vybaven teplotním čidlem a ochranou proti přehřátí a je uložen v pouzdře VQFN16 3 x 3 mm

3.1.3.3 Maxim MAX17710

MAX17710[27] je EH, z dílny Maxim integrated, který nabízí dva vstupy pro stejnosměrné zdroje. Jeden z nich je označován jako vysokoúrovňový a je určen pro přímé napájení bez nutnosti upravovat napětí a druhý vstup má integrovaný zvyšující měnič (step-up, boost), který je zakázán, pokud je napětí přivedeno i na první vstup. Maximální napětí na vstupu je 5,7 V. Součástí EH je i lineární regulátor s možností výběru ze 3 napětí (1,8 V; 2,3 V; a 3,3 V). Úložiště energie je od výrobce doporučena baterie THINERGY MEC (<http://www.cytech.com/products-ips>), ale tyto články lze bez potíží nahradit superkondenzátorem. Pouzdro čipu je UTDFN12 3 x 3 mm

3.1.3.4 Linear technology LTC3105

LTC3105[28] není přímo EH, ale jedná se o step-up DC/DC měnič s LDO regulátorem, který ale splňuje požadavky pro energy harvesting. Rozmezí vstupního napětí je 225 mV až 5 V. Výstupní napětí je nastavitelné od 1,6 V do 5,25 V. LDO regulátor umožňuje dodávat až 6 mA při napětí od 1,6 V do 5 V i v případě že není hlavní zásobárna energie dostatečně nabitá. Čip je uložen v pouzdře MSOP12 či DFN10 3 x 3 mm.

3.1.3.5 ST Microelectronics SPV1050

SPV1050[25] zvládá vstupní napětí od 75 mV až do 18 V. Výstupní napětí lze regulovat v rozmezí 2,2 až 5,3 V. Maximální výstupní proud je 70 mA. Součástí čipu jsou i dva nezávislé LDO regulátory na 1,8 V a 3,3 V. EH je koncipován tak, že umožňuje ukládat energii jak do akumulátorů tak i superkondenzátorů. Čip je zapouzdřen v VFQFPN 3 x 3 mm.

3.1.4 Skladování energie

3.1.4.1 Akumulátory

Použitelné jsou akumulátory Li-Ion či Li-Pol, které mají nominální napětí 3,7 V. Průměrná životnost těchto akumulátorů je přibližně 1000-1500 cyklů, což by představovalo životnost cca 25 let při měření jednou týdně. Dalším faktorem

3. NÁVRH BEZDRÁTOVÉHO SENZORU A VYČÍTACÍHO ZAŘÍZENÍ

je stárnutí akumulátoru, které ovlivňuje jeho kapacitu, která se postupem času stále zmenšuje. Životnost také nepříznivě ovlivňuje vybíjení akumulátorů pod určitou mez, čemuž by bylo možné zabránit hlídáním napětí akumulátoru. Ale při dlouhém období bez měření, tzn. bez nabíjení, by se mohl akumulátor samo-vybit pod tuto mez a zničit. Pozitivní vlastností je velmi dobrý poměr uskladněné energie a objemu, tudíž by pro napájení senzoru stačil miniaturní akumulátor.

3.1.4.2 Superkondenzátory

Superkondenzátor je kondenzátor s větší hustotou energie než obyčejný a i přes tento fakt, stále mají 20-40 krát menší poměr energie/objem nežli akumulátory. V současné době se kapacita pohybuje v řádek stovek mF až jednotek F. Životnost superkondenzátoru se pohybuje v řádech desítek let při použití suchého elektrolytu a počet cyklů se pohybuje okolo 1 mil. Maximální napětí může být až 5,5 V. Nebezpečí pro kondenzátor představuje připojení většího napájecího napětí, než je maximální dovolené, pak dojde k průrazu a jeho zničení.

3.1.4.3 Elektrolytické kondenzátory

Jedná se o kondenzátory jejichž katoda je tvořena elektrolytem, který může být tekutý, polosuchý či suchý. Výhodou tohoto kondenzátoru je vysoká měrná kapacita oproti ostatním typům kondenzátorů (keramickým, tantalovým,...), ale je menší nežli u superkondenzátorů.

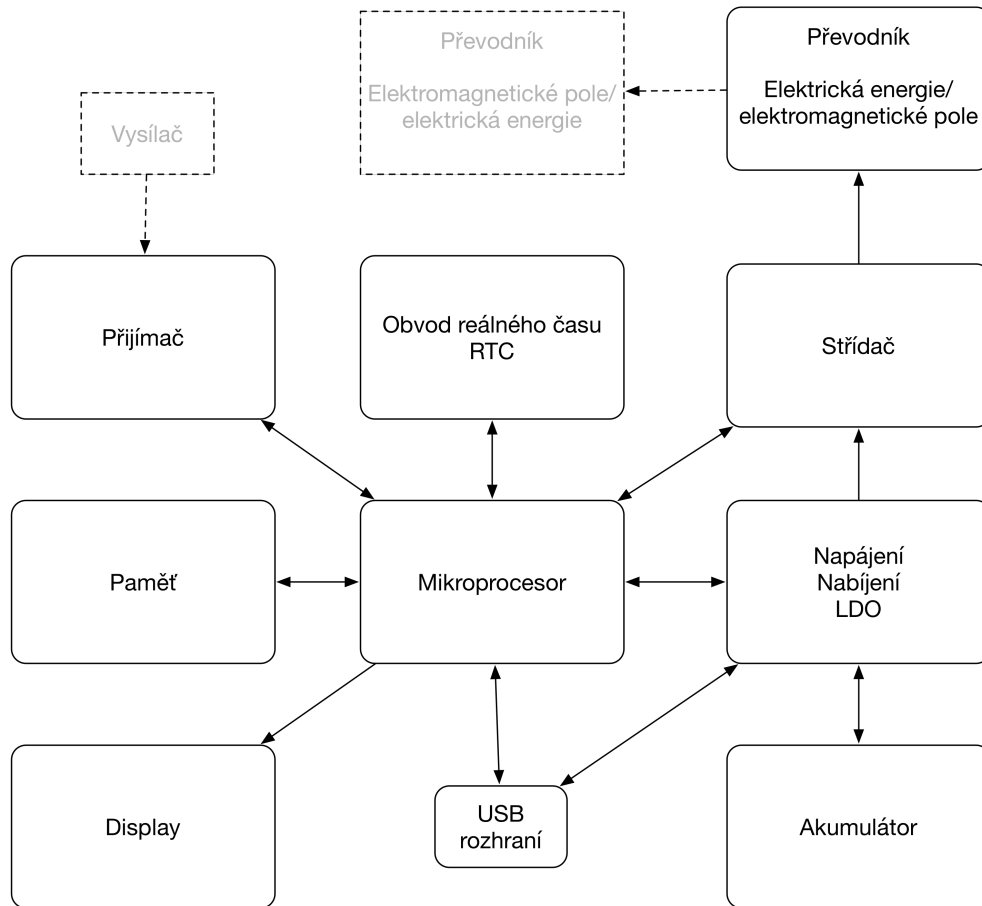
3.1.5 Vyhodnocení

Jako řídicí prvek pro senzor byl vybrán uC Microchip PIC12LF1840T39A pro jeho nízkou spotřebu, podporu I2C a integrovaný vysílač s širokým spektrem vysílacích frekvencí. Čidlo teploty a relativní vlhkosti bylo vybráno od společnosti Texas Instruments HDC 1080, pro své vlastnosti (teplota i vlhkost je převáděna 14 bitovým ADC) i svou cenu. Energy harvester byl vybrán SPV 1050, pro nejnižší startovací napětí. Pro ukládání energie byl vybrán elektrolytický kondenzátor, protože superkondenzátor nabízí zbytečně vysoké kapacity, které by prodlužovali nabíjení senzoru

3.2 Čtečka

Hlavním úkolem čtečky je přes induktivní vazbu poskytnout napájení bezdrátovému senzoru a tím ho "probudit". Dále musí přijmout data vyslaná senzorem, ty zpracovat a uložit. Data je nutné opatřit časovou značkou, aby mohlo být provedeno jejich následné vyhodnocení v čase. Nedílnou součástí by měl být i display pro zobrazení aktuálně odečtených dat, aby bylo zřejmé, že

čtení proběhlo v pořádku. Určitě je vhodné doplnit rozhraní pro komunikaci s počítačem pro další zpracování dat. Napájení čtečky bude obstarávat nabíjecí akumulátor. Na základě rozhodnutí, že senzor bude vybaven uC od firmy Microchip, budou součástky pro čtečku vybírány z portfolia stejné firmy.



Obrázek 3.2: Blokové schéma vyčítacího zařízení.

3.2.1 Mikrokontrolér

Čtečka je řízena mikrokontrolérem Microchip PIC18F24J50[29], který je speciálně navržen pro co nejmenší spotřebu elektrické energie a v režimu hlubokého spánku odebírá pouze 830 nA při napájecím napětí 3 V. Součástí uC je obvod reálného času a kalendáře, USB 2.0 rozhraní a dvojice modulů podporují I2C nebo SPI sběrnici. Napájecí napětí se může pohybovat v rozmezí 2 až 3,6 V. Programová paměť má 16 kB a operační paměť má 3 800 bytů. Čip je vyráběn v širokém spektru pouzder s 28 vývody.

3.2.2 RF přijímač

Portfolio firmy Microchip neobsahuje uC s integrovaným RF přijímačem, proto je nutné použít přijímač jako samostatnou součástku, konkrétně se jedná o čip Microchip MRF39RA[30]. Přijímač umožňuje komunikovat na frekvencích 433, 868 a 915 MHz. Má vysokou citlivost -120 dBm při rychlosti maximální 1,2 kbps. Přijímač disponuje rozhraním pro sběrnici SPI[31], po které komunikuje s uC.

3.2.3 Paměť

Čtečka má sloužit zároveň jako záznamové zařízení pro naměřené hodnoty ze senzoru, a protože hlavní uC nemá k dispozici dostatek perzistentní paměti, do které by šly hodnoty ukládat, byla vybrána externí EEPROM paměť Microchip 24AA256[32] s kapacitou 32 kB. Paměť je vybavena rozhraním I2C s podporou 100 kHz a 400kHz módu. Napájecí napětí se může pohybovat od 1,7 až do 5,5 V. Zápis jedné stránky trvá přibližně 5 ms.

3.2.4 Napájení

Napájení čtečky obstarává Li-Ion akumulátor, který bude nabíjen z USB portu. Napětí na akumulátoru se pohybuje v rozmezí 3 až 4,2 V v závislosti na úrovni jeho nabití. Po dosažení maximálního napětí akumulátoru (4,2 V) je nutné ho přestat nabíjet, aby nedošlo k jeho poškození. Proto je nutné použít obvod, který ze vstupních 5 V upraví napětí, aby bylo vhodné pro napájení elektroniky čtečky a zároveň se bude starat o korektní nabíjení akumulátoru.

3.2.4.1 Maxim MAX8934

Integrovaný obvod MAX8934[32] je určený pro nabíjení Li-Ion baterií z USB či externího adaptéru. IO umožňuje připojení externího termistoru pro hlídání teploty akumulátoru, aby nedošlo při nabíjení k jeho přehřátí a následnému zničení. Pokud je termistor připojen a povolen, obvod monitoruje teplotu a při překročení 75 °C. Součástí IO je LDO regulátor na 3,3 V, který je vždy aktivní, což je ideální pro napájení obvodu reálného času. Nabíjecí proud je možné volit z hodnot 100 mA a 500 mA.

Návrh obvodových schémat

4.1 Senzor

V předchozí kapitole bylo rozhodnuto, že pro senzor bude použit mikrokontrolér od firmy Microchip s označením PIC12LF1840T39A[18], který je navržený pro nízkoenergetické aplikace a jeho součástí je i RF část pro vysílání v širokém spektru frekvencí. O zpracování energie ze sekundární cívky se bude starat energy harvester z dílny ST Microelectronics SPV 1050[33]. Senzor teploty a relativní vlhkosti bude s uC komunikovat po sběrnici I2C a bude použit čip Texas Instruments HDC1080.

4.1.1 Komunikační frekvence

V České republice[34] je možné pro přenos dat využít volná pásma 433,05 - 434,79 MHz a 863 - 870 MHz. Pro účely přenosu dat ze senzoru do čtečky bylo vybráno pásmo druhé, jelikož díky vyšší frekvenci má kratší vlnovou délku, a tím pádem dostačuje menší anténa než pro první pásmo.

