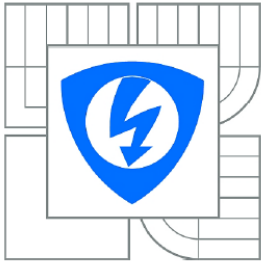




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

BEZDRÁTOVÝ SENZOR TEPLoty A RELATIVNÍ VLHKOSTI VZDUCHU

WIRELESS SENSOR OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

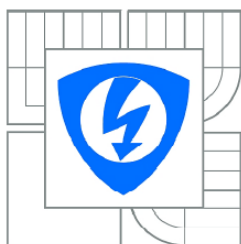
MILOSLAV CHLAD

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LADISLAV MACHÁŇ

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Mikroelektronika a technologie

Student: Miloslav Chlad

ID: 145422

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Bezdrátový senzor teploty a relativní vlhkosti vzduchu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte síť bezdrátových senzorů teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Komunikační část jednotlivých senzorů bude založena na obvodu CC430 od společnosti Texas Instruments. Senzory budou bezdrátově přenášet naměřená data přes převodník do sběrného bodu. Tato komunikace bude probíhat v pásmu 868 MHz. Pokud převodník se sběrným bodem nebude na dosah, data se budou ukládat do paměti typu Flash. Navržené senzory budou napájeny ze standardního článku typu CR2032 a budou obsahovat obvod pro měření napájecího napětí. Programové a obvodové řešení provedte s ohledem na spotřebu energie. Z hlediska síťové topologie budou senzory umožňovat komunikaci v topologii typu hvězda. Zdrojové kódy programového vybavení přiložte jako součást diplomové práce na CD.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 5.6.2014

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Macháň

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá obecně vlhkostí vzduchu a možnostmi jejího měření. Jako jsou psychrometrická metoda, hygrometrická metoda a metoda rosného bodu. V další kapitole je přehled senzorů dostupných na českém trhu spolu se stručným popisem jejich atributů. Dále práce popisuje návrh hardwaru i softwaru bezdrátové měřicí jednotky teploty a relativní vlhkosti vzduchu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Měření vlhkosti, rešerše senzorů vlhkosti a teploty, SHT21, I2C, SPI, SimplicíTI

ABSTRACT

Bachelor thesis deals in general with humidity and possibility of its measurement. As are psychrometric method, hygrometric method and dew point method. The next chapter is an overview of sensors available on the Czech market, along with a brief description of their attributes. Furthermore, the thesis deals with hardware and software design of wireless temperature and relative humidity measuring unit.

KEY WORDS

Humidity measurement, overview of humidity and temperature sensors, SHT21, I2C, SPI, SimlicíTI

Bibliografická citace mé práce:

CHLAD, M. *Bezdrátový senzor teploty a relativní vlhkosti vzduchu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Macháň.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Bezdrátový senzor teploty a relativní vlhkosti vzduchu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne 3. června 2014

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ladislavu Macháňovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne 3. června 2014

.....
podpis autora

Obsah

Seznam Obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	9
Úvod	10
1. Základní pojmy.....	11
1.1 Definice vlhkosti	11
1.1.1 Absolutní vlhkost.....	11
1.1.2 Relativní vlhkost.....	11
1.1.3 Měrná vlhkost	12
1.1.4 Rosný bod	12
2. Přehled metod měření vlhkosti	12
2.1 Psychrometrická metoda.....	13
2.2 Hygrometrická metoda	13
2.2.1 Dilatační vlhkoměry	13
2.2.2 Gravimetrické vlhkoměry.....	14
2.2.3 Odporové vlhkoměry	14
2.2.4 Kapacitní vlhkoměry	15
2.2.5 Elektrolytický vlhkoměr	17
2.2.6 Vlhkoměr s vyhřívaným termistory.....	17
2.3 Metoda rosného bodu	18
2.3.1 Rosný vlhkoměr.....	18
3. Přehled dostupných senzorů	19
3.1 SHT11.....	19
3.2 Si7005.....	19
3.4 SHT21.....	20

4. Komunikační rozhraní	21
4.1 I2C	21
4.2 SPI	23
4.3 SimliciTI.....	25
4.3.1 Šifrování	25
4.3.2 Změna frekvence	26
4.3.3 Řízení sítě	26
4.3.4 Přístupový bod.....	26
4.3.5 Rozšiřovač dosahu.....	26
4.3.6 Síť napájená pouze bateriově	26
5. Realizace projektu	27
5.1 Blokové schéma měřicí jednotky	28
5.2 Návrh desky plošných spojů.....	29
5.2.1 Mikrokontroler CC430F5137	30
5.2.2 Impedanční přizpůsobení signálové cesty k anténě.....	30
5.2.3 Kontrola stavu baterie.....	31
5.2.4 Zapojení Flash paměti	32
5.3 Návrh layoutu desky plošných spojů.....	32
5.4 Přepřacování návrhu desky plošných spojů.....	35
5.4.1 Diskrétní impedanční přizpůsobení antény	36
5.4.2 Přepřacovaný obvod pro kontrolu stavu baterie	36
5.5 Softwarové řešení	37
5.5.1 Vývojový kit.....	37
5.5.2 Komunikace s SHT21.....	38
5.5.3 Komunikace s Flash pamětí.....	39
5.5.4 Zbylé periferie	39
5.6 Uživatelská příručka.....	40

5.6.1 ON mód	41
5.6.2 WIRELLES mód	42
5.6.3 FLASH mód	43
5.6.4 OFF mód.....	43
Závěr.....	44
Seznam literatury	45
Seznam zkratek.....	46
Seznam příloh.....	48

Seznam Obrázků

Obr. 1: Odporový vlhkoměr [3].....	15
Obr. 2: Typické závislosti kapacity na relativní vlhkosti vzduchu [4].....	16
Obr. 3: Kapacitní vlhkoměr [6]	17
Obr. 4: SHT21[9].....	20
Obr. 5: Přesnost měření relativní vlhkosti vzduchu senzoru SHT21 [9].....	21
Obr. 6: Přesnost měření teploty vzduchu senzoru SHT21 [9].....	21
Obr. 7: Příklad zapojení sběrnice I2C	22
Obr. 8: Zapojení sběrnice SPI	24
Obr. 9: Topologie měřicího zařízení.....	27
Obr. 10: Blokové schéma měřicí jednotky	28
Obr. 11: Schéma měřicí jednotky	30
Obr. 12: Impedanční přizpůsobení antény s balunem	31
Obr. 13: Obvod pro kontrolu stavu baterie.....	31
Obr. 14: Zapojení Flash paměti	32
Obr. 15: Návrh desky plošných spojů - top	33
Obr. 16: Návrh desky plošných spojů - bottom.....	34
Obr. 17: Přepřacovaný návrh desky plošných spojů - bottom.....	35
Obr. 18: Přepřacovaný návrh desky plošných spojů - top.....	36
Obr. 19: Diskrétně řešené impedanční přizpůsobení antény	36
Obr. 20: Přepřacovaný obvod pro kontrolu stavu baterie.....	37
Obr. 21: Vývojový kit EM430F5137RF900 [18].....	38
Obr. 22: Stavový automat – spuštění měřicí jednotky.....	40
Obr. 23: Stavový automat - ON mód.....	42

Seznam tabulek

Tabulka 1: Rešerše dostupných senzorů.....	19
--	----

Úvod

Cílem bakalářské práce je získání potřebných znalostí a podkladů k navržení a realizaci bezdrátového senzoru teploty relativní vlhkosti vzduchu. Komunikační část senzoru bude založena na obvodu CC430 od společnosti Texas Instruments. Senzor bude bateriově napájený a proto bude navržen s ohledem na co nejnižší energetickou náročnost. Díky své kompaktnosti, mobilitě a možnosti požití většího počtu senzorů by mohl být dobře uplatnitelný v praxi.

Své využití zařízení najde zejména při měření relativní vlhkosti vzduchu v obydlích nebo v prostorách, kde je nutné udržovat stálé klimatické podmínky, jako jsou například muzea a sklady.

Měření a udržování relativní vlhkosti vzduchu v bytech se může zdát nedůležité, ale opak je pravdou. Ideální hodnota je mezi 45 a 55 %. Nízká hodnota relativní vlhkosti vzduchu může způsobovat pálení očí nebo dýchací problémy a záchvaty alergie. Vysoké hodnoty mohou způsobovat vznik plísní (zejména u oken a v chladných koutech místnosti). Při zvýšení relativní vlhkosti vzduchu už jen o 10 % nad horní doporučenou mez se může dřevěný materiál na nábytek nebo podlahy zdeformovat a znehodnotit.