4.1.1.1 Obvodové schéma

Napájecí obvod pro senzor byl vybrán energy harvester SPV1050 od firmy ST Microelectronics, který na vstupu potřebuje stejnosměrné napětí, proto je cívka připojena přes dvoucestný usměrňovač ze shottkyho diod. EH je zapojen v režimu zvyšujícího měniče (boost), dle doporučeného zapojení výrobce. Výstupní napětí obstarává integrovaný 3,3 V LDO regulátor. Status výstup BATTERY_CHG je přiveden na vstup uC. Spodní (U_{UVP}) a horní (U_{EOC}) hranice nabíjení kondenzátoru C2 se nastavuje odporovým děličem R5, R6 a R7 dle následujícího vztahu:

$$U_{UVP} = U_{BG} \cdot \frac{R5 + R6 + R7}{R6 + R7} \quad (4.1)$$

$$U_{EOC} = U_{BG} \cdot \frac{R5 + R6 + R7}{R6} \quad (4.2)$$

U_{BG} = Vnitřní napěťová reference 1,23 V

S tím, že výrobce doporučuje v rámci snížení protékajícího proudu odпоры dodržet následující podmínku:

$$10 \text{ M}\Omega \leq R5 + R6 + R7 \leq 20 \text{ M}\Omega$$

Hodnoty odporů byly zvoleny následně:

$$R5 = 5,6 \text{ M}\Omega$$

$$R6 = 0,5 \text{ M}\Omega$$

$$R7 = 2,7 \text{ M}\Omega$$

Hodnoty napětí pak vycházejí následovně:

$$U_{UVP} = 3,38 \text{ V}$$

$$U_{EOC} = 4,01 \text{ V}$$

Zapojení uC včetně obvodu antény pro vysílání v pásmu 868 Mhz je převzaté z datasheetu[18]. Senzor teploty je připojen dvou vodičovou sběrnicí I2C[35], která vyžaduje externí pull-up rezistory.

Napájení čidla i uC vyžaduje stabilní úroveň napětí, aby nedocházelo k nechtěným restartům z důvodu poklesu úrovně napájecího napětí a proto je potřeba všechny vstupy opatřit dvojicí blokovacích kondenzátorů.

Kompletní schéma je k dispozici v příloze C.

4.2 Čtečka

Řídícím prvkem čtečky je uC PIC18F20J50[29], který zároveň obsahuje integrovaný obvod reálného času a modul pro komunikaci po USB, ale nemá dostatečné množství I/O portů a proto jsou v návrhu použity dva 8-bitové expandéry portů, které komunikují po sběrnicí I2C. Jeden z nich slouží pro komunikaci s displejem, druhý na vyčítání stavu nabíječe.

Příjem dat ze senzoru zajišťuje přijímač MRF39A[30], který komunikuje s uC po čtyřvodičové sběrnicí SPI[31]. Přijímač pro příjem signálu ze senzoru využívá prutovou anténu o délce 8,64 cm, což odpovídá čtvrtině vlnové délky, která je použita pro komunikaci.

K perzistentnímu uložení dat je využívána externí EEPROM 24AA256[32], která komunikuje s uC po sběrnicí I2C. Jelikož využívá stejnou sběrnicí jako expandéry portů, má každé zařízení přidělenou unikátní adresu nastavením pinů A2 až A0 - Paměť má adresu 000, expandér pro display 100 a druhý expandér 010.

Integrovaný obvod Maxim MAX8934 zajišťuje napájení celé čtečky a nabíjení akumulátoru v případě připojení externího napájení.

Další částí napájení jsou dva step-up měniče, jeden zvyšuje napětí na 5 V[36] potřebných pro napájení displeje a druhý na 12 V[37], využívaných jako zdroj pro střídač cívky. Střídač samotný je složen kombinací tranzistorů N a P FET, kdy je tato dvojice vždy uzavřena v součástce nesoucí označení SI4532ADY-T1-E3[38].

Kompletní schéma je k dispozici v příloze C.

Návrh desek plošných spojů

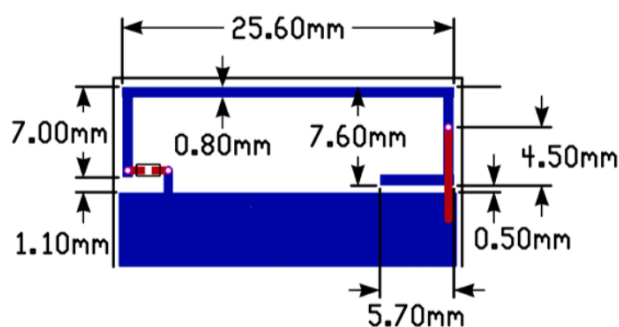
Návrh DPS byl realizován v programu OrCAD PBC Designer a při návrhu bylo potřeba zohlednit fakt, že se desky budou osazovat ručně a nikoliv strojně. Z tohoto důvodu bylo jako nejmenší pouzdro vybráno 1608, které má rozměry 1,6 mm x 0,8 mm, což je rozměr již velmi malý, ale ručně ho lze připájet. Pro snazší zapájení součástek, bylo také nutno prodloužit pájecí plošky, aby plošky přesahovaly součástky směrem ven a mohla se na ně nanést pájka, tento fakt bohužel vylučoval použití připravených knihoven od výrobců, kteří mají pájecí plošky malé, aby se při výrobě spotřebovalo co nejméně pájecí pasty. Proto jsem si všechna pouzdra součástek musel vytvořit sám, což celý proces návrhu protáhlo. Parametry návrhu byly dány procesem výroby jakou je DPS vyráběn. V tomto případě byla využita služba POOL Servis[39] firmy Pragoboard.

5.1 Senzor

Velikost DPS pro senzor byla volena tak, aby výsledný obvod bylo možné umístit do středu sekundární cívky, která má vnitřní průměr 49 mm. Jako největší možný rozměr vyšel čtverec o hraně 34 mm.

Součástí návrhu byla i anténa pro vysílač, která je vyleptána na DPS. Konkrétní rozměry antény pro frekvenci 868 MHz byly použity z doporučení firmy Microchip[40] a jsou patrné na obrázku 5.1.

Spodní strana DPS slouží jako rozlitá země z důvodu minimalizace proudových smyček a tím pádem menšího vyzařování. Tato vrstva je vynechána pod senzorem teploty a vlhkosti, aby se minimalizoval přenos tepla od ostatních součástek.



Obrázek 5.1: Konkrétní rozměry DPS antény pro frekvenci 868 MHz použité pro senzor

5.2 Čtečka

Velikost DPS pro čtečku byla zvolena tak, aby byla celková velikost obou DPS 0,5 dm², což je nejmenší účtovaný rozměr pro výrobu. Z této podmínky vyšel rozměr desky 65 x 50 mm. Spodní vrstva je, stejně jako u senzoru, použita jako rozlitá měď s minimem spojů.

Zvýšenou pozornost při návrhu vyžadovalo umístění uC a konektoru USB, jelikož pro správnou funkčnost by vodiče D+ a D- měly být co nejkratší, stejně dlouhé a vést co nejbližší k sobě.

Další místo vyžadující zvýšenou pozornost je přívod signálu z antény do přijímače, který by měl být co nejkratší a ideálně co nejvíce obklopený zemí.

Firmware

Programování mikrokontrolérů od firmy Microchip probíhá po ICSP (synchronní sériová linka), což je realizováno dvěma vodiči - jeden pro data (PGD), druhý pro hodinový signál (PGC). Další vodič je přiveden na MCLR (Master Clear), aby mohl být uC přepnut do stavu programování = očekává data na pinech PGD a PGC.

6.1 PICKit

PICKit[41] je programátor od firmy Microchip určený pro všechny uC z jejich portfolia. Pro tento projekt využívám poslední verzi tohoto programátoru, PICKit 3 In-Circuit Debugger. PICKit se připojuje k počítači pomocí standardního kabelu USB 2.0 s koncovkou miniUSB. Programátor je schopný při programování dodávat napájení pro malé uC v rozmezí 3,3 až 5 V s maximálním odběrem 30 mA, pokud je potřeba vyšší proud, je nutné využít napájení z externího zdroje.

6.2 MPLAB X IDE

MPLAB X IDE[42] je vývojové prostředí určené pro vytváření programů pro uC firmy Microchip, které spolupracuje s programátory PICKit. Integrovaný kompilátor umožňuje překlad z assembleru do strojového kódu. Vývojové prostředí podporuje psaní kódu v jazyce C, ale pro překlad programu z tohoto jazyka je potřeba doinstalovat externí kompilátor XC8¹ pro 8-bitové uC. Tento kompilátor je dostupný ve standardní verzi a placené verzi PRO, která má lepší optimalizaci kódu, tudíž program zabere méně místa v paměti uC a může fungovat i rychleji. V této práci se používá standardní verze kompilátor XC8[43], který je dostačující.

¹<http://www.microchip.com/mplab/compiler>

Pin	Směr	Funkce
RA0	Vstup	Stav energy harvestoru
RA1	Vstup	I2C Clock
RA2	Vstup	I2C Data
RA3	Vstup	Memory clear
RA4	Výstup	Hodinový signál pro konfiguraci vysílače
RA5	Výstup	Data pro vysílač

Tabulka 6.1: Přehled nastavení programovatelných I/O pinů mikrokontroléru použitého v senzoru

6.3 Senzor

6.3.1 Konfigurace mikrokontroléru

Základní konfigurace se provádí přes konfigurační bity. V těchto bitech je nastaveno použití vnitřního oscilátoru jako zdroj hodinového signálu pro uC a funkce pinu RA3 jako MCLR (Memory Clear). Programová inicializace uC začíná nastavením frekvence vnitřního oscilátoru, v tomto případě nastavena na hodnotu 8 MHz. Následuje nastavení I/O portů (viz tabulka 6.1).

6.3.2 Nastavení I2C

Správná funkčnost protokolu I2C vyžaduje hodinovou frekvenci 100 kHz. Nastavení požadované frekvence se provádí v registru SSP1ADD, jehož hodnota se vypočítá následujícího vztahu:

$$SSP1ADD = \frac{f_{OSC}}{4 * f_{I2C}} - 1 \quad (6.1)$$

f_{OSC} = frekvence oscilátoru uC

f_{I2C} = frekvence sběrnice I2C

Pro požadovanou frekvenci vyjde hodnota $SSP1ADD = 19$ (0x13) při nastavení vnitřního oscilátoru uC na 8 Mhz.

6.3.3 Nastavení frekvence vysílání

Úspěšného přenosu dat mezi vysílačem a přijímačem je možné docílit právě tehdy, když je přijímač naladěný na stejnou frekvenci jako vysílač. Proto je potřeba najít takovou frekvenci, kterou bude možné nastavit do obou čipů. Výpočet hodnoty registru pro vysílač:

$$DF = \frac{f_{rf} \cdot 8192}{f_{xtalx}} \quad (6.2)$$

$$f_{xtaltx} = 24 \text{ MHz}$$

$$f_{rf} = \text{nosná frekvence vysílání}$$

Pro hodnotu DF musí platit toto pravidlo:

$$212992 \leq DF \leq 344064$$

Výpočet hodnoty registru Frf pro přijímač:

$$Frf = \frac{2^{19} \cdot f_{rf}}{f_{xtalrx}} \quad (6.3)$$

$$f_{xtalrx} = 32 \text{ MHz}$$

$$f_{rf} = \text{nosná frekvence vysílání}$$

Nyní je potřeba najít takovou frekvenci, aby registr Frf a DF byly celé číslo. V pásmu 863 - 870 MHz jsou takové frekvence přesně 3:

$$f_{rf} = 863\,531\,250 \text{ Hz}, DF = 294752, Frf = 14156250$$

$$f_{rf} = 866\,390\,625 \text{ Hz}, DF = 295728, Frf = 14203125$$

$$f_{rf} = 869\,250\,000 \text{ Hz}, DF = 296704, Frf = 14250000$$

Vybrána byla poslední - 869 250 000 Hz.

Modulace vysílaného signálu byla zvolena FSK, protože je více odolná rušení než modulace OOK. Modulace vyžaduje nastavení frekvenčního posuvu, který určí o kolik se změní frekvence při vysílání nenulového bitu.

Výpočet je nutný provádět pro vysílače i přijímače společně, aby mohl být signál v pořádku přenesen.

Výpočet frekvenčního posuvu na straně vysílače:

$$f_{DEV} = \frac{DA \cdot f_{xtaltx}}{8192} \quad (6.4)$$

$$f_{xtaltx} = 24 \text{ MHz}$$

$$f_{DEV} = \text{velikost frekvenčního posuvu}$$

$$DA = 5 \text{ bitový registr vysílače}$$

Vyšlý frekvenční posuv musí splňovat podmínku:

$$10 \text{ kHz} \leq f_{DEV} \leq 200 \text{ kHz}$$

Frekvenční posuv vyjde 41 015 Hz, při hodnotě registru DA = 14 (0xE).

Výpočet frekvenčního posuvu na straně přijímače:

$$f_{DEV} = \frac{f_{xtalrx}}{RxBwMant \cdot 2^{RxBwExp+2}} \quad (6.5)$$

f_{xtalrx} = 32 MHz
 f_{DEV} = velikost frekvenčního posuvu
 $RxBwMant$ = Hodnota určená registrem $RxBwMant$ a může nabývat hodnot 16, 24 a 20
 $RxBwExp$ = 3 bitový registr

Velikosti posuvu frekvence je možné se nejvíce přiblížit pro použití hodnot registrů $RxBwMant = 24$ a $RxBwExp = 3$, kdy vyjde posuv $f_{DEV} = 41\,667$ Hz. I když se posuny frekvence nerovnají, přenos dat funguje bez problémů.