1. Základní pojmy

Měření vlhkosti vzduchu a plynů obecně je důležitou úlohou meteorologie, metrologie, potravinářství a mnoha dalších odvětví průmyslu. Hraje svou roli i při úpravě vzduchu v budovách a obydlích. Různé obory kladou různé nároky na měřicí přístroje a jejich vlastnosti jako jsou rychlost odezvy, přesnost, chemická odolnost nebo velikost. Pro uspokojení jejich požadavků bylo vyvinuto mnoho typů vlhkoměrů založených na různých principech měření relativní vlhkosti vzduchu. [1]

1.1 Definice vlhkosti

Vlhkost vzduchu udává množství vodní páry v jednotkovém objemu vzduchu, který je v reálném stavu směsí suchého vzduchu a vodní páry. Pro měření se obvykle používá některá z následujících veličin. [2]

1.1.1 Absolutní vlhkost

Absolutní vlhkost Φ udává hmotnost vodní páry obsažené v jednotce objemu vzduchu. Obvyklou jednotkou je gram na metr krychlový [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]. Obsah vodní páry ve vzduchu není neomezený. Vzduch se vodní parou při určitém množství nasytí a další vlhkost již nedokáže přijmout. Pak hovoříme o mokřém vzduchu, kdy počet vypařených molekul vody se rovná počtu zkondenzovaných. [1]

1.1.2 Relativní vlhkost

Relativní vlhkost φ udává poměr mezi okamžitým množstvím vodních par ve vzduchu a množstvím vodních par, které by vzduch při stejném tlaku a teplotě měl při plném nasycení. Relativní vlhkost udává tedy procentní zastoupení vodní páry v suchém vzduchu za daných klimatických podmínek. Zjednodušeně je to poměr absolutní vlhkosti vzduchu a maximální absolutní vlhkosti plynu, které je možné dosáhnout při stejné teplotě. Je to bezrozměrná veličina ale běžně se vynásobí 100 a udává se v procentech jako %RH (relative humidity) nebo %RV (relativní vlhkost). Je to jednoduchý a srozumitelný způsob určování vlhkosti a proto se užívá nejčastěji. [2]

Platí vztah:

$$\varphi = \frac{\Phi}{\Phi''} \cdot 100 (\%)$$

kde:

Φabsolutní vlhkost vzduchu,

Φ''absolutní vlhkost nasyceného vzduchu.

1.1.3 Měrná vlhkost

Měrná vlhkost se vyjadřuje hmotnostním zlomkem, jako poměr hmotnosti vodní páry a hmotnosti suchého vzduchu. Udává se v jednotkách $\text{kg} \times \text{kg}^{-1}$ nebo $\text{g} \times \text{kg}^{-1}$. [2]

1.1.4 Rosný bod

Rosný bod (teplota rosného bodu) je teplota, při níž je vzduch maximálně nasycen vodními parami. Klesne-li teplota pod tento bod, dochází ke kondenzaci vodních par. Rychlost kondenzace závisí na přítomnosti kondenzačních jader, jako jsou například částice prachu. Pokud je jich ve vzduchu málo, může docházet ke kondenzaci vodních par už pod hodnotou rosného bodu, protože se na nich vzduch snadněji sráží. Čím vyšší je absolutní vlhkost vzduchu, tím vyšší je teplota rosného bodu. Jednotkou je Celsiův stupeň, popř. Kelvin.[1, 2]

2. Přehled metod měření vlhkosti

Měření vlhkosti se provádí měřicími přístroji tzv. vlhkoměry. Vlhkoměry se vyvíjeli od jednoduchých až po dnešní analogové nebo číslicové přístroje. Principy určování vlhkosti vzduchu jsou založeny na fyzikálních nebo chemických zákonech.

Základní metody jsou: psychrometrická, hygrometrická a metoda rosného bodu. [1]

2.1 Psychrometrická metoda

Pro měření vlhkosti pomocí psychrometru jsou zapotřebí dva teploměry. Jeden suchý, který měří teplotu vzduchu bez ovlivňování uživatelem. A jeden mokrá, který je stále navlhčován. Mokrý teploměr je obalen tkaninou nebo jinou látkou, po které může vzlínat kapalina, do které je teploměr respektive tkanina ponořena. Vzlínající kapalina se z obalu odpařuje a tím odebírá teplo teploměru. Proto mokrý teploměr ukazuje nižší nebo stejnou hodnotu jako teploměr suchý. Čím sušší je okolní vzduch, tím snadněji se kapalina z obalu odpařuje a tím ochlazuje mokrý teploměr. Intenzita odpařování závisí na relativní vlhkosti měřeného vzduchu. Pokud je vzduch vodní parou plně nasycen jsou si oba údaje rovny. Relativní vlhkost vzduchu se určuje z psychrometrického rozdílu. To znamená z rozdílu hodnot na obou teploměrech pomocí psychrometrických tabulek. Odlišují se psychrometry aspirační, na které je uměle přiváděn proud vzduchu. U psychrometrů uměle neventilovaných se spoléhá na přírodní proudění vzduchu. Tyto tzv. stabilní psychrometry bývají ale často velmi nepřesné. Nejznámějším zástupcem této metody je psychrometr Assmannův, který patří mezi aspirační. Je to přesný přístroj, který je v praxi dost rozšířen.[1, 2]

2.2 Hygrometrická metoda

Tato metody využívá vlastnosti některých látek udržovat svou vlhkost v rovnováze s relativní vlhkostí okolního prostředí (v tomto případě vzduchu). Daná látka je schopna absorbovat vzdušnou vlhkost a díky tomu měnit svoje vlastnosti. Na základě změny vlhkosti dané látky se mění i její vlastnosti a toho se využívá k určení relativní vlhkosti vzduchu. Může se měnit její velikost, hmotnost nebo elektrické vlastnosti jako odpor nebo kapacita. Pro přesnost měření by změna měřené veličiny měla být lineárně závislá na relativní vlhkosti vzduchu. Nejstarším materiálem používaným pro tuto metodu je odmaštěný lidský vlas.[1, 2]

2.2.1 Dilatační vlhkoměry

Přednosti této metody spočívají v její jednoduchosti. Je to jedna z historicky nejstarších možností měření vlhkosti vzduchu. Nejznámějším představitel této skupiny vlhkoměrů je vlasový vlhkoměr. Lidský odmaštěný vlas je připevněn k mechanismu, který pohybuje ručičkou po stupnici. Při změně relativní vlhkosti vzduchu z 0 % na 100 % se délka

odmaštěného vlasu změni přibližně o 2,5 %. Tato závislost je silně nelineární a proto ji musí mechanismus kladky linearizovat nebo je zapotřebí nelineární stupnice. Výhodou vlasového vlhkoměru je, že může pracovat od teplot pod bodem mrazu až do 80 °C. Jsou velmi choulostivé a náhlé na otřesy. Nelze s nimi měřit vlhkost proudících plynů. Pravidelně by se měly regenerovat tzn. vystavení vlhkoměru hodnotám kolem rosného bodu, aby se obnovily jejich dilatační schopnosti. V domácnostech se na to často zapomíná, a proto se dosahuje velkých chyb. Pokud se ale postup dodrží, přístroj dosahuje přesnosti kolem $\pm 3 \%$. Tato hodnota přesnosti je pro orientační zjištění vlhkosti vzduchu dostačující. Místo vlasů se dají použít živočišné blány natažené na rámečku, ale jejich životnost je podstatně horší. [1, 2]

2.2.2 Gravimetrické vlhkoměry

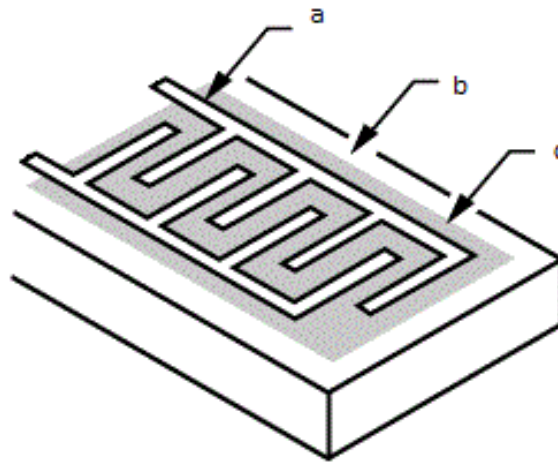
Princip gravimetrického vlhkoměru je velmi jednoduchý. Vhodná hygroskopická látka absorbuje vodní páru ze známého objemu vzduchu. Pak se určí rozdíl ve hmotnosti suché látky a látky, která absorbovala vzdušnou vlhkost. Tento rozdíl určuje hmotnost vodních par obsažených ve vzduchu. Je to metoda velmi pomalá a nákladná. Používá se zejména v laboratorních podmínkách ke kalibraci dalších přístrojů.

První vlhkoměr založený na tomto principu sestrojil Leonardo da Vinci. Do jedné misky rovnoramenných vah umístil hygroskopický materiál (houba, bavlna) a do druhé materiál bez sorpčních vlastností (vosk). Za suchého počasí váhy seřídil na nulu. Při zvýšení vlhkosti vzduchu miska s hygroskopickým materiálem klesla vahou dolů a vychylovala ručičku vah. [2]

2.2.3 Odporové vlhkoměry

Odporové vlhkoměry jsou založeny na změně elektrického odporu sorpčního materiálu na základě množství absorbované vody z okolního vzduchu. Elektrická vodivost mnoha materiálů se mění s množstvím vody, kterou obsahují. Jako sorpční materiál se používají iontové soli. Senzor mívá tvar destičky s elektrodami. Na této destičce z nevodivého materiálu (keramiky) je nanášena vodivá hygroskopická látka (iontová sůl), která změnou své vodivosti určuje relativní vlhkost vzduchu. Měří se střídavým napětím kvůli možnosti polarizace elektrod. Velikost odporu sorpčního materiálu není závislá pouze na vlhkosti,

ale i na teplotě. Proto musí být celý měřicí systém teplotně stabilizovaný. Závislost elektrického odporu na vlhkosti (za konstantní teploty) není lineární. Změna elektrické vodivosti nepokrývá celý rozsah hodnot relativní vlhkosti (od 0 %RV až po 100 %RV). Ale použitím různých materiálů nebo různých koncentrací solí je možné celý rozsah pokrýt. Senzor se snadno orosí a nedá se použít při vysokých teplotách. Jeho teplotní rozsah je přibližně $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jeho výhodou je vysoká přesnost v řádu desetin procent a dobrá stabilita. [2]

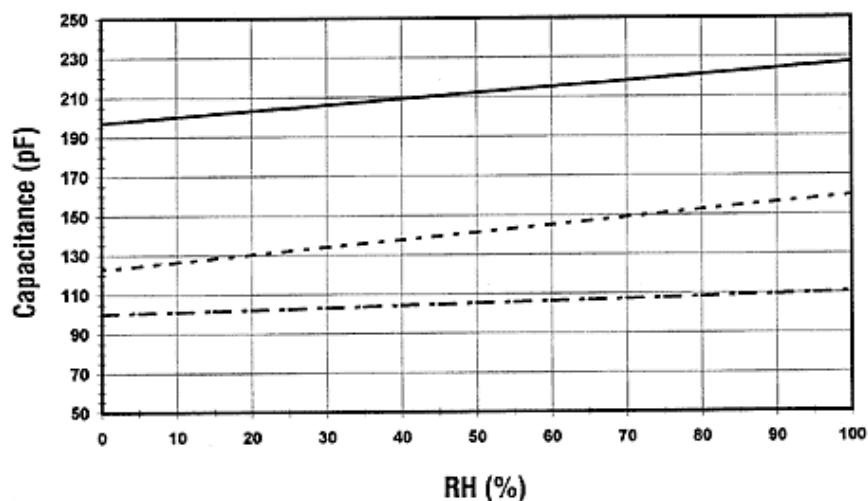


Obr. 1: Odporový vlhkoměr [3]

Pozn.: a (elektroda), b (nevodivý substrát), c (vrstva vodivého hygroskopického materiálu)

2.2.4 Kapacitní vlhkoměry

Kapacitní vlhkoměr je založen na podobném principu jako odporový. Je to v podstatě kondenzátor, jehož dielektrikem je hygroskopický materiál. Tento materiál sorpcí a desorpcí vlhkosti z okolního vzduchu mění svou kapacitu. Jedna z elektrod kondenzátoru je pórovitá aby k dielektriku měl přístup vzduch, jehož vlhkost měříme. Kapacita je funkcí relativní vlhkosti vzduchu.



Obr. 2: Typické závislosti kapacity na relativní vlhkosti vzduchu [4]

Výrobci používanou konstrukcí je izolační vrstva, na níž je umístěna elektroda pokrytá hygroskopickým materiálem. Ten je přiklopen vrchní elektrodou, která propouští vzdušnou vlhkost. Kapacitní vlhkoměry mohou být doplňovány mikrokontrolery a převodníky A/D. Pak jsou schopné měřit různé veličiny a ukládat maximální a minimální údaje za danou dobu. Na jejich výstupu také může být místo kapacity elektrické napětí nebo přímo digitální rozhraní, které je uživatelsky přívětivější. Jejich předností je dobrá odolnost proti chemicky agresivním látkám a vyšším teplotám. Také jejich nízká cena je výhodou. [2, 5]

Pro převod kapacity na relativní vlhkost vzduchu platí vztah:

$$\kappa = 1 + \frac{211}{T} \left(P + \frac{48P_s}{T} H \right) 10^{-6}$$

kde:

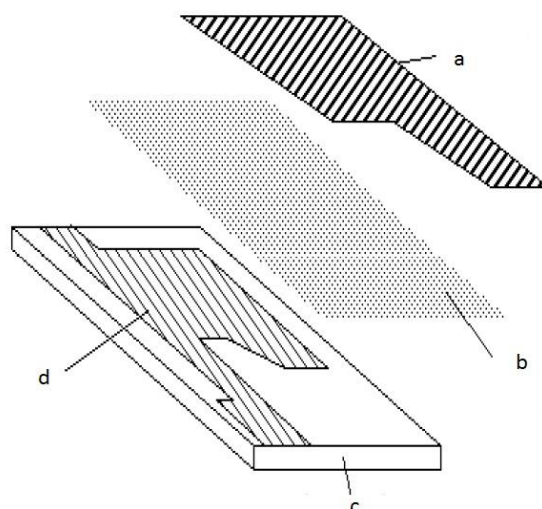
κdielektrická konstanta

Tabsolutní teplota v Kelvinech

Ptlak měřeného vzduchu

P_stlak vzduchu nasyceného vodní parou při teplotě T

Hrelativní vlhkost



Obr. 3: Kapacitní vlhkoměr [6]

Pozn.: a (vrchní pórovitá elektroda), b (hygroskopický materiál), c (substrát),
d (spodní elektroda)

2.2.5 Elektrolytický vlhkoměr

Elektrolytické vlhkoměry využívají vlastnosti sorpčních materiálů udržovat svou vlhkost v rovnováze s okolním prostředím. Při změně vlhkosti vzduchu sorpční látky vlhkost vylučují nebo ji naopak pohlcují. Snímač je tvořen tenkostěnnou skleněnou trubičkou obalenou hygroskopickou tkaninou (vatou). Tkanina je napuštěna roztokem solí a jsou v ní platinové elektrody. Uvnitř trubičky je umístěn teploměr. Elektrody napájené střídavým proudem zahřívají elektrolyt, díky tomu se z něj voda postupně odpařuje. Zvětší-li se vlhkost vzduchu, zvětší se i vodivost tkaniny. Protože ta do sebe dokáže absorbovat vzdušnou vlhkost. Tkaninou pak prochází větší proud a tím se elektrolyt zahřívá. Tímto způsobem se udržuje stálá rovnovážná teplota elektrolytu. Z hodnoty rovnovážné teploty, kterou ukazuje teploměr uvnitř trubičky a teploty okolního vzduchu je možné vlhkost vzduchu dopočítat. Hlavním rysem elektrolytického vlhkoměru je jeho dlouhodobá stabilita. [1, 2]

2.2.6 Vlhkoměr s vyhříváním termistory

Tato metoda využívá závislosti tepelné vodivosti vzduchu na jeho vlhkosti. Senzor se skládá ze dvou stejných termistorů zapojených do série. Tyto termistory tvoří jednu větev můstku. Jeden z termistorů je uzavřen v suchém dusíku a druhý není chráněn před vnějším prostředím. Druhá větev se skládá z rezistorů a nulovacího trimru. Průchodem proudem se

termistory zahřívají. Teplota, na kterou se zahřejí, závisí na intenzitě jejich ochlazení vzduchem. Intenzita jejich ochlazování má přímou souvislost se vzdušnou vlhkostí. V suchém prostředí se můstek vynuluje. Pokud není umístěn v suchém prostředí, vlhkost vzduchu ho rozváží. Výhodou této metody je možnost měření při vysokých teplotách až 200 °C a chemická odolnost. [2]

2.3 Metoda rosného bodu

Metoda rosného bodu spočívá v určení teploty rosného bodu a následném dopočítání vlhkosti vzduchu. Je to teplota, kdy je vzduch plně nasycen vodními parami. To znamená, že jeho relativní vlhkost je 100 %RV. Při této teplotě už nemůže docházet k odpařování vody. [1]

2.3.1 Rosný vlhkoměr

Principem rosného vlhkoměru je kondenzace vodních par na předmětu (plošce) ochlazeném na teplotu rosného bodu. Při této teplotě vodní pára ze vzduchu kondenzuje v jinovatku, kapky nebo kousky ledu. Rosné vlhkoměry se liší čidlem teploty, způsobem indikace orosení a způsobem ochlazování. Obvyklým postupem je ochlazování senzoru, dokud se neobjeví kondenzát. Teplota, při které se tak stane, se запиše a pokračuje se ohřevem, dokud naopak kondenzát nezmizí. Teplota, kdy kondenzát zmizel, se sečte s teplotou, kdy se kondenzát objevil. Tyto teploty se zprůměrují. Tím získáme hodnotu rosného bodu.

Další možností je rosný vlhkoměr řízený fotoelektricky. Na chlazenou odrazovou plochu dopadá paprsek světla. Po odrazu je paprsek snímán světlocitlivými součástkami (fotorezistory). Jakmile se odrazová plocha orosí, dojde ke snížení její odrazivosti. Pak dopadá na světlocitlivé prvky obvodu méně světla. Řídící logika pak mění teplotu odrazové plochy, dokud nedojde k rovnovážnému stavu. Po odečtení hodnoty z teploměru dostaneme hodnotu rosného bodu, z které je možné dopočítat relativní vlhkost vzduchu. [2]

3. Přehled dostupných senzorů

Jednou ze základních součástí při návrhu bezdrátového senzoru teploty a relativní vlhkosti vzduchu je vlastní senzor. Na trhu se jich vyskytuje celá řada, ale s ohledem na dostupnost a cenu byl vytvořena následující seznam.