6.3.4 Nastavení přenosové rychlosti

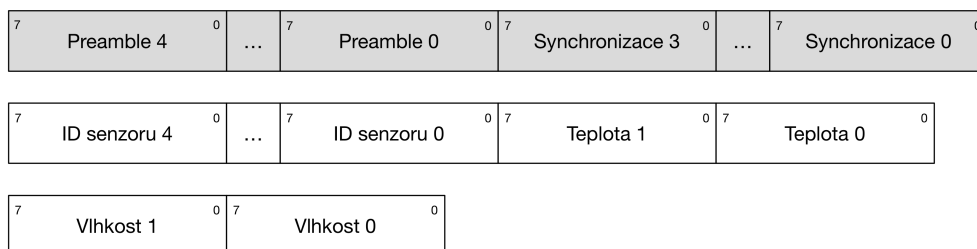
Data musí být vysílána určitou přenosovou rychlostí, aby přijímač tyto data mohl správně dekódovat. Rychlost byla vybrána 1200 b/s. Této konkrétní rychlosti je na straně vysílače dosaženo využitím přerušení od čítače 0. Výpočet konstanty pro čítač, aby bylo přerušení vyvoláno 1200x za sekundu:

$$TRM0 = 256 - \frac{F_{OSC}}{4 * Prescaler * F_{out}} \quad (6.6)$$

F_{OSC} = frekvence oscilátoru uC
 F_{out} = frekvence vyvolání přerušení
 $Prescaler = 8$

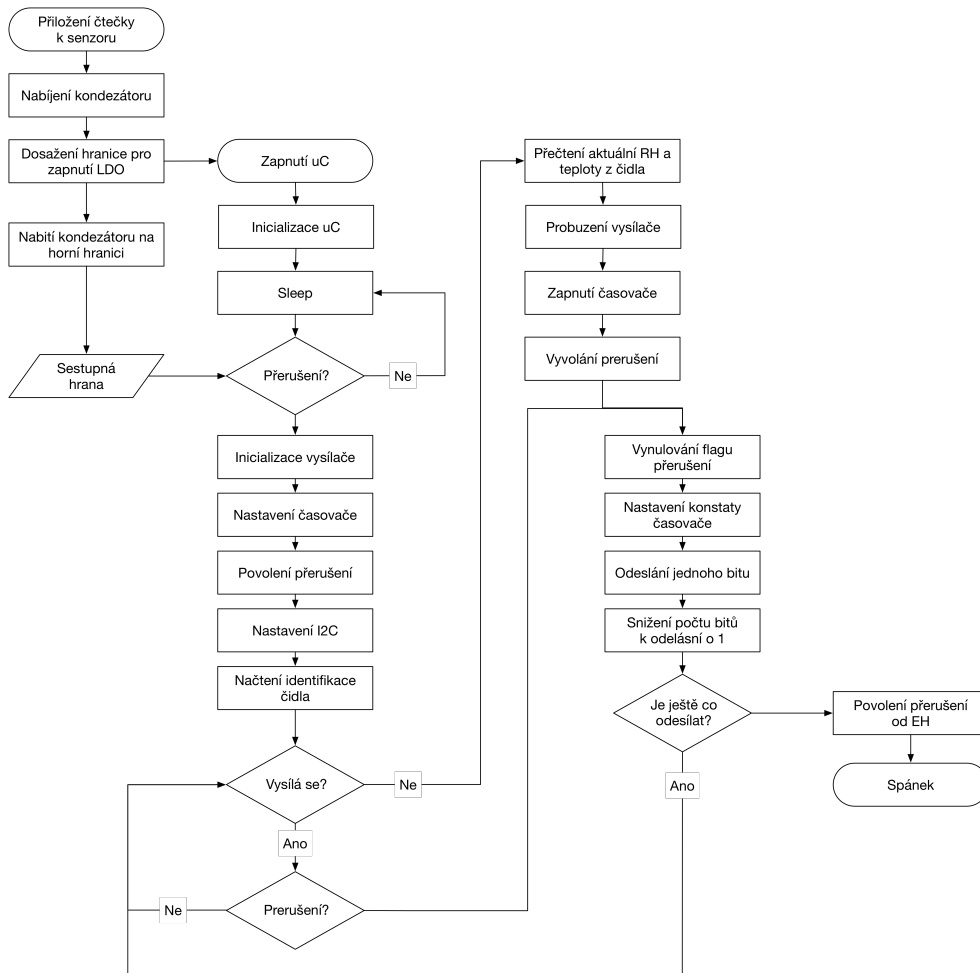
$$TRM0 = 47,67 \approx 48 \Rightarrow F_{out} = 1201,92 \text{ Hz}$$

6.3.4.1 Podoba odesílaného paketu



Obrázek 6.1: Obsah paketu odesílaného senzorem. Šedivě podbarvené byty jsou odebrány přijímačem.

6.3.4.2 Blokový diagram kódu



Obrázek 6.2: Blokový diagram firmwaru pro senzor.

6.4 Čtečka

Základní konfigurace se provádí přes konfigurační bity. V těchto bitech je nastaveno použití externího krystalu s možností aktivovat PLL s aktivní děličkou 1:6 jako zdroj hodinového signálu pro uC a interní RC oscilátor jako zdroj pro obvod reálného času. Programová inicializace uC začíná nastavením frekvence hodinového signálu, v tomto případě nastavena na hodnotu 8 MHz. Následuje zapnutí násobičky frekvence externího oscilátoru (PLL - 4x Phase Locked Loop), která zčtyřnásobí frekvenci, tzn. z 12 Mhz krystalu, je generována frekvence 48 Mhz, potřebných pro USB. Následuje nastavení I/O portů (viz tabulka 6.2).

Pin	Směr	Funkce
RA0/RP0	výstup	PWM kanál A
RA1/RP1	výstup	PWM kanál B
RA2	vstup	Tlačítko 1
RA3	vstup	Tlačítko 2
RA5/RP2	vstup	Tlačítko 3/Externí prerušení 0
RB0	výstup	SPI výběr čipu
RB1/RP4	výstup	SPI datový výstup
RB2/RP5	Vstup	SPI datový vstup
RB3/RP6	výstup	SPI hodinový signál
RB4	výstup	I2C hodinový signál
RB5	výstup	I2C data
RC0	výstup	I/O Expandér 1 reset
RC1	výstup	Přijímač reset
RC2	výstup	Zapínání LDO
RC6	výstup	Stavová LED
RC7	výstup	I/O Expandér 1 reset

Tabulka 6.2: Přehled nastavení programovatelných I/O pinů mikrokontroléru použitého v čtečce

6.4.1 Nastavení obvodu reálného času a kalendáře

Obvod reálného času a kalendáře (RTCC) využívá jako zdroj hodinového signálu vnitřní RC oscilátor o frekvenci 31 kHz. Registry pro nastavení RTCC jsou uzamčeny, aby nedošlo k jejich přepsání omylem. Odemčení se provede spuštěním následující části kódu:

```
INTCONbits.GIE = 0;  
asm ( "MOVLW 0x55 " );  
asm ( "MOVWF 0xA7 " );  
asm ( "MOVLW 0xAA " );  
asm ( "MOVWF 0xA7 " );  
asm ( "BSF 0x3F, 5 " );
```

Hodnoty v registrech RTCC jsou uložena jako binárně kódované číslo, což znamená, že první 4 bity představují desítky a druhé 4 bity představují jednotky.

Inicializační hodnoty registrů jsou stanoveny na datum 1. 1. 18 10:23:00.

6.4.2 Generování frekvence pro střídač

Rezonanční frekvence cívky je 21,7 kHz. K vygenerování této frekvence je využit modul Enhanced Capture/compare/PWM 1 (ECCP1) v režimu generování dvoukanalového PWM signálu se střídou 50%.

Výpočty potřebných hodnot registrů:

$$PR2 = \frac{Period}{4 \cdot t_{OSC} \cdot Prescale} - 1 \quad (6.7)$$

$$CCPR1L\langle 7:0 \rangle : CCP1CON\langle 5:4 \rangle = \frac{Pulsewidth}{t_{OSC} \cdot Prescale} \quad (6.8)$$

$$PWM1CON\langle 6:0 \rangle = \frac{Delay}{4 \cdot t_{OSC}} \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} t_{OSC} &= \frac{1}{f_{OSC}} = 125 \text{ ns} \\ Period &= \frac{1}{f_{st}} = 46 \text{ } \mu\text{s} \\ Pulsewidth &= 23 \text{ } \mu\text{s} \\ Delay &= 8 \text{ } \mu\text{s} \\ Prescale &= 1 \end{aligned}$$

Dosazením vyjdou následující hodnoty registrů:

$$\begin{aligned} PR2 &= 91 \\ CCPR1L &= 46 \\ CCP1CON\langle 5:4 \rangle &= 0 \\ PWM1CON &= 16 \end{aligned}$$

6.4.3 Zpracování dat ze senzoru

Přijatá data ze senzoru je nutné přepočítat na číselnou hodnotu, jelikož se jedná o nezpracovaný výstup AD převodníku. Teplota je z dat vypočtena následujícím vztahem[22]:

$$Teplota = \frac{[Teplota 1:Teplota 0] \cdot 165 \cdot 100}{2^{16}} - 4000 \quad (6.10)$$

[Teplota 1:Teplota 0] = 14 bitová hodnota výstupu AD převodníku senzoru pro teplotu. Dva poslední bity <1:0> jsou nevyužity a vždy jsou nulové.

Vlhkost je vypočtena vztahem:

$$Teplota = \frac{[Vlhkost 1:Vlhkost 0] \cdot 100 \cdot 100}{2^{16}} \quad (6.11)$$

[Vlhkost 1:Vlhkost 0] = 14 bitová hodnota výstupu AD převodníku senzoru pro vlhkost. Dva poslední bity <1:0> jsou nevyužity a vždy jsou nulové.

Výsledné hodnoty jsou uloženy jako číslo s dvěma desetinnými místy, protože uC nepodporuje práci s plovoucí desetinou čárkou. Teplota je skladována bez odečtení konstanty -4000, aby všechna data byla ukládána jako bezznaménková (unsigned).

6.4.4 Ukládání do EEPROM

Použitá paměť má kapacitu 32 kB rozdělenou na stránky po 64 bytech. Prvních 64 bytů je vyhrazeno pro ukládání informací o paměti. V prvních dvou bytech je uložena adresa dalšího volného bytu pro zápis dat. Druhé dva byty uchovávají počet uložených záznamů.

7	Adresa 1	0	7	Adresa 0	0	7	Počet 1	0	7	Počet 0	0
---	----------	---	---	----------	---	---	---------	---	---	---------	---

Obrázek 6.3: Grafické znázornění využití začátku paměti.

První adresa pro uložení dat je 0x0040 a poslední možná adresa je 0x3FE0, protože data jsou ukládány po 16 bytových blocích, což umožňuje uložit až 1018 záznamů měření.

7	Rok	0	7	Měsíc	0	7	Den	0	7	Hodina	0
7	Minuta	0	7	Sekunda	0	7	ID senzoru 4	0	7	ID senzoru 3	0
7	ID senzoru 2	0	7	ID senzoru 1	0	7	ID senzoru 0	0	7	Teplota 1	0
7	Teplota 0	0	7	Vlhkost 1	0	7	Vlhkost 0	0	7	0x00	0

Obrázek 6.4: Grafické znázornění záznamu ukládaného do paměti.

6.4.5 Nastavení USB

USB je naprogramováno jako emulátor sériové linky s rychlostí 9600 baudů, bez parity, 8 datových bitů a jeden stop bit. Pro zprovoznění bylo využito předpřipraveného kódu výrobce, který je volně dostupný na stránkách výrobce².

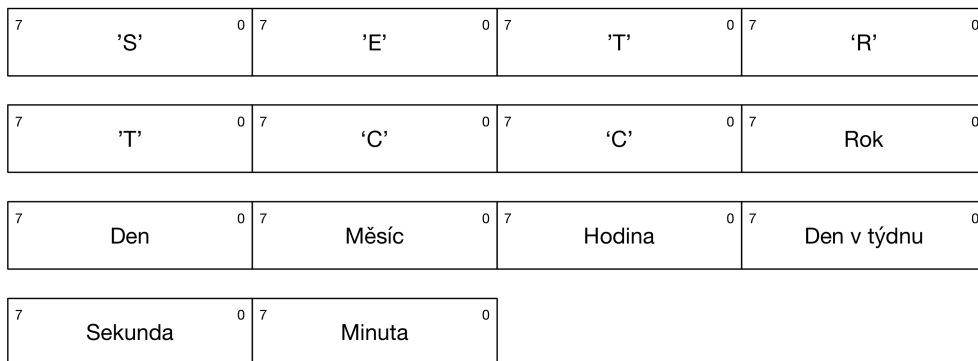
Rozhraní podporuje 3 příkazy READ, CLEAR a SETRTCC.

Příkaz READ postupně odešle všechny uložené záznamy v paměti ve stejné podobě jako jsou uloženy (viz obr.) jen poslední byte je nahrazen znakem nové řádky ('\n').

Příkaz CLEAR smaže všechny uložené záznamy v paměti, přepsáním prvních 4 bytů na 0x0040 a 0x0000, což znamená, že zápis příštího záznamu začíná na adrese 0x0040 a počet uložených záznamů je 0.

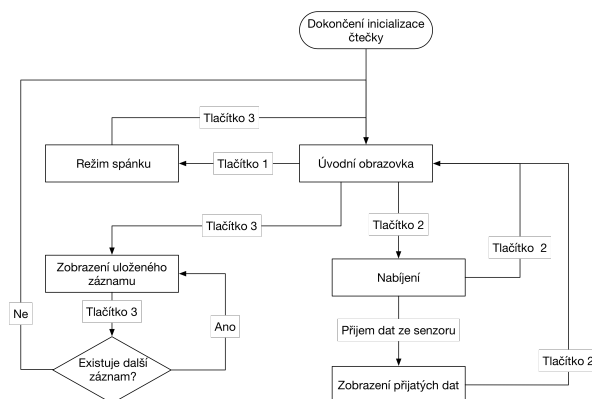
²<https://www.microchip.com/mplab/microchip-libraries-for-applications>

Příkaz SETRTCC složí k nastavení vnitřního obvodu reálného času a musí být následován 7 byty, které obsahují čas na který má být obvod nastaven. Data musí být zapsána ve formátu binárně kódovaného čísla (BCD) a význam jednotlivých bytů je znázorněn na obrázku 6.5, toto pořadí je zvoleno, protože koresponduje s pořadím nastavování hodnot obvodu reálného času.



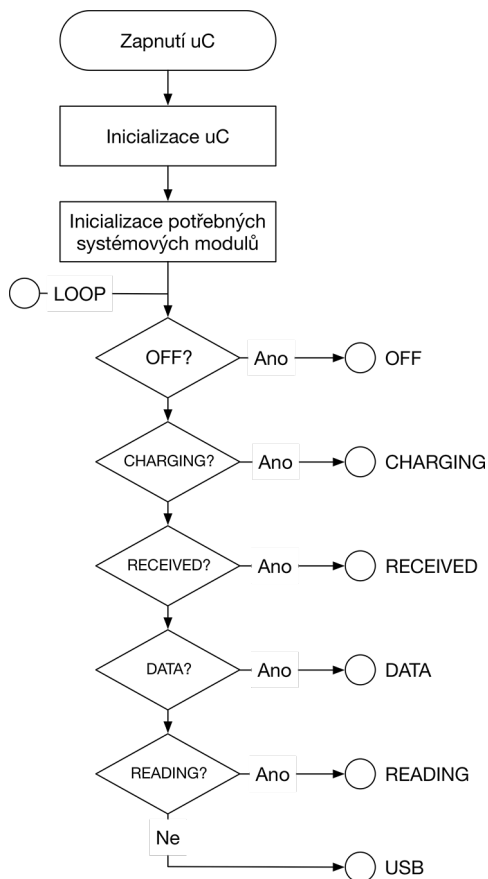
Obrázek 6.5: Grafické znázornění paketu sloužícího k nastavení aktuálního času ve čtečce.

6.4.6 Blokový diagram uživatelského prostředí

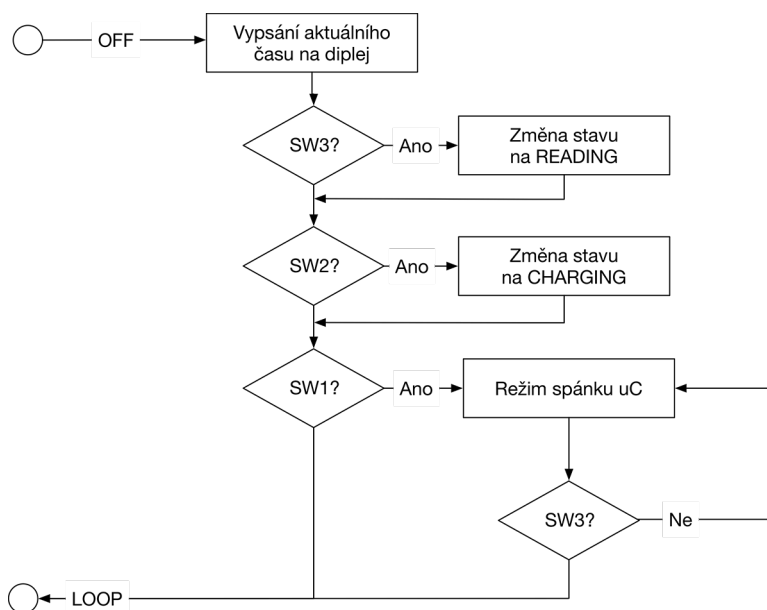


Obrázek 6.6: Blokový diagram znázorňující pohyb v uživatelském prostředí čtečky za pomoci tlačítek.

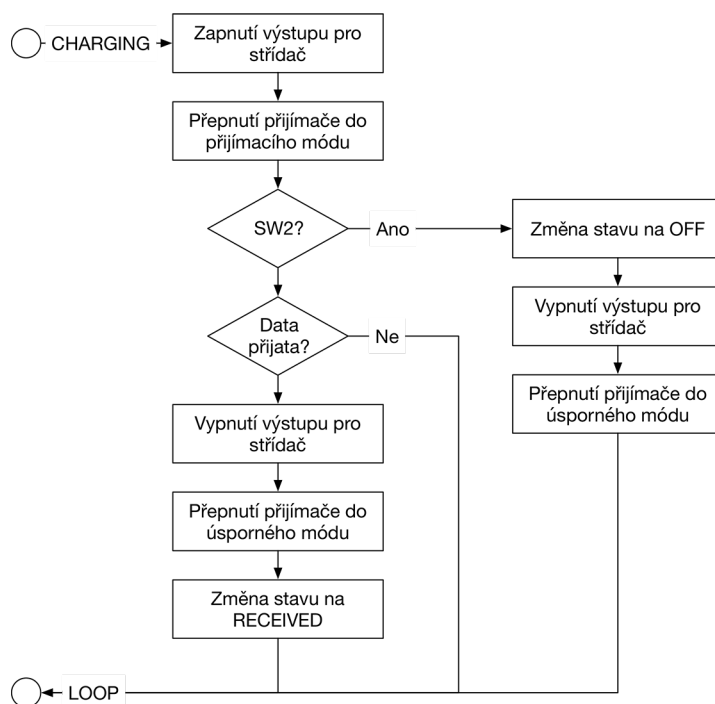
6.4.7 Blokový diagram kódu



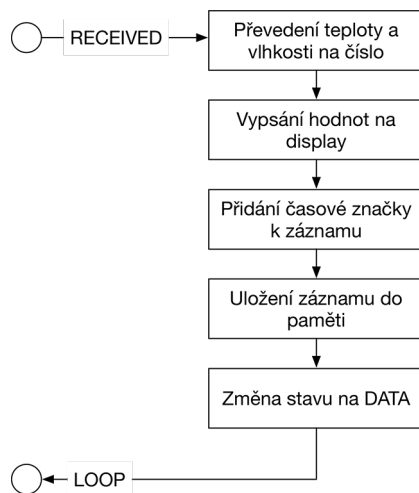
Obrázek 6.7: Blokový diagram znázorňující hlavní část programu.



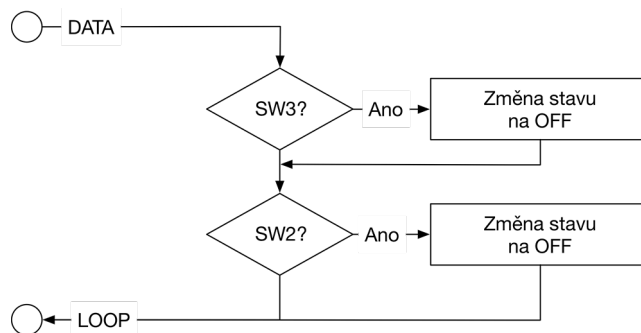
Obrázek 6.8: Blokový diagram znázorňující spouštěný kód hlavní smyčky ve stavu OFF.



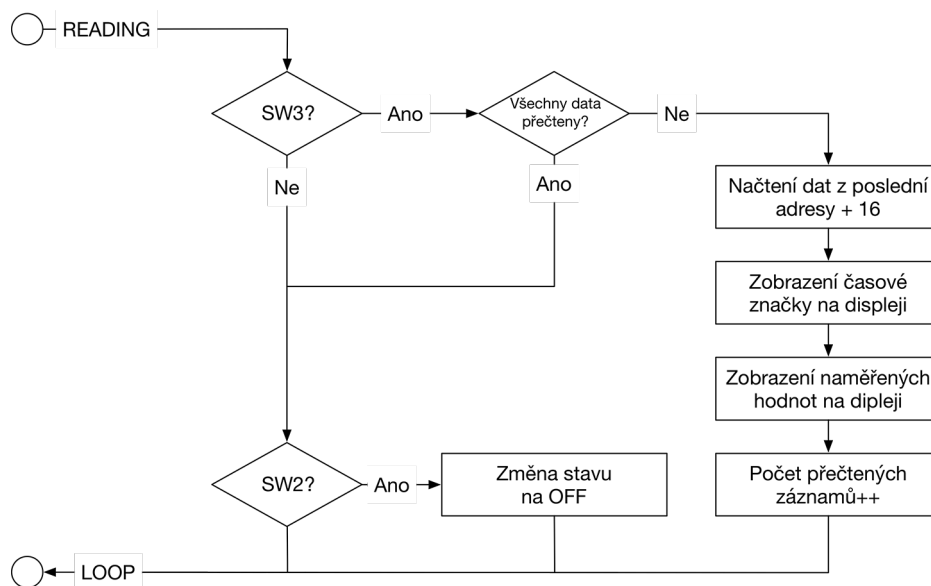
Obrázek 6.9: Blokový diagram znázorňující spouštěný kód hlavní smyčky ve stavu CHARGING.



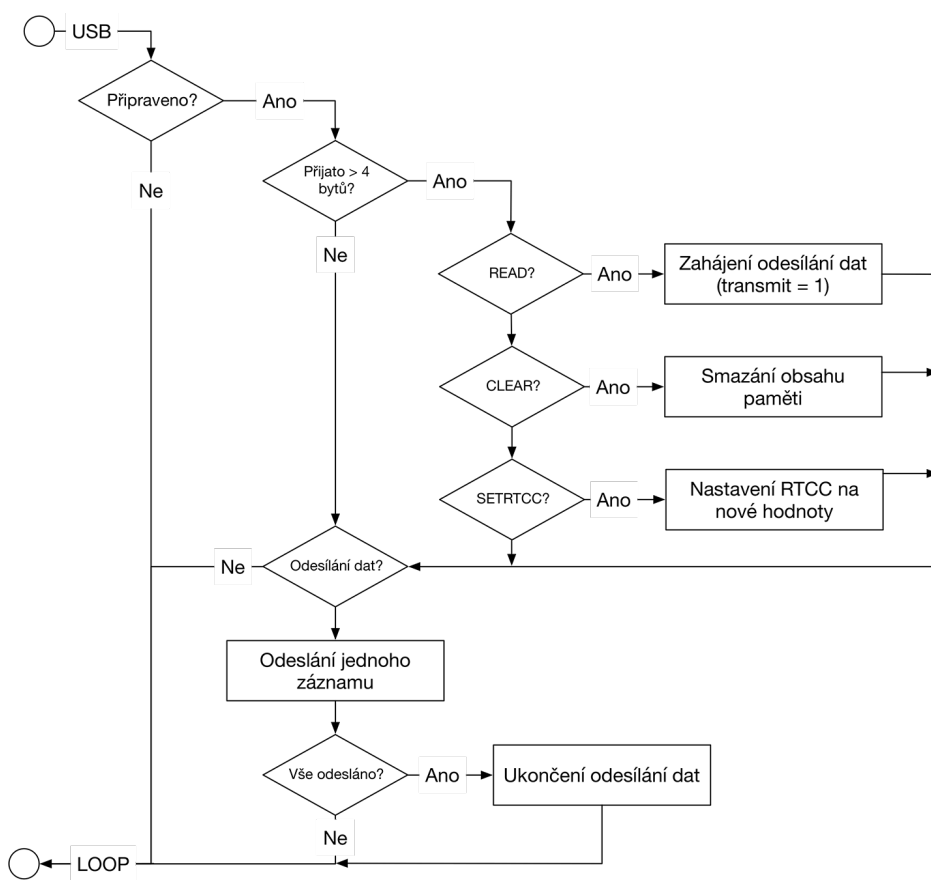
Obrázek 6.10: Blokový diagram znázorňující spouštěný kód hlavní smyčky ve stavu RECIEVED.



Obrázek 6.11: Blokový diagram znázorňující spouštěný kód hlavní smyčky ve stavu DATA.



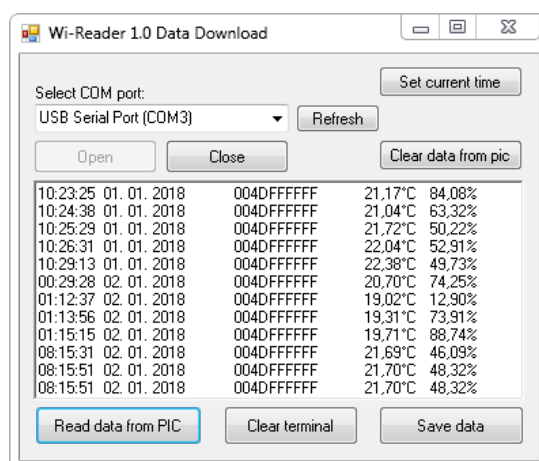
Obrázek 6.12: Blokový diagram znázorňující spouštěný kód hlavní smyčky ve stavu READING.



Obrázek 6.13: Blokový diagram znázorňující kód obsluhy USB.