Tabulka 1: Rešerše dostupných senzorů

jméno	spotřeba	napájecí napětí [V]	rozměry [mm]	výstup	výrobce	pouzdro
SHT11	550 μ A	2,4 - 5,5	4,93 X 7,47	digitální	sensirion	LCC
Si7005	320 μ A	2,1-3,6	4 X 4	I2C	silicon labs	QFN
SHT21	300 μ A	2,1 -3,6	3x3	I2C	sensirion	DFN

3.1 SHT11

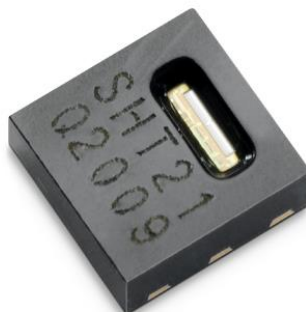
SHT11 je jeden ze senzorů od švýcarské firmy Sensirion. Dokáže měřit jak relativní vlhkost vzduchu, tak teplotu. Senzor je založen na kapacitním principu. Je dodáván jako SMD součástka v LCC pouzdru, které je uzpůsobeno k pájení přetavením. Poskytuje plně kalibrovaný digitální signál. Výrobce garantuje excelentní spolehlivost a dlouhodobou stabilitu i v případě vystavení elektromagnetickému rušení, které by nemělo nijak ovlivňovat jeho výstup. V průběhu měření dosahuje spotřeby 550 μ A. To je nejvyšší hodnota z vybraných senzorů. [7]

3.2 Si7005

Si7005 je digitální senzor relativní vlhkosti vzduchu a teploty od firmy Silicon laboratories. Na jeho výstupu je komunikační rozhraní I2C. Už při výrobě je kalibrován. Kalibrační data jsou uloženy v části paměti, kterou uživatel nemůže ovlivnit. Díky tomu se nemusí provádět žádné změny softwaru nebo překalibrování. Je dodáván v QFN pouzdře s 24 vývody. Doporučuje se pájet přetavením. Má velmi nízkou spotřebu ($I = 320 \mu$ A) i během vyhodnocování měření a odesílání dat. [8]

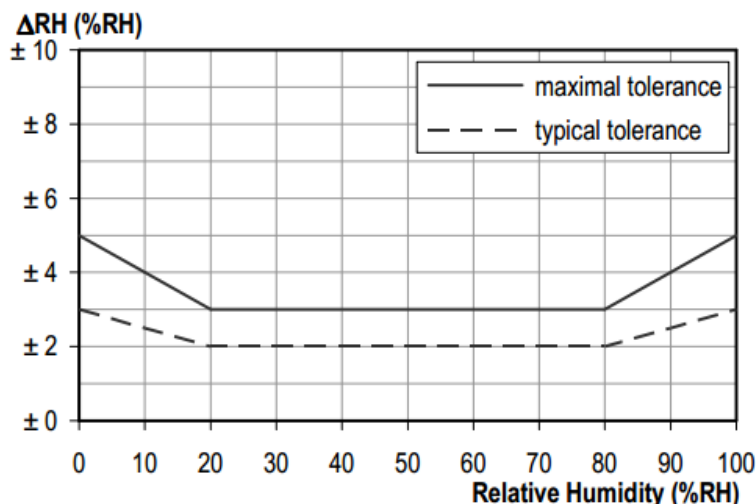
3.4 SHT21

Senzor SHT21 od firmy Sensirion v sobě zahrnuje možnost měření relativní vlhkosti vzduchu i měření teploty.

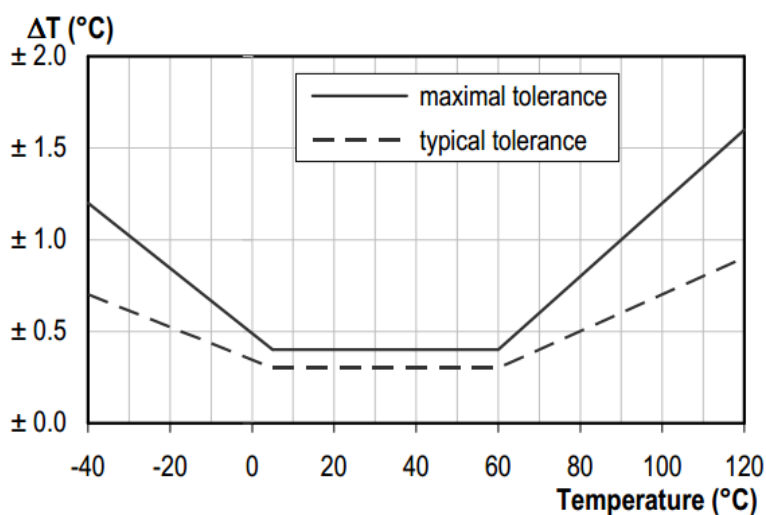


Obr. 4: SHT21[9]

Jeho výstup poskytuje lineární digitalizovaný signál ve formátu I2C. Senzor je dodáván v pouzdře DFN o rozměrech 3x3 mm s 6 vývody, po třech na dvou proti sobě ležících stranách a jedním termálním padem sloužícím k odvodu tepla. Doporučuje se pájet přetavením. Každý senzor je při výrobě testován a kalibrován. Vnější obal senzor mechanicky chrání a zajišťuje jeho výbornou stabilitu a spolehlivost. Celý senzor se skládá ze samotného senzoru relativní vlhkosti vzduchu, který je založen na kapacitním principu, senzoru teploty, zesilovače, převodníku A/D a paměti. Samotný senzor je vyroben z křemíku. Celá součástka i s obalem neobsahuje žádné olovo rtuť nebo kadmium, chová se ekologicky k okolnímu prostředí. SHT21 se v našem případě jeví jako nejlepší volba. Z porovnávaných senzorů má nejnížší spotřebu v průběhu měření. Spotřeba energie v úsporném režimu je 0,15 μ A. Spotřeba energie je jeden z nejdůležitějších faktorů výběru senzoru, protože bezdrátový senzor teploty a relativní vlhkosti vzduchu je bateriově napájen. Proto je celá jeho konstrukce tvořena s ohledem na co nejnížší spotřebu. Výstupem senzoru je komunikační rozhraní I2C, které je výhodné pro jednoduché připojení k mikrokontroleru. Rozměry jsou dalším důležitým faktorem, protože cílem návrhu je, sestrojít energeticky nenáročný, malý a přenosný senzor. SHT21 má i při své malé velikosti nejvyšší přesnost měření z porovnávaných senzorů. Typická chyba měření relativní vlhkosti vzduchu je ± 2 % při standardních teplotách. Při měření teploty je typická chyba $\pm 0,3$ °C. Při překročení doporučených hodnot měření se po návratu do standardních teplot sám opět zkalibruje. Senzor je schopen pracovat od -40 °C do 120 °C. [9]



Obr. 5: Přesnost měření relativní vlhkosti vzduchu senzoru SHT21 [9]



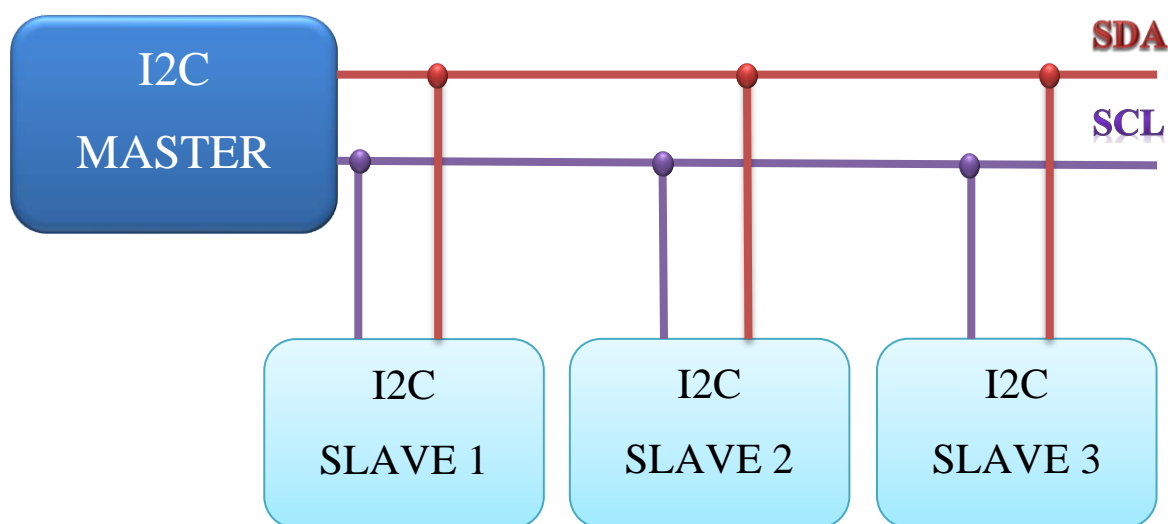
Obr. 6: Přesnost měření teploty vzduchu senzoru SHT21 [9]

4. Komunikační rozhraní

4.1 I2C

I2C je zkratka, která vznikla z IIC neboli Internal Integrated Circuit. Je to sériová datová sběrnice vyvinutá v osmdesátých letech firmou Philips. I2C zprostředkovává datovou komunikaci mezi jednotlivými integrovanými obvody většinou v rámci jednoho zařízení. V dnešní době tento způsob komunikace podporuje celá řada integrovaných obvodů. Jde hlavně o sériové paměti, inteligentní LCD displeje, převodníky A/D i D/A nebo mikrokontrolery a další integrované obvody. Celá komunikace probíhá pouze po dvou vodičích, jedná se o obousměrný přenos dat. Jsou to SDA (serial data), kde probíhá datová

komunikace a SCL (serial clock). To je velkou výhodou především pro mikrokontrolery. Ty mají omezené množství vstupně-výstupních pinů a díky komunikaci pouze po dvou vodičích se snižují nároky na jejich počet. Na jednu sběrnici může být připojeno více integrovaných obvodů. V základní verzi jsou obvody adresovány 7bitově. To umožňuje komunikace mezi 128 zařízeními. V praxi ale nelze použít všech 7 bitů pro adresaci, proto je počet integrovaných obvodů připojených na jednu I2C sběrnici podstatně nižší. Přenosovou rychlost sběrnice určuje vodič SCL. V základní verzi je to 400 kHz, tato rychlost je pro většinu aplikací dostačující. Novější rozšířené verze dosahují rychlostí až 3,4MHz ale málokteré integrované obvody jsou schopny při této rychlosti pracovat. Logickou jedničku na vodičích zajišťují pull-up rezistory, které propojují vodiče sběrnice s napájecím napětím.