Software pro PC

Program určený pro komunikaci se čtečkou přes USB je napsán v jazyce C# (C Sharp) a umožňuje načíst data ze čtečky, která následně zobrazí. První sloupec je časová značka odměru, druhý sloupec je unikátní identifikátor senzoru, třetí sloupec obsahuje naměřenou teplotu a v poslední je vlhkost. Načtená data je možné uložit ve dvou formátech: Čistě textovém (txt) - sloupce jsou odděleny tabulátorem a hodnoty jsou včetně jednotek. Data oddělená čárkou (csv) - sloupce jsou odděleny středníkem, časová značka je ve formátu 'yyyy-MM-dd HH:mm:ss', který MS Excel automaticky převede na datum a čas. Naměřené hodnoty jsou uloženy bez jednotek. Program zároveň umožňuje smazat veškeré záznamy uložené v paměti čtečky či nastavit aktuální čas. Program je funkční jak na operačním systému Microsoft Windows 10, tak i starším Microsoft Windows 7 SP1, kde je ale zapotřebí nainstalovat ovladač pro čtečku.



Obrázek 7.1: Okno programu pro vyčítání dat ze čtečky.

Testování

Hotové zařízení bylo otestováno na rychlost odměru ze senzoru. Výsledky měření jsou v tabulkách 8.1 a 8.2.

#	Senzor umístěn uvnitř cívky		Senzor umístěn mimo cívky	
	Zcela vybitý kondenzátor	Opakované měření s přednabitým kondenzátorem	Zcela vybitý kondenzátor	Opakované měření s přednabitým kondenzátorem
1	26,8 s	8,8 s	25,1 s	7,9 s
2	27,8 s	8,8 s	25,7 s	8,1 s
3	27,1 s	8,7 s	26 s	8,3 s

Tabulka 8.1: Měření při vzdálenosti cívek cca 4 mm

#	Senzor umístěn uvnitř cívky		Senzor umístěn mimo cívky	
	Zcela vybitý kondenzátor	Opakované měření s přednabitým kondenzátorem	Zcela vybitý kondenzátor	Opakované měření s přednabitým kondenzátorem
1	42,3 s	11,6 s	39,2 s	9,3 s
2	40,2 s	11 s	39,3 s	9,2 s
3	41,7 s	11,1 s	39 s	9,3 s

Tabulka 8.2: Měření při vzdálenosti cívek cca 22 mm

Možný další vývoj

Předchozí kapitola ukazuje, že rychlost odměrů je pro reálné nasazení příliš pomalá. Tento problém je možné vyřešit více způsoby. Na straně senzoru by bylo možné optimalizovat spotřebu uC snížením frekvence vnitřního oscilátoru či zvýšit rychlost odesílání dat, protože vysílání je energeticky nejnáročnější operace. Snížení spotřeby senzoru by znamenalo, že by bylo možné použít kondenzátor s menší kapacitou, což by znamenalo rychlejší nabíjení.

Další možnost jak snížit čas nabití senzoru, by bylo upravit primární cívku (snížit počet závitů, zmenšit kondenzátor) a tím dosáhnout zvýšení rezonanční frekvence, což by mělo kladný vliv na množství přenesené energie. Tato úprava by vyžadovala opětovné naladění sekundární cívky, tak aby se rezonanční frekvence cívek shodovaly.

V neposlední řadě by bylo možné zvýšit napájecí napětí střídače, aby výstup dosahoval vyšší amplitudy a tím pádem by tekla cívkou větší střídavý proud, což by způsobilo zvýšení množství přenesené energie. Funkčnost čtečky by bylo vhodné rozšířit o možnost pojmenovat jednotlivé senzory na základě sériového čísla senzoru, což by zvýšilo uživatelský komfort a usnadnilo identifikaci umístění senzoru, jelikož současná identifikace na základě 5 bytového ID není příliš uživatelsky přívětivá.

Hardware čtečky by chtělo doplnit o hodinový krystal pro obvod reálného času, protože použití vnitřního RC oscilátoru se ukázalo jako nevhodné, jelikož dochází k opoždování času.

Závěr

Na základě teoretického rozboru byl navržen a vyroben bezdrátový senzor určený pro zabudování do stavební konstrukce, jehož funkce je monitorování stavu vlhkosti a teploty uvnitř izolační vrstvy konstrukce. Současně se senzorem byla navržena a vyrobena čtečka, která slouží k napájení senzoru přes indukční vazbu a následný příjem dat z něj. Data ze čtečky je možné, díky naprogramované aplikaci, přenést do počítače přes USB, kde je možné s nimi dále pracovat. Obě zařízení jsou zprovozněna a funkční.

Některé části, zejména zprovožňování a vytváření firmwaru pro mikrokontroléry, zabraly o dost více času než jsem předpokládal. Průtahy převážně vznikaly kvůli chybě v zapojení, či špatnému nastavení registru nebo nefunkční součástce. Ale všechny problémy se mi podařilo odstranit a dotáhnout zařízení k plné funkčnosti. Bohužel kvůli těmto průtahům již nezbyl čas na důkladnější odladění bezdrátového napájení senzoru, aby odměry probíhaly rychleji. Nedostatek času také znemožnil porovnání naměřených hodnot senzorem s jinými čidly, aby bylo ověřeno, že je měření spolehlivé a přesné.

Práce pro mě představovala výzvu v podobě návrhu dvou zařízení, kterou se mi podařilo splnit a také mě obohatila mnoha novými zkušenostmi a poznatky, protože jsem během práce řešil celý proces výroby hardwaru od výběru součástek, přes návrh obvodových schémat, návrhu plošných spojů až po osazení a oživení finálního výrobku.

Vyrobený senzor a čtečka jsou spíše prototypem sloužícím jako nástroj pro další vývoj, protože tato práce je jen začátkem cesty k finálnímu výrobku. Pevně věřím, že navržený senzor bude po dokončení vývoje sloužit v mnoha dřevostavbách jako nástroj pro včasnou detekci změn vlhkosti uvnitř konstrukce a umožní tak včasné odstranění závady, dříve než dojde k poškození nosné konstrukce.

Literatura

- [1] Statistika výstavby rodinných domů a dřevostaveb v České republice. *TZB-info [online]*, [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/15771-statistika-vystavby-rodinnych-domu-a-drevostaveb-v-ceske-republice>
- [2] ĎAĎO, S.; KREIDL, M.: *Senzory a měřicí obvody*. Praha: České vysoké učení technické, 1996, ISBN 80-01-01500-9.
- [3] farsens: Battery Free RFID Sensors - Humidity/Moisture - Farsens Wireless Sensors [online]. 2018, [Citováno 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.farsens.com/en/products/battery-free-rfid-sensors/humidity-moisture/>
- [4] Semiconductor, O.: ON Semiconductor: Wireless Sensors. 2018, [Citováno 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/content.do?id=18702>
- [5] Tags, W. S.: Wireless Sensor Tag Pro | Wireless Sensor Tags. 2017, [Citováno 2018-01-02]. Dostupné z: <https://store.wirelesstag.net/products/wireless-tag-pro?variant=5187141380>
- [6] OmniSense: OmniSense Wireless Sensors:S-10 Wireless T, %RH, WME Sensor. 2018, [Citováno 2018-01-02]. Dostupné z: <https://shop.omnisense.com/s-10-wireless-t-rh-wme-sensor>
- [7] UCEEB: Moisture Guard - Monitoring vlhkosti uvnitř dřevěných konstrukcí. [Citováno 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.moistureguard.cz>
- [8] Campr, T.: Bezdrátový senzor vlhkosti a teploty stavebních materiálů, 2017, projekt 2. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D.

- [9] Campr, T.: Bezdrátový senzor vlhkosti a teploty stavebních materiálů, 2016, projekt 1. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D.
- [10] Klíma, J.: Bezdrátový senzor vlhkosti a teploty, 2014, projekt 2. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D.
- [11] Klíma, J.: Bezdrátový senzor vlhkosti a teploty stavebních materiálů, 2014, projekt 1. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Jan Včelák, Ph.D.
- [12] KUBEŠ, P.; KYNCL, Z.: *Fyzika I. Vyd. 2.* Praha: České vysoké učení technické, 1996, ISBN 80-010-1487-8.
- [13] Leopold Summerer, O. P.: Concepts for wireless energy transmission via laser. [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/7348/7fa96475971e74089df40ccda69c678b30f2.pdf>
- [14] prof. Ing. Miroslav Husák, C.: Mikroelektronické zdroje energie z okolí – Energy harvesting. *DPS Elektronika od A do Z*, 2013, [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyvoj/id:18070/mikroelektronicke-zdroje-energie-z-okoli-energy-harvesting>
- [15] Energie je všude. Obvody pro Energy Harvesting aby jeden hledal. *Vývoj.HW.cz*, [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz//napajeni/energie-je-vsude-obvody-pro-energy-harvesting-aby-jeden-hledal-1-dil.html>
- [16] Výpočet cívek. *V: Pandatron - elektrotechnický magazín [online]*, [cit. 2016-05-31]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?209&vypocet_civek
- [17] Rezonance. [cit. 2016-05-31]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/sbirka/TEORIE/rezonance.html>
- [18] Microchip Technology Inc.: *PIC12LF1840T39A [online]*. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001636B.pdf>
- [19] Atmel: *ATA8742 [online]*. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-9151-Smart-RF-ATA8742_Datasheet.pdf
- [20] Silicon labs: *Si4010-C2 [online]*. Dostupné z: <http://www.silabs.com/SupportDocuments/TechnicalDocs/Si4010.pdf>
- [21] Texas instruments: *CC430F5123 [online]*. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc430f5123.pdf>
- [22] Texas instruments: *HDC1080 [online]*. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1080.pdf>

-
- [23] Sensirion: *SHT21 [online]*. Dostupné z: https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity_Sensors/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT21_Datasheet_V4.pdf
- [24] Silicon labs: *Si7021 [online]*. Dostupné z: <http://www.silabs.com/SupportDocuments/TechnicalDocs/Si7021-A20.pdf>
- [25] Powercast: *P2110 [online]*. Dostupné z: <http://www.powercastco.com/test566alpha/wp-content/uploads/2009/03/p2110-datasheet-rev-b.pdf>
- [26] Texas instruments: *BQ25504 [online]*. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25504.pdf>
- [27] Maxim integrated: *MAX17710 [online]*. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX17710.pdf>
- [28] Linear technology: *LTC3105 [online]*. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3105fb.pdf>
- [29] Microchip Technology Inc.: *PIC18F46J50 [online]*. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39931d.pdf>
- [30] Microchip Technology Inc.: *MRF39RA [online]*. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001778B.pdf>
- [31] Microchip Technology Inc.: *SPI Overview and Use of the PICmicro Serial Peripheral Interface [online]*. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/spi.pdf>
- [32] Microchip Technology Inc.: *24AA512 [online]*. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21754M.pdf>
- [33] ST Microelectronics: *SPV1050 [online]*. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/3e/91/0f/7c/32/3e/46/dd/DM00100984.pdf/files/DM00100984.pdf/jcr:content/translations/en.DM00100984.pdf>
- [34] Český telekomunikační úřad: *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/11.2016-13 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu [online]*. Dostupné z: <http://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/vseobecne-opravneni-c.vo-r/10/11.2016-13/obrazky/vo-r10-112016-13.pdf>
- [35] Philips Semiconductors (now NXP Semiconductors): *UM10204 I2C-bus specification and user manual [online]*. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf

- [36] Texas instruments: *TPS6124x 3.5-MHz High Efficiency Step-Up Converter [online]*. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61240.pdf>
- [37] Texas instruments: *LMR62014 SIMPLE SWITCHER® 20Vout, 1.4A Step-Up Voltage Regulator in SOT-23 [online]*. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmr62014.pdf>
- [38] VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC.: *Si4532ADY N- and P-Channel 30 V (D-S) MOSFET [online]*. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/71133/si4532ady.pdf>
- [39] PragoBoard s.r.o. – vícevrstvé, dvou a jednovrstvé plošné spoje. [online]: *POOL servis – princip výroby*. [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: www.pragoboard.cz/pool_servis
- [40] Microchip Technology Inc.: *Wireless Security Remote Control Development Kit User's Guide [online]*. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41646A.pdf>
- [41] Microchip Technology Inc.: *PICkit™ 3 In-Circuit Debugger/Programmer User's Guide [online]*. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/52116A.pdf>
- [42] Microchip Technology Inc.: *MPLAB® X IDE User's Guide [online]*. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002027D.pdf>
- [43] Microchip Technology Inc.: *MPLAB® XC8 C Compiler User's Guide [online]*. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002053G.pdf>

Seznam použitých zkratek

AD	Analog/digitál
ADC	Analog to digital converter
DC	Direct current
DPS	Deska Plošných Spojů
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EH	Energy harvester
FSK	Frequency-Shift Keying
GPIO	General Purpose Input/Output
I2C	Inter-Integrated Circuit
IO	Integrovaný obvod
I/O	Input/output
LDO	Low dropout output
NTC	Negative Temperature Coefficient
OOK	On-Off Keying
PLL	Phase Locked Loop
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
RTCC	Real Time Clock and Calendar
SPI	Serial Peripheral Interface

A. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

TX Transmit

USB Universal Serial Bus

UHF Ultra High Frequency

uC Mikrokontrolér

Naměřená hodnoty - cívky

Zdrojová data pro grafy v kapitole 2.2.2

f[kHz]	U1[mV]	UG[V]	U2[V]	I1[mA]	I2	P1[mW]	P2[mW]	P2/P1
20,0	9,8	9,2	1,4	7,5	3,2	69,0	4,4	6,4%
20,2	10,3	9,2	1,5	7,9	3,5	72,9	5,3	7,2%
20,4	11,0	9,2	1,6	8,5	3,8	77,8	6,1	7,9%
20,6	11,3	9,2	1,7	8,7	4,1	80,0	7,1	8,9%
20,8	12,0	9,2	1,8	9,2	4,4	84,9	8,0	9,4%
21,0	12,3	9,2	1,9	9,5	4,6	87,0	8,9	10,2%
21,2	12,5	9,2	2,0	9,6	4,7	88,5	9,5	10,7%
21,4	12,5	9,2	2,0	9,6	4,7	88,5	9,5	10,7%
21,6	12,3	9,2	2,0	9,5	4,7	87,0	9,5	10,9%
21,8	11,8	9,2	2,0	9,1	4,6	83,5	9,1	10,9%
22,0	10,8	9,2	1,8	8,3	4,3	76,4	7,9	10,4%
22,2	9,8	9,2	1,7	7,5	4,1	69,4	7,0	10,1%
22,4	9,1	9,2	1,6	7,0	3,8	64,4	6,1	9,4%
22,6	8,4	9,2	1,5	6,4	3,5	59,3	5,1	8,6%
22,8	7,8	9,2	1,4	6,0	3,3	55,2	4,5	8,2%
23,0	7,3	9,2	1,3	5,6	3,1	51,7	3,9	7,6%

Tabulka B.1: Hodnoty naměřené kolem rezonanční frekvence při sinusovém průběhu

B. NAMĚŘENÁ HODNOTY - CÍVKY

f[kHz]	U1[mV]	UG[V]	U2[V]	I1[mA]	I2	P1[mW]	P2[mW]	P2/P1
20	12,9	9,5	1,61	9,9	3,8	94,3	6,1	6,5%
20,2	13,5	9,5	1,73	10,4	4,1	98,7	7,1	7,2%
20,4	14	9,5	1,88	10,8	4,5	102,3	8,4	8,2%
20,6	15	9,5	1,97	11,5	4,7	109,6	9,2	8,4%
20,8	15	9,5	2,11	11,5	5,0	109,6	10,6	9,6%
21	15,8	9,5	2,21	12,2	5,2	115,5	11,6	10,0%
21,2	16	9,5	2,32	12,3	5,5	116,9	12,8	10,9%
21,4	16	9,5	2,4	12,3	5,7	116,9	13,6	11,7%
21,6	16,8	9,5	2,48	12,9	5,9	122,8	14,6	11,9%
21,8	17	9,5	2,53	13,1	6,0	124,2	15,2	12,2%
22	16,9	9,5	2,54	13,0	6,0	123,5	15,3	12,4%
22,2	16	9,5	2,44	12,3	5,8	116,9	14,1	12,1%
22,4	16	9,5	2,22	12,3	5,3	116,9	11,7	10,0%
22,6	13	9,5	2	10,0	4,7	95,0	9,5	10,0%
22,8	12,3	9,5	1,81	9,5	4,3	89,9	7,8	8,6%
23	12	9,5	1,69	9,2	4,0	87,7	6,8	7,7%

Tabulka B.2: Hodnoty naměřené v okolí rezonanční frekvence při obdélníkovém průběhu

Vychýlení [cm]	U2 [V]
0	2,55
1	2,55
2	2,55
3	2,53
4	2,44
5	2,21
6	1,8
7	1,23
8	0,66
9	0,163
10	0,16

Tabulka B.3: Hodnoty napětí na odporu R_2 při vychylování sekundární cívky od středu primární cívky a vertikální vzdálenosti cívek od sebe 3 mm

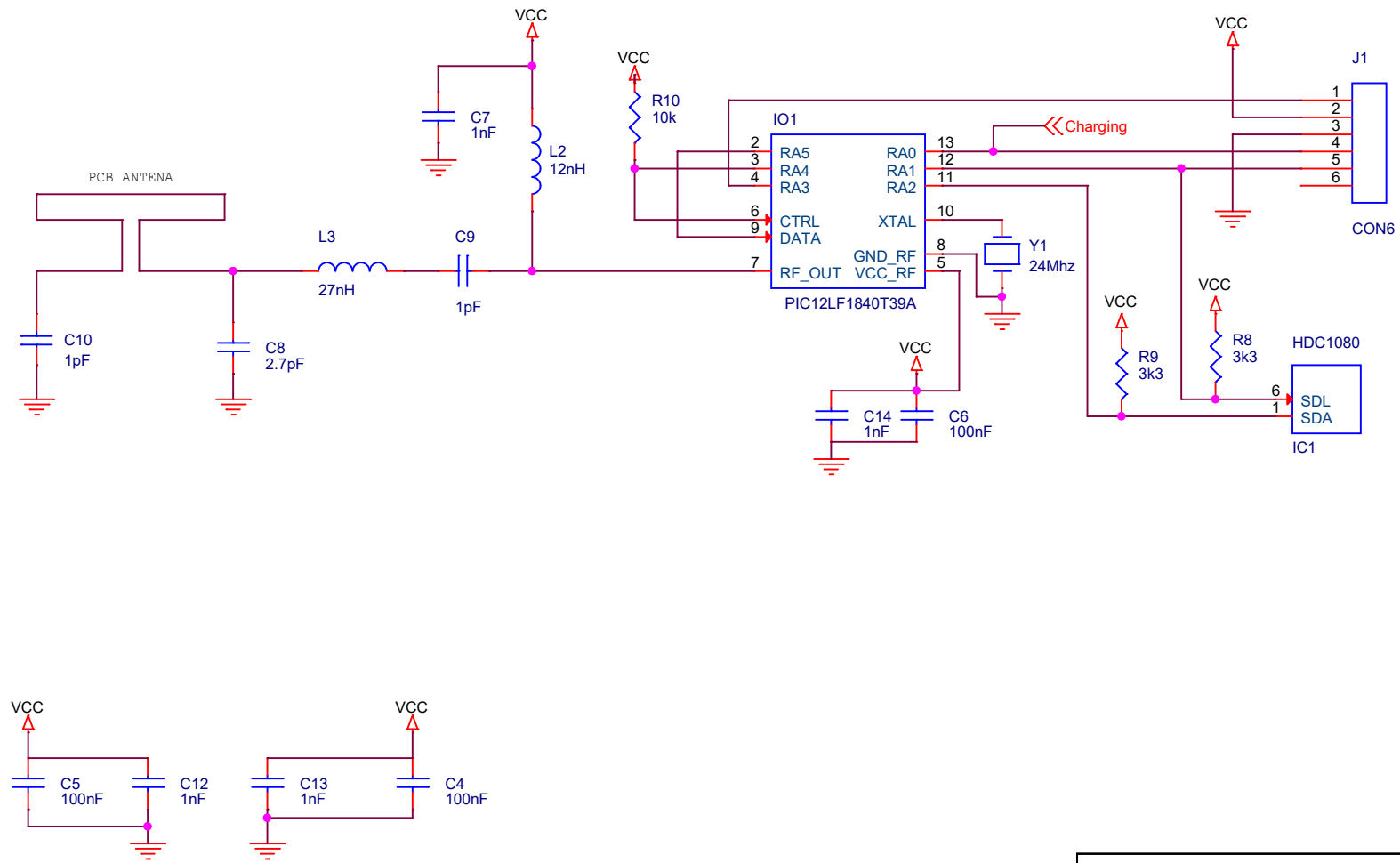
Vychýlení [cm]	U2 [V]
0	1,37
1	1,36
2	1,31
3	1,24
4	1,16
5	1,01
6	0,87
7	0,7
8	0,55
9	0,35
10	0,24

Tabulka B.4: Hodnoty napětí na odporu R_2 při vychylování sekundární cívky od středu primární cívky a horizontální vzdálenosti cívek od sebe 40 mm

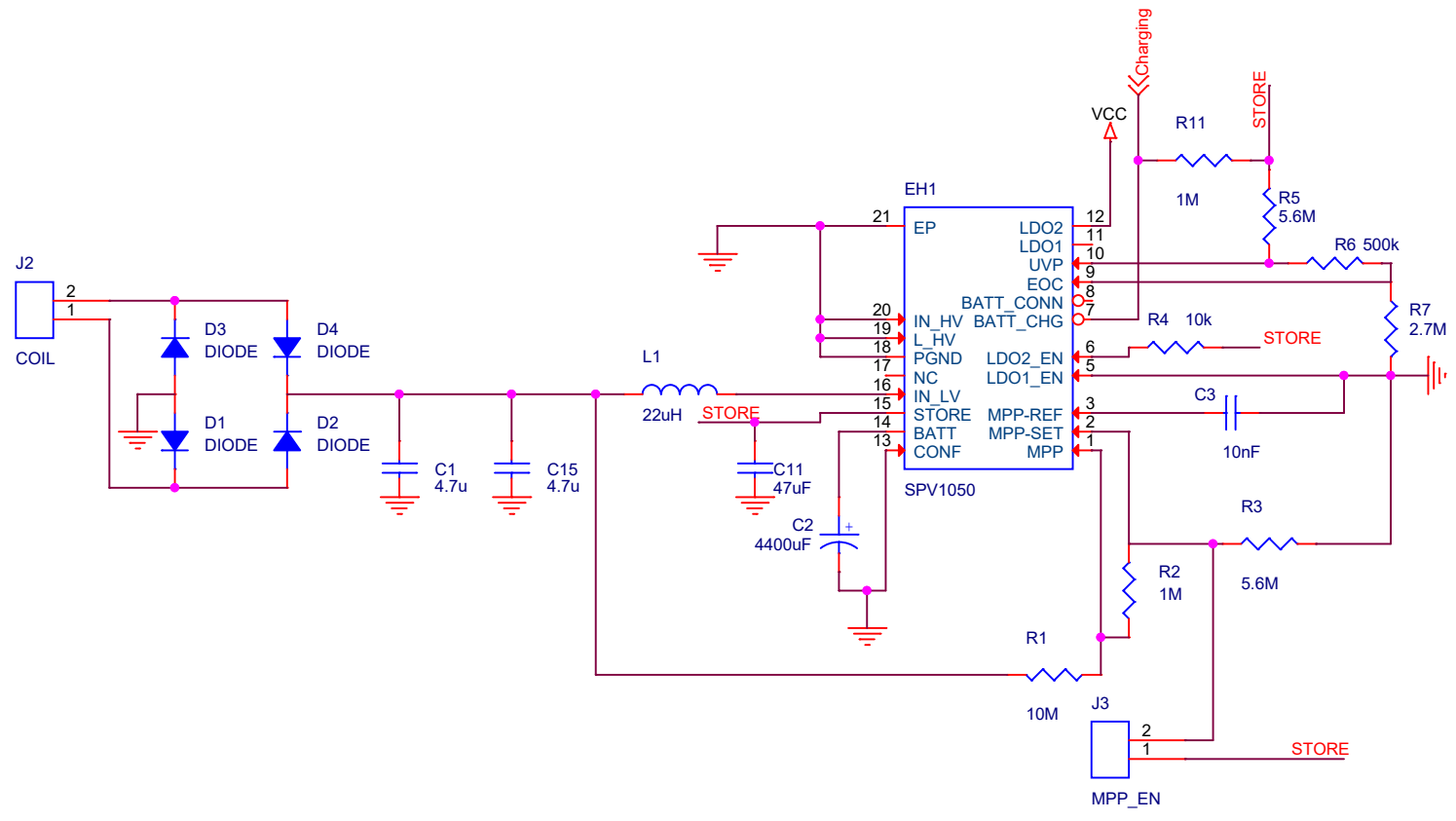
Vychýlení [cm]	U2 [V]
0	0,68
1	0,68
2	0,65
3	0,63
4	0,58
5	0,52
6	0,46
7	0,39
8	0,33
9	0,27
10	0,21

Tabulka B.5: Hodnoty napětí na odporu R_2 při vychylování sekundární cívky od středu primární cívky a horizontální vzdálenosti cívek od sebe 77 mm

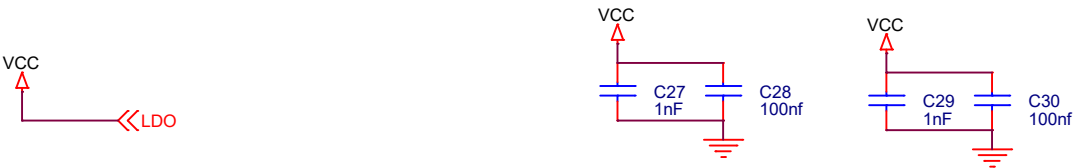
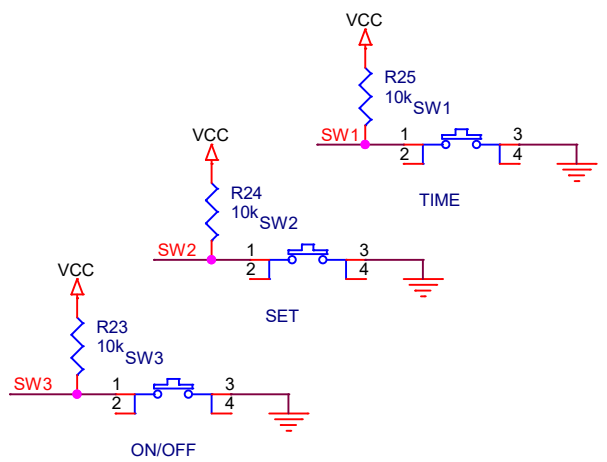
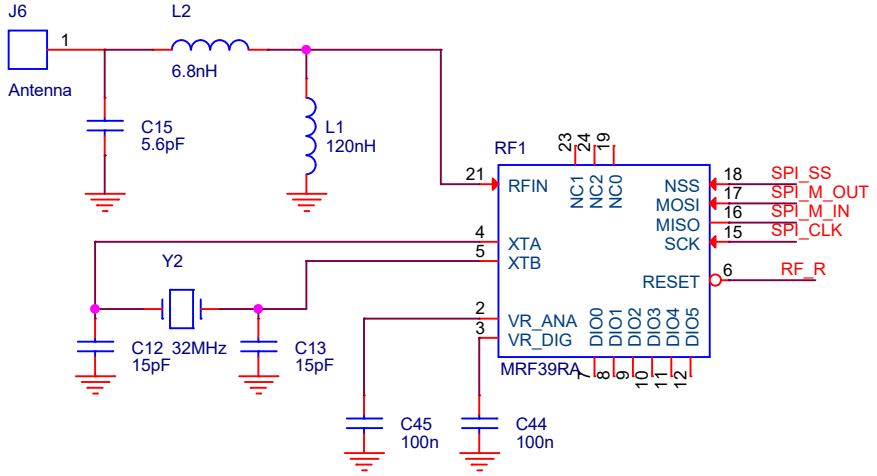
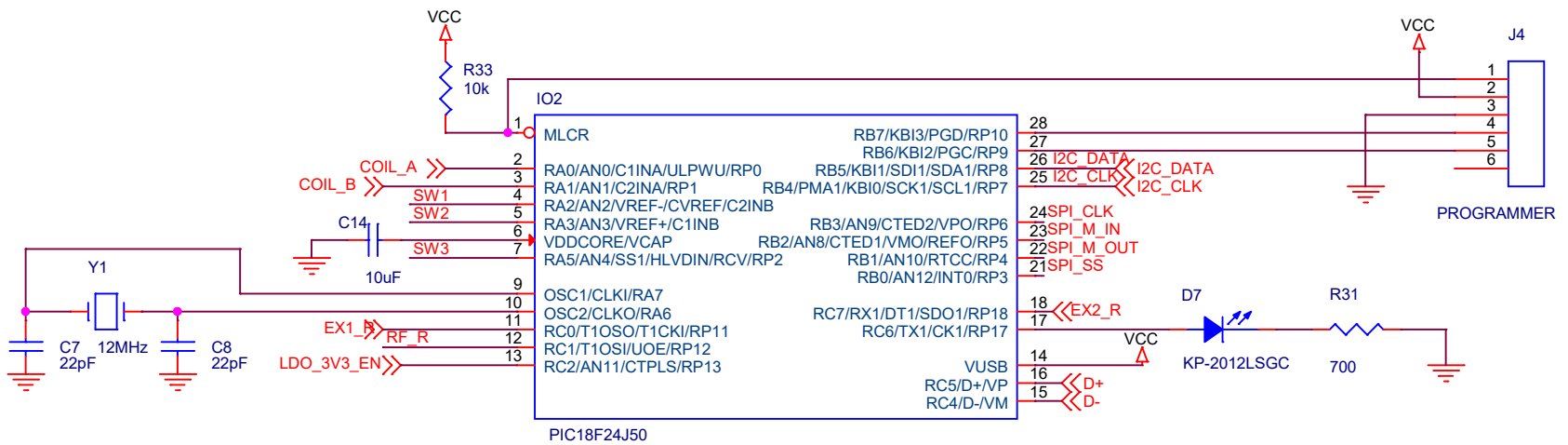
Obvodová schémata



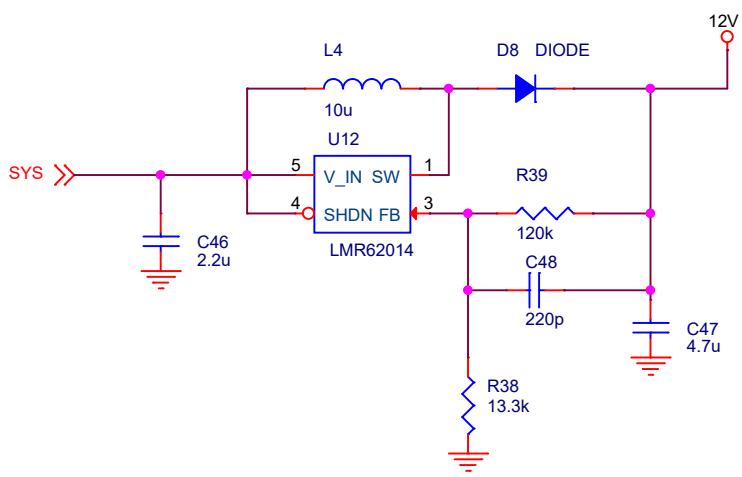
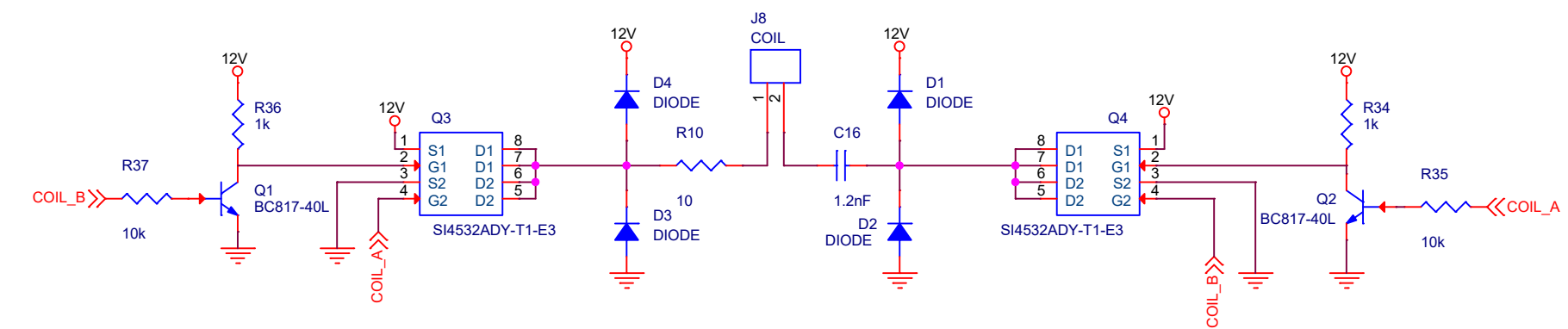
Title		
Sensor - uC a cidlo		
Size	Document Number	Rev
A4	1	1
Date:	Monday, January 08, 2018	Sheet 1 of 2



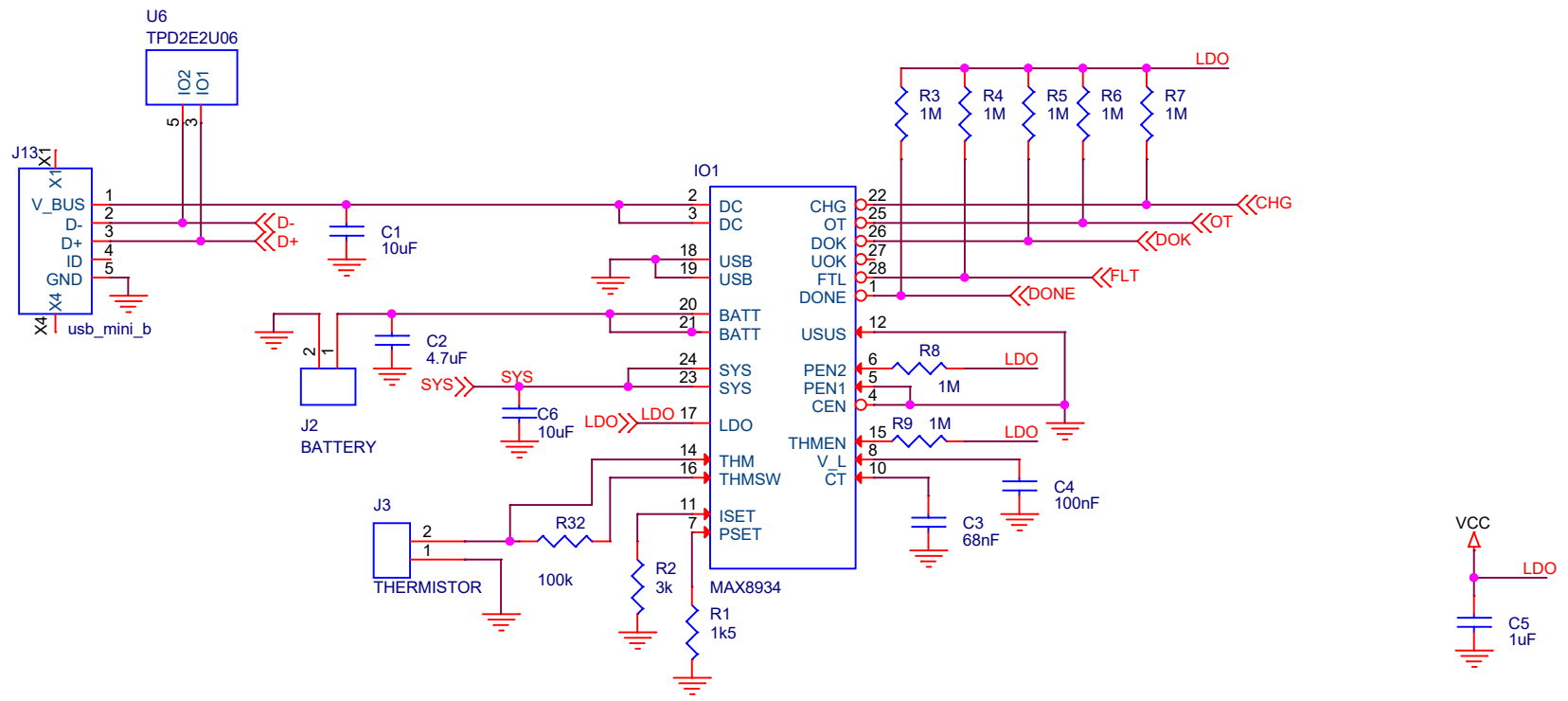
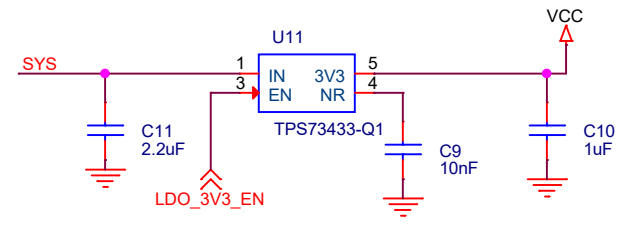
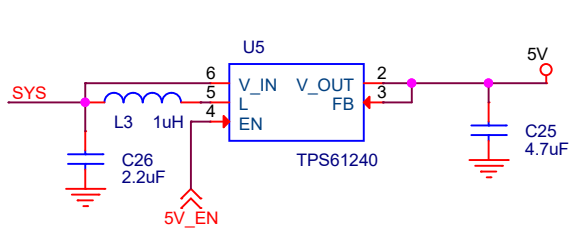
Title		
SENSOR - napajeni		
Size	Document Number	Rev
A4	2	1
Date:	Monday, January 08, 2018	Sheet 2 of 2



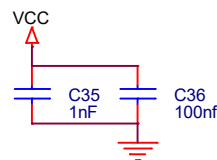
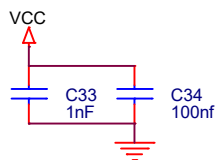
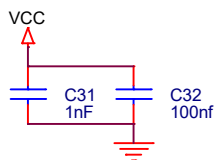
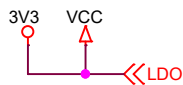
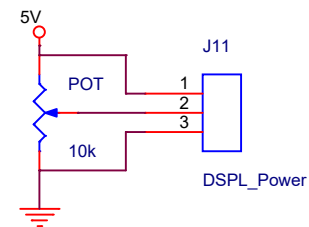
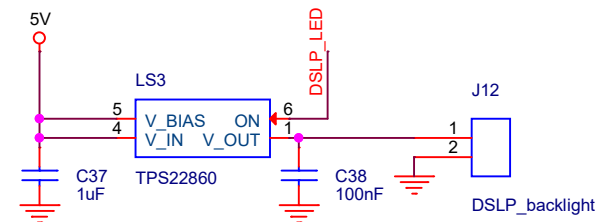
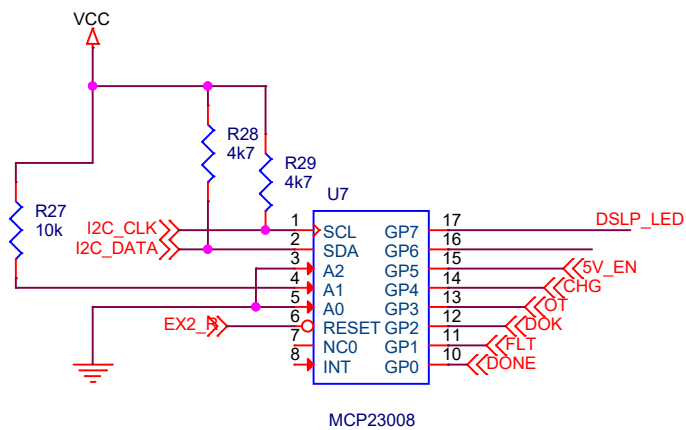
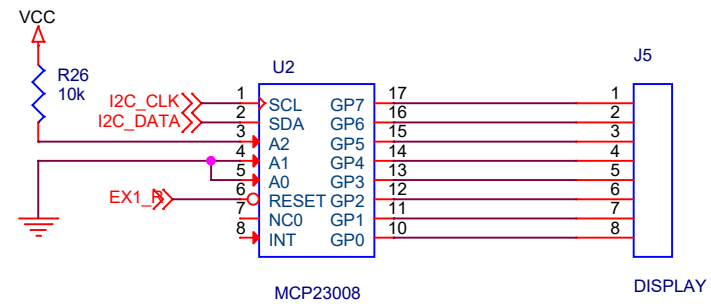
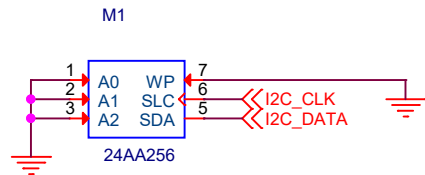
Title		
CTECKA - Ridici uC a RF prijimac		
Size	Document Number	Rev
A4	1	1.5
Date:	Monday, January 08, 2018	Sheet 1 of 4