Obr. 7: Příklad zapojení sběrnice I2C

Jak je vidět na Obr. 7 jeden z integrovaných obvodů je nastaven jako master. Tento obvod má řídicí funkci. Ostatní jsou typu slave. Sběrnice může existovat i v zapojení multi-master, kdy je více zařízení ve stavu master. Uzly typu slave nemohou sběrnici řídit a nemají ani možnost sami žádat o vysílání či příjem dat. Když zařízení master vysílá, všechny ostatní uzly přijímají a podle adresy určují, zda jsou data určena pro ně. Každému zařízení typu slave, které je připojené na I2C sběrnici je přidělena unikátní celočíselná adresa. Díky tomu může uzel master jednoznačně určit, s kterým zařízením bude komunikovat. Přenos spolu s komunikací probíhá pomocí následujících stavů. [10, 11]

- **Stav klidu**

Je zajištěn logickými jedničkami na obou signálových vodičích. To znamená, že zařízení nakonfigurované ve stavu master nevysílá a tedy negeneruje žádné signály. Logické jedničky jsou zajištěny pull-up rezistory, které drží tuto logickou hodnotu i v případě odpojení signálových vodičů od uzlu master.

- **Start bit**

Je generován změnou logické úrovně SDA z logické 1 na logickou 0, zatímco SCL zůstává po určitou dobu závislou na frekvenci přenosu v logické 1. Tímto způsobem se zahajuje komunikace.

- **Stop bit**

Po jeho odeslání je přenos ukončen. Úroveň SDA se změní na logickou 1, zatímco SCL zůstává v logické 1. Stop bit je generován pouze po chybném přenosu. To znamená pouze po přijetí Ack (acknowledge) bitu v logické 1.

- **Přenos dat**

Data jsou přenášena v 8 po sobě jdoucích bitech od nejvyššího po nejnižší. Logická úroveň SDA se může měnit, pouze pokud je SCL v logické 1. To znamená, že při každém pulsu SCL je přenesen jeden bit.

- **Potvrzující bit Ack**

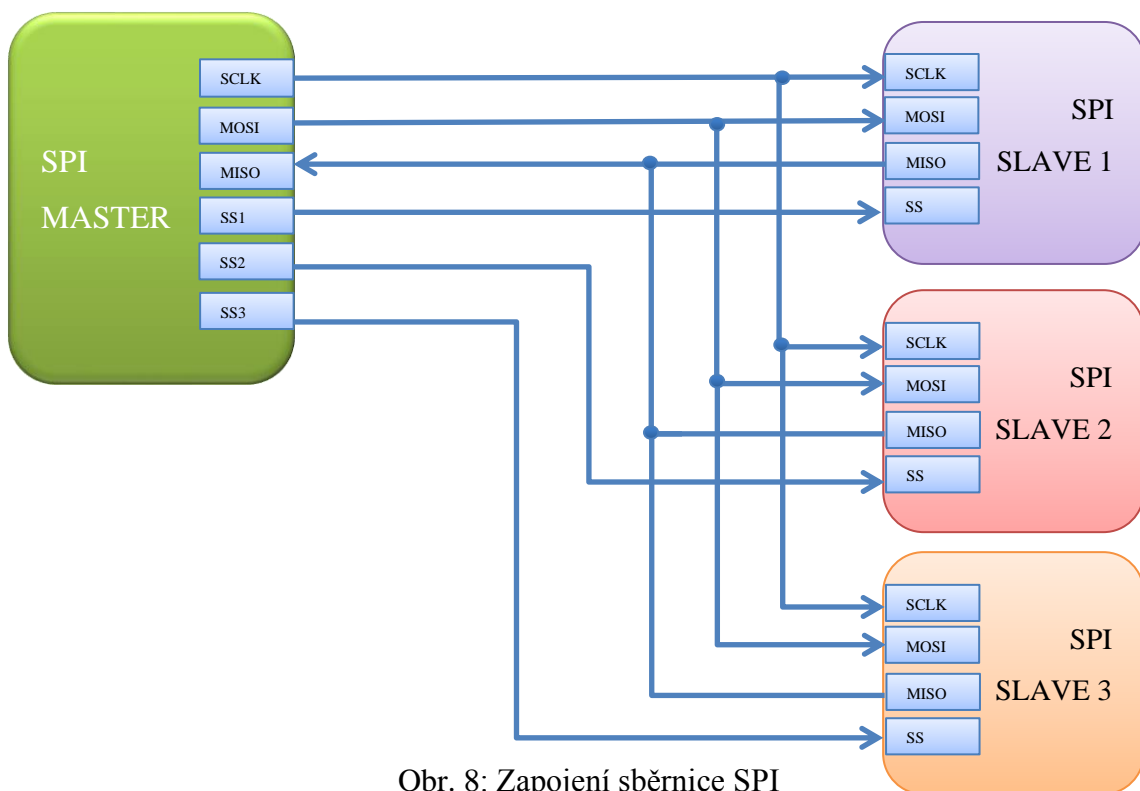
Slouží k potvrzení správného přenesení dat. Ack bit následuje po 8. bitu dat. Tento bit generuje zařízení, které data přijímalo po každém přijatém Bytu. Pokud přenos proběhl v pořádku, odešle logickou 0. Pokud přenos selhal, odešle se logická 1.

[10]

4.2 SPI

SPI slouží vzájemné komunikaci dvou nebo více uzlů. Jeden z uzlů má řídicí charakter. Je to tzv. master. Tento uzel obsahuje generátor hodinového signálu, který je rozveden do všech uzlů připojených na sběrnici. Tím je umožněn zcela synchronní přenos dat. Ostatní uzly jsou nakonfigurovány v modu slave. Kromě vodiče SCK (serial clock), který vede hodinový signál, jsou uzly sběrnice propojeny dvojicí signálů označovaných MISO (master in, slave out) a MOSI (master out, slave in). Pomocí těchto dvou signálů se přenáší data. Poslední ze signálů používaných při komunikaci pomocí sběrnice SPI je CS (chip select)

těž zvaný SS (slave select). Ten slouží k výběru uzlu pracujícímu v režimu slave. Všem signálům stačí jednosměrné porty, což přispívá k levné a jednoduché implementaci. Sběrnice se díky své jednoduchosti používá v mnoha různých systémech, například pro komunikaci se sériovými paměťmi, A/D či D/A převodníky nebo hodiny reálného času. Data jsou přenášena po samostatných vodičích, takže není nutné řešit přepínání mezi vysíláním a přijímáním, jako tomu je u sběrnice I2C. Hodinová frekvence, na které pracuje sběrnice SPI, běžně dosahuje až 10 MHz. Pokud se dodrží dostatečně malá kapacita spoje, je možné tuto frekvenci výrazně zvýšit až na 70 MHz. Jedna z nevýhod sběrnice SPI je existence pouze jednoho zařízení, které může pracovat jako master. Zapojení označované multiple master sice nabízí možnost použití více zařízení v režimu master ale vyžaduje složitější přenosový protokol a zapojení. Tím se ztrácí hlavní výhoda SPI, což je jednoduchost. Není vhodné používat sběrnici na dlouhé vzdálenosti, kvůli její synchronnosti. Další nevýhodou je chybějící signál typu ACK, který by potvrzoval příjem dat a dokázal by zpomalit komunikaci, pokud by některé ze zařízení nestíhalo data dostatečně rychle zpracovávat. Jednoduchost zapojení sběrnice SPI s sebou nese i nevýhody, jednou z nich je nutnost použití minimálně 4 vodičů při zapojení obousměrné komunikace mezi dvěma zařízeními. S narůstajícím počtem uzlů roste i počet vodičů, které je nutné zapojit do zařízení typu master.[11, 12]



Obr. 8: Zapojení sběrnice SPI

4.3 SimliciTI

SimliciTI je jednoduchý komunikační protokol vytvořený firmou Texas Instruments pro energeticky nenáročnou malou bezdrátovou síť pracující na radiové frekvenci v bezlicenčním pásmu ISM (Industrial Scientific and Medical). Protokol je určen pro jednoduchou implementaci a rozšíření na platformách, jako je rodina mikrokontrolerů CC430. Protokol se využívá v sítích, kde jsou použita bateriově napájená zařízení, a vyžaduje se jejich dlouhá životnost. Jsou to sítě s nízkou rychlostí přenosu dat a omezeným počtem uzlů, které mohou komunikovat přímo každý s každým, přes přístupový bod nebo přes rozšiřovač dosahu. Přístupový bod nebo rozšiřovač dosahu nejsou nutností, ale nabízí další možnosti využití a funkcí. Celý protokol se skládá z jednotlivých funkcí, které lze různě kombinovat. Jsou to: přístupový bod, rozšiřovač dosahu, síť napájená pouze bateriově, šifrování, změna frekvence za provozu, řízení sítě.