Title		
CTECKA - Stridac civky vctne napajeni		
Size	Document Number	Rev
A4	2	1.5
Date:	Monday, January 08, 2018	Sheet 2 of 4



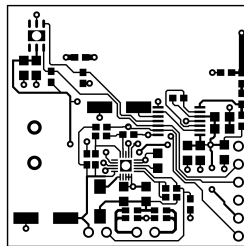
Title		
CTECKA - Napajeci obvody ctecky		
Size	Document Number	Rev
A4	3	1.5
Date:	Monday, January 08, 2018	Sheet 3 of 4



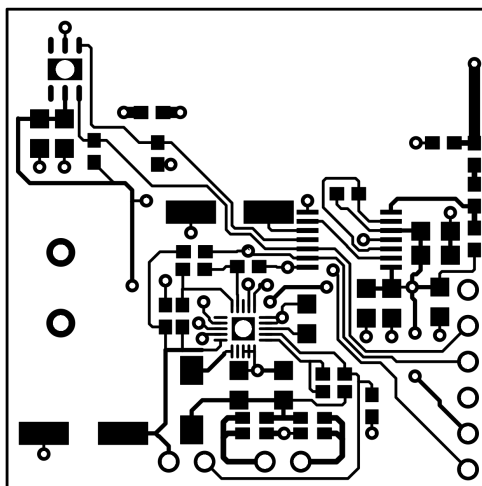
Title		
CTECKA - Pomocne obvody		
Size	Document Number	Rev
A4	4	1.5
Date:	Monday, January 08, 2018	Sheet 4 of 4

Desky plošných spojů

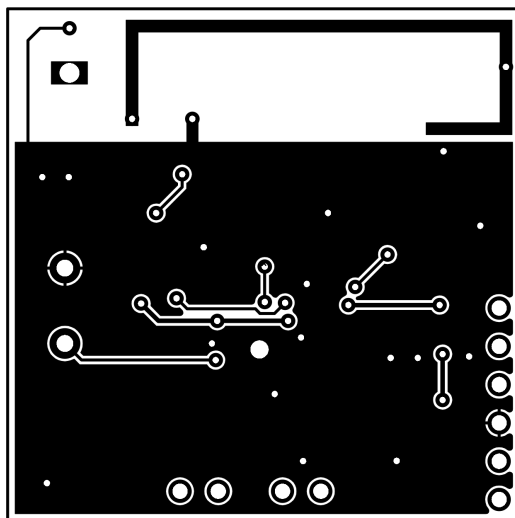
D.1 Senzor



Obrázek D.1: Vrchní vrstva DPS senzoru v měřítku 1:1.

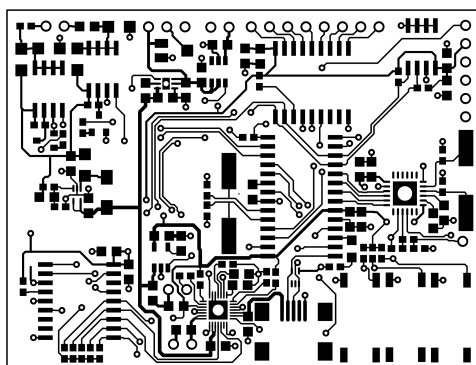


Obrázek D.2: Vrchní vrstva DPS senzoru v měřítku 2:1.

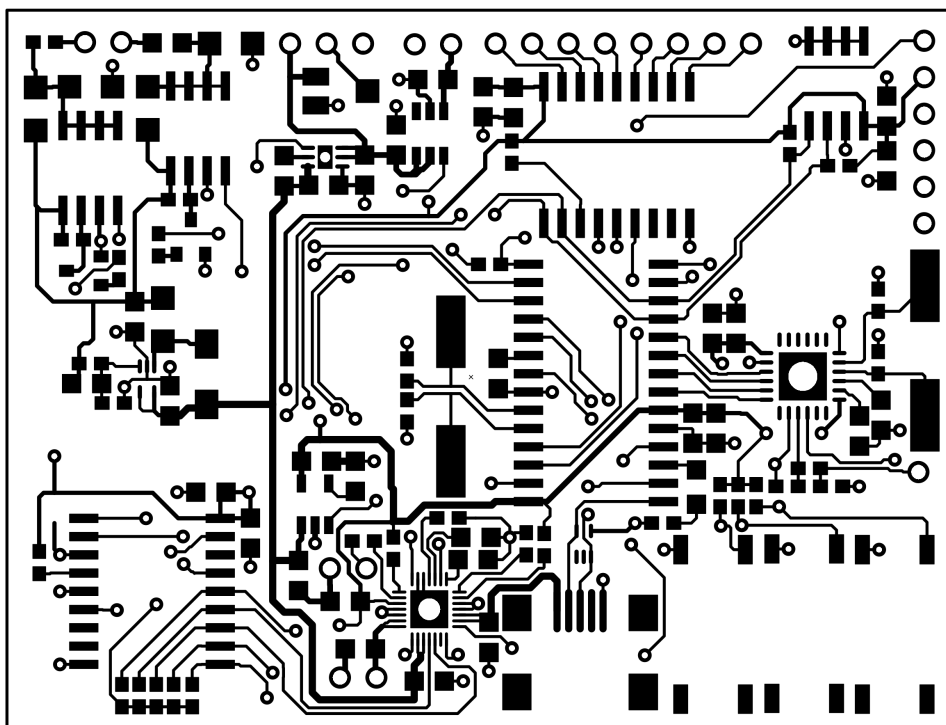


Obrázek D.3: Spodní vrstva DPS senzoru v měřítku 2:1.

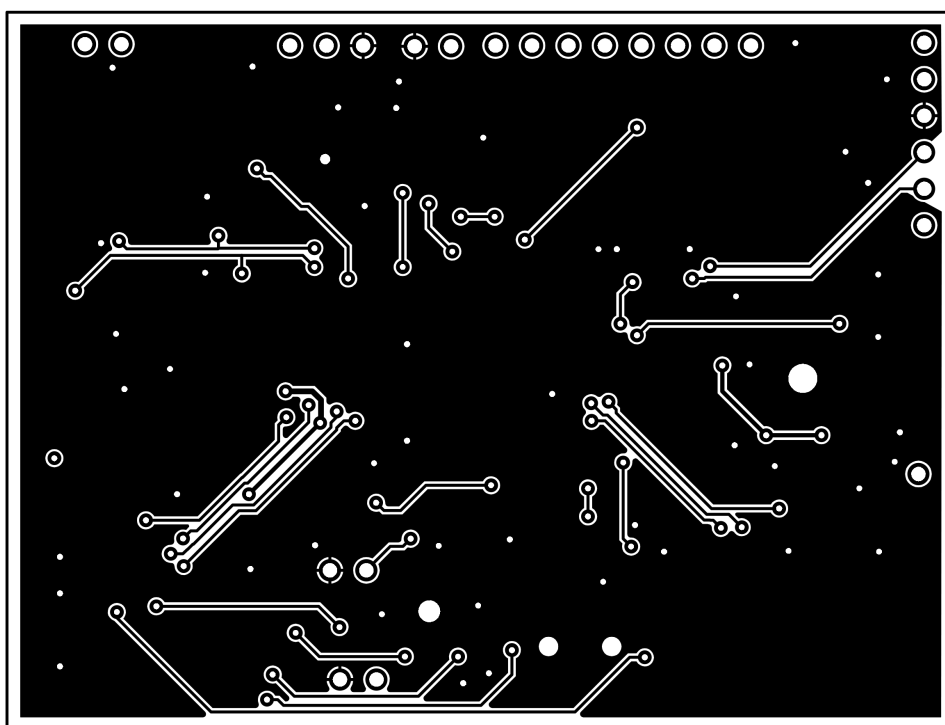
D.2 Čtečka



Obrázek D.4: Vrchní vrstva DPS čtečky v měřítku 1:1.



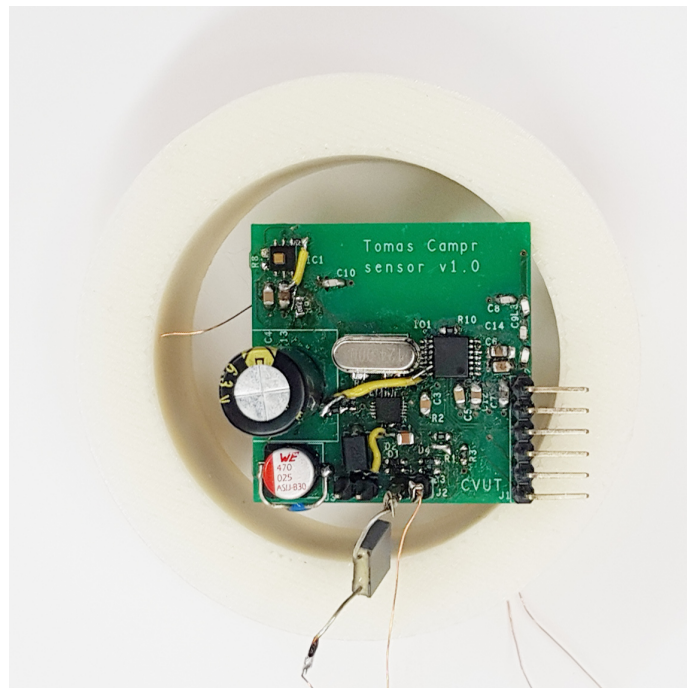
Obrázek D.5: Vrchní vrstva DPS čtečky v měřítku 2:1.



Obrázek D.6: Spodní vrstva DPS čtečky v měřítku 2:1.

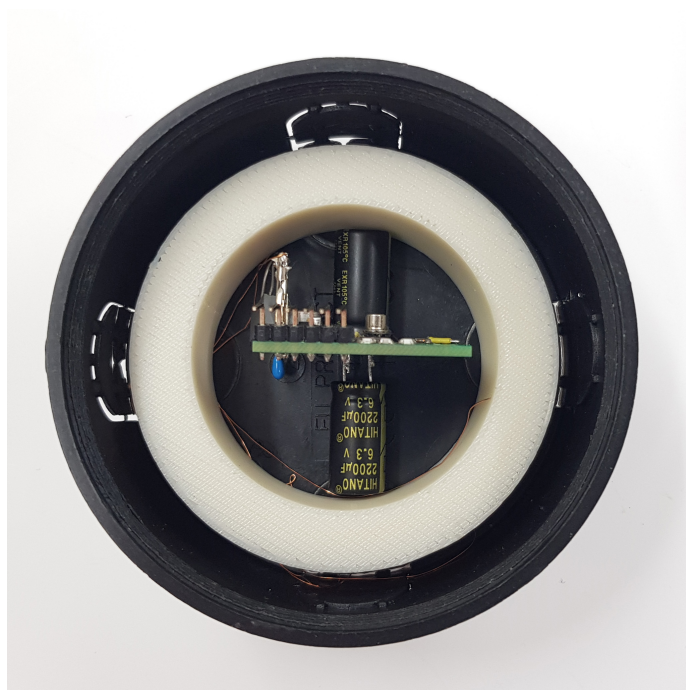
Fotografie finálního výrobku

E.1 Senzor



Obrázek E.1: Fotografie senzoru s viditelnou částí elektroniky.

E. FOTOGRAFIE FINÁLNÍHO VÝROBKU



Obrázek E.2: Fotografie senzoru umístěného v elektroinstalační krabici o průměru 80 mm .

E.2 Čtečka



Obrázek E.3: Fotografie spodní strany čtečky s umístěnými prvky ovládání.

E. FOTOGRAFIE FINÁLNÍHO VÝROBKU



Obrázek E.4: Fotografie rozmístění elektroniky uvnitř čtečky.

Obsah přiloženého archivu

exe	
├── src.....	Zdrojové kódy implementované aplikace pro Windows
├── install.....	Instalační balíček aplikace
└── Serial_receive.exe.....	Spustitelný soubor aplikace
firmware	
├── driver-windows-7.....	Ovladač čtečky pro Windows 7
├── ctecka_v1.zip...	Kompletní projekt z MPLABu pro firmware čtečky
└── senzor_v1.zip..	Kompletní projekt z MPLABu pro firmware senzoru
vyrobni-data	
├── ctecka.....	Výrobní data pro DPS čtečky
└── senzor	Výrobní data pro DPS senzoru