Výhody SimplicitiTI:

- nízká spotřeba
- flexibilita
 - komunikace přímo mezi zařízeními
 - jednoduchá komunikace v topologii hvězda s přístupovým bodem
 - rozšiřovače dosahu
- jednoduchost
- rychlost přenosu dat [13]

4.3.1 Šifrování

Šifrování je možné provádět jak hardwarově, tak programově. Některé mikrokontrolery, které umožňují komunikaci s protokolem SimplicitiTI neobsahují hardwarový šifrovací modul. Nicméně všechny mikrokontrolery z řady CC430 obsahují modul pro symetrické šifrování algoritmem AES128 (Advanced Encryption System). Pokud je šifrování povoleno, celá pole kromě adresové části jsou zašifrována. Díky tomu je zajištěna bezpečnost přenášených dat. [13]

4.3.2 Změna frekvence

Tato schopnost umožňuje změnu komunikační frekvence, pokud je stávající příliš zarušena nebo jiným způsobem omezena. Změní se na další frekvenci, která je zapsána v tabulce frekvencí. Tuto tabulku musí obsahovat všechna zařízení komunikující v síti. Zařízení přijímající data rozpoznají, že nejsou na správné frekvenci, když se po odeslání dat nevrátí potvrzovací ACK zpráva. Odesílatel poté postupuje tabulkou frekvencí, dokud nepřijme potvrzující zprávu. Zařízení, která data pouze odesílají, musí vždy odesílat na všech frekvencích z tabulky frekvencí. [13]

4.3.3 Řízení sítě

Hraje významnou roli u přístupového bodu. Řeší například řízení změny frekvence nebo šifrovací klíč. [13]

4.3.4 Přístupový bod

Přístupový bod propojuje koncová zařízení. Fyzicky realizuje funkce nastavené v sekci řízení sítě. Koncová zařízení se dají omezeně řídit z přístupového bodu, který může sbírat data z celé sítě. [13]

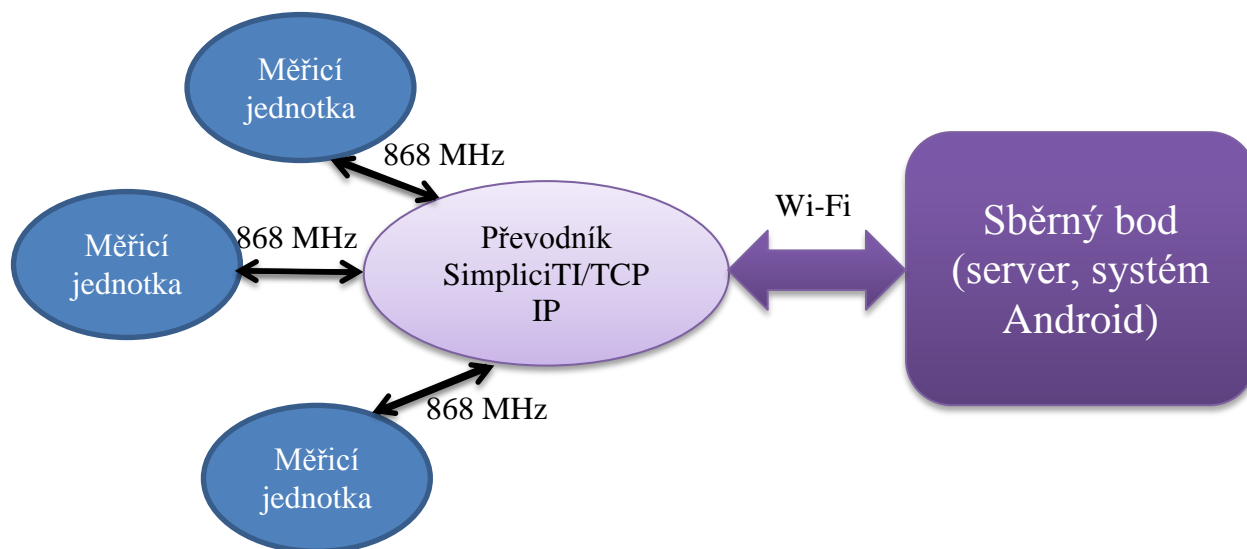
4.3.5 Rozšiřovač dosahu

Rozšiřovače dosahu přeposílají všechna přijatá data dokud některý z nich není cílovou adresou neboli příjemcem. Rozšiřovač dosahu může být jak koncové zařízení, tak přístupový bod. Při každém přeposlání je o jeden snížen počet skoků, tato informace je součástí zprávy. [13]

4.3.6 Síť napájená pouze bateriově

Protože přístupové body jsou vždy napájené, sítě napájené pouze bateriově nemají přístupové body. V těchto sítích předpokládáme, že všechna zařízení jsou v úsporném režimu. Proto musí být přesně nastavena frekvence, s kterou se probouzí zařízení čekající na data, a frekvence, s kterou se odesílající zařízení pokouší data odeslat. [13]

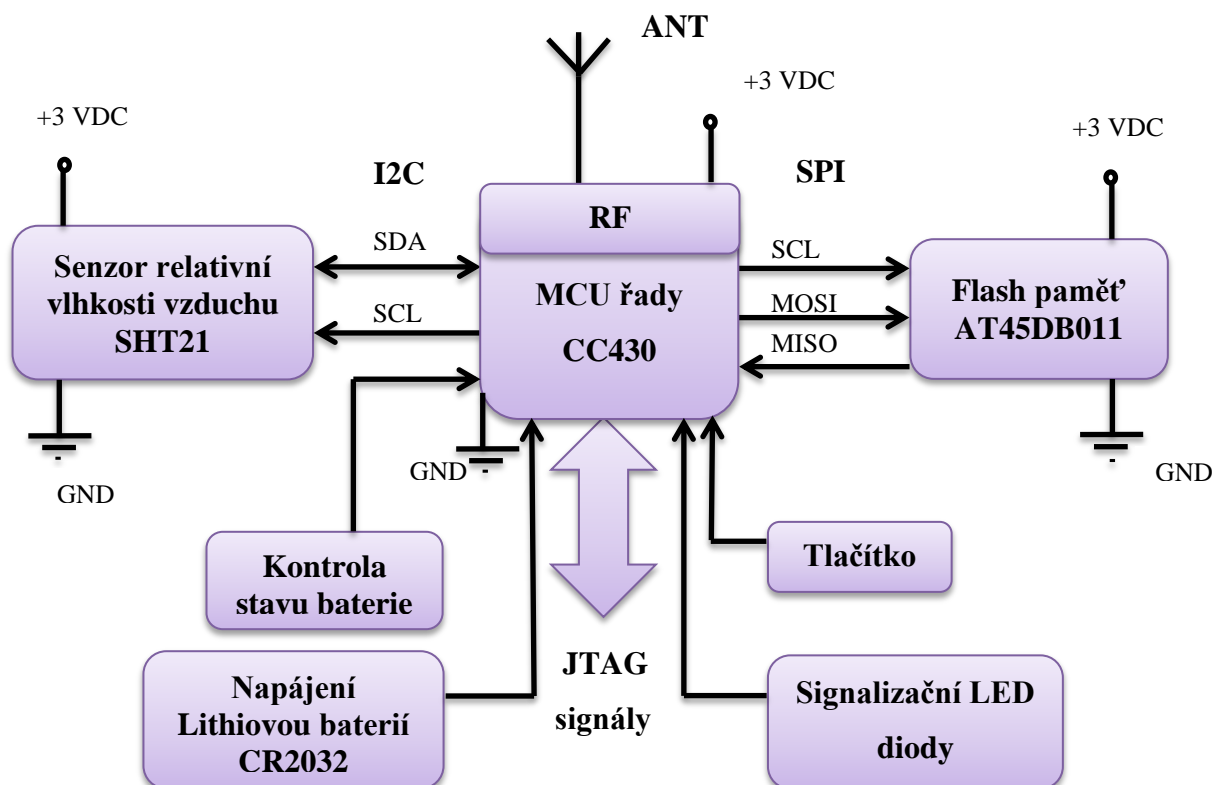
5. Realizace projektu



Obr. 9: Topologie měřicího zařízení

Na Obr. 9 je zobrazena topologie celého měřicího zařízení, která se skládá z měřicí jednotky, převodníku SimliciTI/TCP IP a sběrného bodu. Měřicí jednotka je malé, přenosné, bateriově napájené zařízení ovládané mikrokontrolerem řady CC430. Je nosičem senzoru teploty a relativní vlhkosti vzduchu SHT21. Měřicí jednotka bezdrátově komunikuje s převodníkem SimpliCI/TCP IP na frekvenci 868 MHz. Pokud selže spojení mezi měřicí jednotkou a převodníkem SimpliCI/TCP IP nebo pokud se vůbec nepodaří navázat, ukládá měřicí jednotka naměřená data na integrovanou flash paměť. Po opětovném navázání spojení lze z flash paměti uložená data vyčíst. Každá měřicí jednotka má svou jedinečnou adresu, kterou lze zjistit přiložením RFID štítku, přiděleného ke každé měřicí jednotce, na RFID čtečku integrovanou na převodníku SimpliCI/TCP IP. Převodník SimpliCI/TCP IP je mezistupněm mezi měřicí jednotkou a sběrným bodem. Přijímá data od měřicích jednotek a přeposílá je sběrnému bodu. A naopak přijímá příkazy od sběrného bodu, které přeposílá měřicím jednotkám. Tato komunikace je podrobně popsána v příloze datové pakety. Sběrným bodem je server nebo systém Android, na kterém je nainstalována uživatelská aplikace umožňující komunikaci s převodníkem, potažmo i měřicími jednotkami. Cílem této bakalářské práce je zkonstruování měřicí jednotky a její komunikace s převodníkem SimliciTI/TCP IP. Zbytek měřicího zařízení je diplomovou prací Bc. Stanislava Procházky.

5.1 Blokové schéma měřicí jednotky



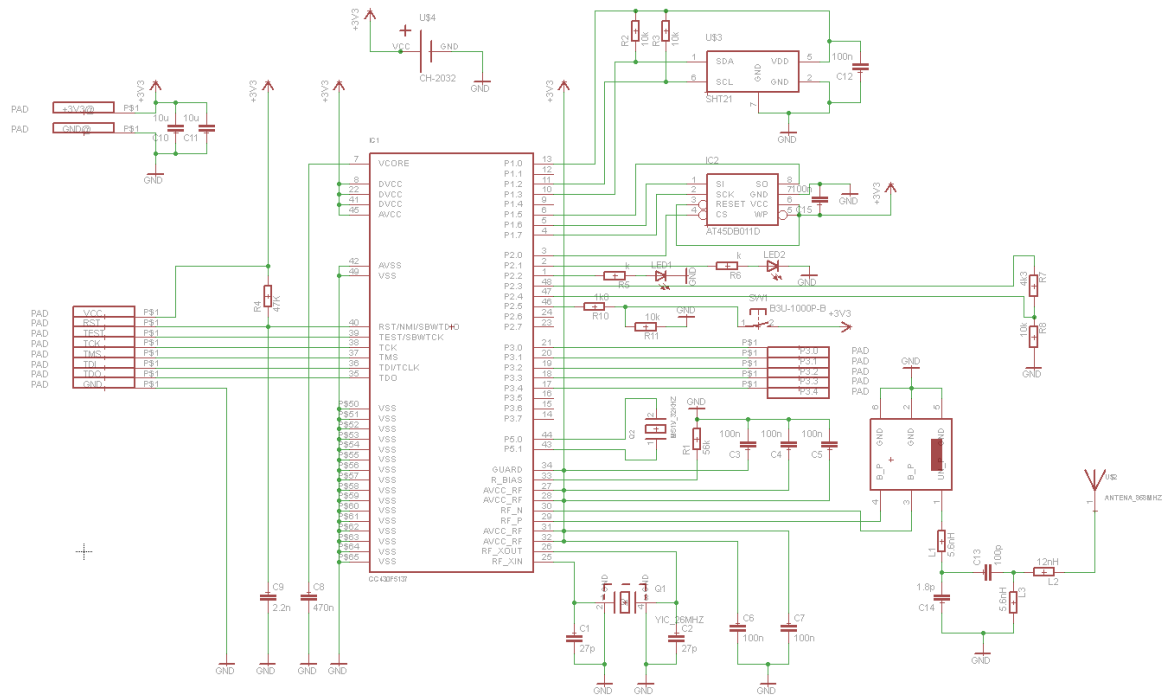
Obr. 10: Blokové schéma měřicí jednotky

Blokové schéma měřicí jednotky se skládá z několika základních částí. Základní součástí je mikrokontroler z rodiny CC430 od firmy Texas Instruments. Na mikrokontroler jsou napojena všechna zbývající zařízení, díky tomu ovládá všechny operace probíhající na senzoru. Mikrokontroler CC430 v sobě má integrované jádro schopné pracovat bezdrátově na rádiové frekvenci 868 MHz. K této části je připojena anténa. Signálová cesta mezi mikrokontrolerem a anténou je impedančně přizpůsobena na 50 Ω . Tato hodnota je doporučována výrobcem antény pro její správnou funkci. K mikrokontroleru je připojen senzor teploty a relativní vlhkosti vzduchu SHT21. Senzor s mikrokontrolerem komunikuje pomocí rozhraní I2C pracujícího na hodinové frekvenci 400 kHz. Flash paměť AT45DB011 od firmy ATMEL má kapacitu 1 megabit. S mikrokontrolerem spolupracuje přes komunikační rozhraní SPI. Flash paměť najde své využití v případě, že se měřicí jednotce opakovaně nepodaří navázat spojení s převodníkem SimliciTI/TCP IP. Případně je možné měřicí jednotku nastavit do stavu, kdy se nesnaží navázat bezdrátové spojení a pouze ukládá data na Flash paměť. Po stisku tlačítka se měřicí jednotka restartuje, při přidržení delším jak 3 s se měřicí jednotka

vypne. Vypnutím bezdrátové komunikace se výrazně sníží spotřeba a prodlouží výdrž baterie. Tento stav by mohl najít uplatnění v případě dlouhodobého sledování teploty a relativní vlhkosti vzduchu v odlehlých místech. Pomocí JTAG signálů, které jsou připojeny k mikrokontroleru je možné ho programovat. Nahráním softwarového řešení bezdrátového senzoru pomocí JTAG signálů do mikrokontroleru je možné celý senzor ovládat. Mikrokontroler, Flash paměť i senzor SHT21 jsou aktivní zařízení a potřebují napájení. To zprostředkovává lithiová baterie CR2032, které poskytuje napětí o hodnotě 3 V a její kapacita je 220 mAh. Je to knoflíková baterie o průměru 20 mm a výšce 3,2 mm. Na pin mikrokontroleru, který může sloužit jako jeden z kanálů převodník A/D je přiveden signál z napěťového děliče na baterii. Díky tomu je možné určit napětí na baterii a popřípadě ji včas vyměnit, tuto funkci zajišťuje obvod pro kontrolu stavu baterie. Signalizační LED diody určují, do jakého stavu byla měřící jednotka přepnuta. Kvůli udržení nízké spotřeby není možné, aby LED diody svítily neustále, proto pouze bliknou při přechodu mezi režimy.

5.2 Návrh desky plošných spojů

Návrh desky plošných spojů byl proveden v programu Eagle. Při tvoření schematického návrhu byly využity referenční obvody poskytované firmou Texas Instrument k danému mikrokontroleru. Díky tomu nebyl problém vyřešit bezdrátovou část, která zahrnuje anténu a její impedanční přizpůsobení. Impedanční přizpůsobení je realizováno balunem spolu s několika diskrétními součástkami. Dále jsou k mikrokontroleru připojeny dva krystaly, které slouží jako zdroje hodinového signálu. Jeden z nich kmitá s frekvencí 32,768 kHz a druhý s frekvencí 26 MHz. Na vstupně – výstupní pin, který může sloužit jako převodník A/D je přiveden obvod pro kontrolu napájecího napětí. Senzor teploty a relativní vlhkosti vzduchu SHT21 je připojen na piny sloužící ke komunikaci pomocí sběrnice I2C. Flash paměť AT45DB011D je připojena k pinům mikrokontroleru sloužícím ke komunikaci pomocí sběrnice SPI. Na další piny mikrokontroleru jsou připojeny signalizační LED diody, tlačítko, pady pro připojení JTAG a testovací pady, které najdou využití při implementaci a testování softwaru.



Obr. 11: Schéma měřicí jednotky

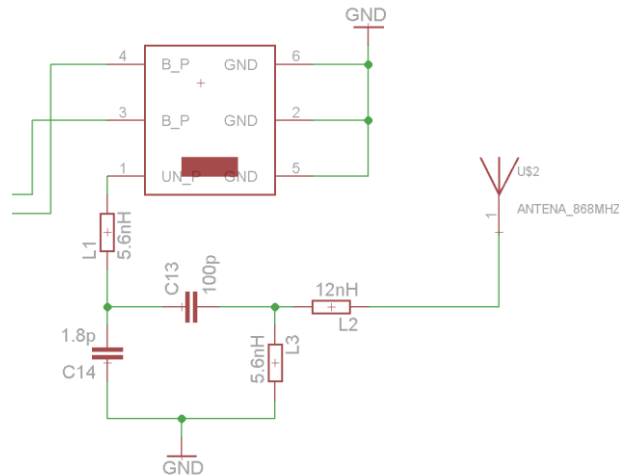
5.2.1 Mikrokontroler CC430F5137

Mikrokontroler CC430F5137 spadá do řady mikrokontrolerů CC430 vyráběných firmou Texas Instruments. Tento šestnácti-bitový mikrokontroler ovládá celou měřicí jednotku, všechny periferie jsou připojeny k němu. CC430 je řada mikrokontrolerů s integrovaným bezdrátovým jádrem, zaměřená na nízkou spotřebu. Nabízí několik úsporných režimů, jejichž vhodnou kombinací lze výrazně prodloužit životnost baterie, aniž by byla omezena funkčnost zařízení. V úsporném režimu má spotřebu 2 μ A. Při zapnutí bezdrátového modulu a přijímání dat se spotřeba zvýší na 15 mA, při odesílání dat je spotřeba 25 mA. Mikrokontroler nabízí dva šestnácti-bitové časovače, dvanácti-bitový převodník A/D, integrovanou 32 kB Flash paměť, dvě modulární komunikační rozhraní podporující I2C, SPI, UART a IrDA. [14]

5.2.2 Impedanční přizpůsobení signálové cesty k anténě

V následující kapitole je popsáno zapojení balunu spolu s diskretními součástkami. Toto zapojení zajišťuje impedanční přizpůsobení antény na 50 Ω . Balun je součástka, která v sobě integruje funkci několika diskretních součástek upravujících impedanční

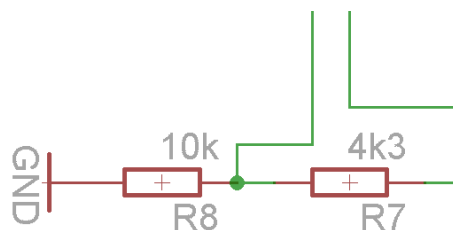
přizpůsobení antény. Díky tomu šetří místo na desce plošných spojů. V návrhu je použit balun nabízený společností Johanson Technology P/N 0868BM15C0001. Je navržen speciálně pro aplikace s mikrokontrolerem řady CC430, kde upravuje impedanční přizpůsobení antény pracující na frekvenci 868 MHz. Podle výrobce může pracovat při teplotách od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ a maximální ztráty jsou 2,1 dB. [15]



Obr. 12: Impedanční přizpůsobení antény s balunem

5.2.3 Kontrola stavu baterie

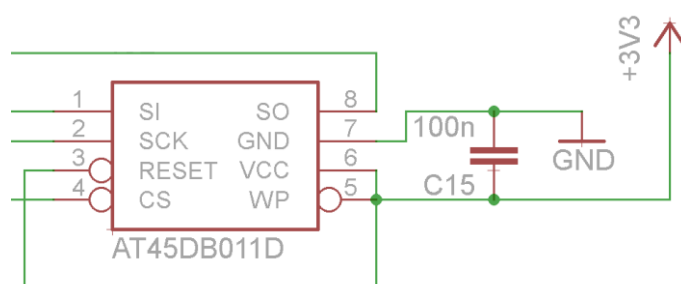
Obvod pro kontrolu stavu baterie je řešen jako jednoduchý napěťový dělič. První odpor má hodnotu $4,3\text{ k}\Omega$, druhý $10\text{ k}\Omega$. Jeho vstup i výstup je přiveden na vstupně – výstupní piny mikrokontroleru. Výstup napěťového děliče je připojen k pinu, který může sloužit jako převodník A/D, který porovnává toto napětí s referenčním napětím v mikrokontroleru CC430 $U_{REF} = 2,5\text{ V}$. Na vstup obvodu pro kontrolu napájecího napětí je přivedeno přes mikrokontroler napájecí napětí. Kvůli snížení spotřeby je na vstup napěťového děliče přiveden signál pouze v okamžik měření napájecího napětí.



Obr. 13: Obvod pro kontrolu stavu baterie

5.2.4 Zapojení Flash paměti

Flash paměť AT45DB011 od firmy ATMEL je zapojena podle katalogového listu dodávaného výrobcem s blokovacím kondenzátorem spojujícím napájení a uzemnění. Flash paměť komunikuje s mikrokontrolerem pomocí rozhraní SPI. Kapacita Flash paměti je 1 Mbit. Tato paměť je rozdělena na 512 stran, každá z nich obsahuje 264 bajtů. Součástí dále obsahuje 264 bajtů vyrovnávací paměti SRAM. Zařízení je schopné pracovat na frekvencích až 13 MHz se spotřebou 4 mA při čtení dat z Flash paměti. V úsporném režimu klesá spotřeba na 2 μ A. Při zápisu na Flash paměť nebo při jejím mazání je spotřeba 10 mA. Zařízení může pracovat při napájecím napětí 2,7 V až 3,6 V. Všechny zápisy do Flash paměti jsou samostatně časovány a nepotřebují předchozí vymazání paměti. Díky těmto vlastnostem je Flash paměť AT45DB011 vhodnou volbou pro aplikace zaměřené na nízkou spotřebu. Zařízení může spolehlivě pracovat při teplotách od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Flash paměť je dodávána v pouzdru SOIC (small outline integrated circuit) s piny: CS (Chip Select), SCK (Serial Clock), SI (Serial Input), SO (Serial Output), WP (Write Protect), RESET (Chip Reset), VCC a GND. [16]

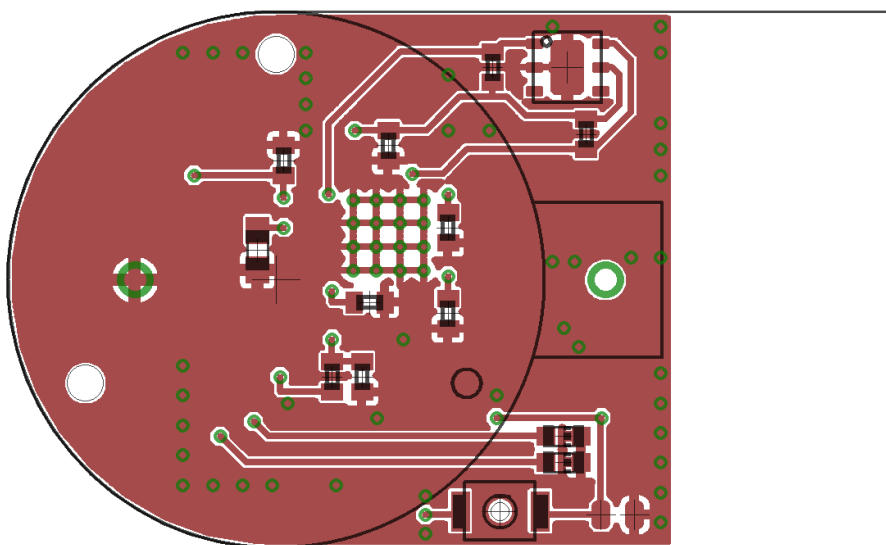


Obr. 14: Zapojení Flash paměti

5.3 Návrh layoutu desky plošných spojů

Tvar desky plošných spojů je navržen s ohledem na minimální velikost. Obrys i velikost desky plošných spojů výrazně ovlivnil držák baterie Multicomp CH25-2032LF, jehož tvar kopíruje. Tím získává deska plošných spojů tvar protažené půlkružnice. Jedná se o dvouvrstvou desku plošných spojů dlouhou 38 mm a širokou 23 mm. Na maximální ploše desky plošných spojů je rozlita měď, která je připojena k zemi. Tato vrstva slouží jako stínění. Toto stínění se nenachází pouze v oblasti pod anténou. Na vrchní straně desky plošných spojů je umístěn senzor teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Tato poloha

dostatečně daleko od ostatních součástek na vrchní straně desky plošných spojů je zvolena, aby senzor byl jen minimálně ovlivňován ztrátovým teplem vyzařovaným z ostatních součástek. Zároveň na senzor v této poloze může snadno působit teplota i vlhkost vzduchu. Jeho umístění je vidět na Obr. 15 v pravé horní části vylité mědi. Na vrchní straně desky plošných spojů se také nachází již zmiňovaný držák baterie, který zaujímá většinu plochy. Držák baterie stojí na nožičkách a je podepřen pilíři, takže je pod ním dostek prostoru pro umístění dalších menších součástek. Pod držákem baterie je rozloženo 6 blokovacích kondenzátorů a obvod pro kontrolu napájecího napětí. V pravém dolní rohu vylité mědi, vedle držáku baterie je umístěno tlačítko s pozitivní logikou (po stisku přivede na vstupně výstupní pin mikrokontroleru logickou jedničku), dvě signalizační LED diody (červená a zelená) a dvě pájecí plošky (na jednu z nich je přivedeno napájecí napětí a druhá je spojena s logickou zemí). Tyto plošky mohou najít uplatnění při ladění programu nebo při hledání jiných chyb.

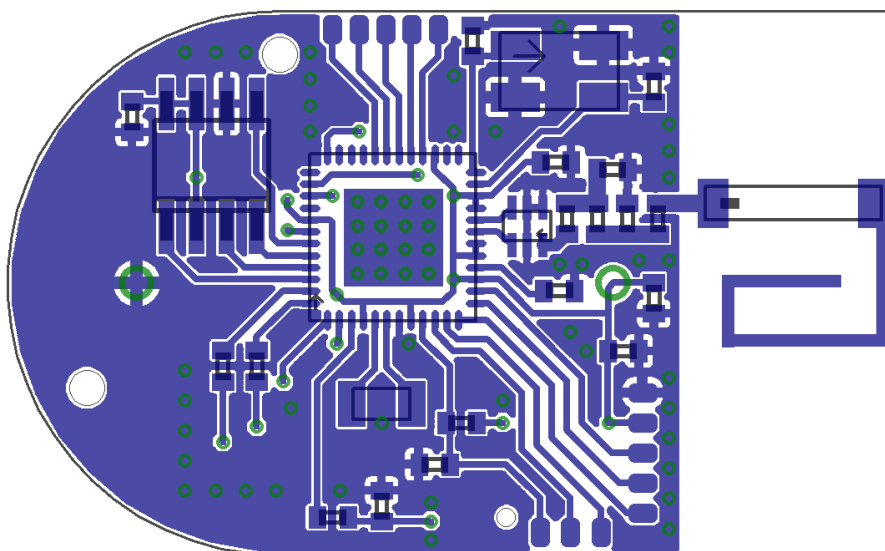


Obr. 15: Návrh desky plošných spojů - top

Spodní strana desky plošných spojů je osazena mnohem hustěji. V jejím středu je umístěn mikrokontroler řady CC430. Pomocí něj je možné ovládat celou měřicí jednotku. Vpravo od něj se nachází anténa a impedančně přizpůsobená cesta tvořená balunem spolu s diskretními součástkami. Anténa pracuje na frekvenci 868 MHz, výrobcem je firma Johanson Technology a její přesné označení je P/N 0868AT43A0020. Odpojením pruhu vylité mědi od antény lze změnit její pracovní frekvenci. Pro zajištění vhodného impedančního přizpůsobení signálové cesty k anténě byl využit program AppCAD. Po

zadání vstupních parametrů, které jsou: použitý základní materiál a jeho tloušťka, tloušťka stínění tvořeného vylitou mědí, délka signálové cesty, pracovní frekvence antény, hodnota izolační vzdálenosti a šířka signálové cesty, program vypočítá impedanci signálové cesty. Některé technologické parametry lze ovlivnit jen těžko, ale snadno lze změnit šířku signálové cesty, hodnotu izolační vzdálenosti i délku signálové cesty. Pomocí úprav těchto parametrů lze nastavit impedanci signálové cesty k anténě na požadovaných 50Ω . Nad impedančně přizpůsobenou signálovou cestou k anténě je umístěn 26 MHz krystal. Pod touto cestou, v pravém dolním rohu vylité mědi se nachází pájecí plošky pro připojení JTAG. Díky těmto pájecím ploškám lze měřicí jednotku připojit k programátoru a pomocí něj zařízení programovat. Pod mikrokontrolerem je připájen 32 kHz krystal. V levé části desky plošných spojů je umístěna Flash paměť AT45DB011. V horní části desky plošných spojů je na pájecí plošky přivedeno 5 vstupně-výstupních pinů mikrokontroleru. Tyto pájecí plošky mohou být využity při programování, testování nebo odladování měřicí jednotky. Může na ně být přiveden pomocný signál, který lze vyhodnotit pomocí voltmetru nebo logického analyzátoru. Horní i spodní strana desky plošných spojů je propojena četnými prokovy. Ty zajišťují stejnou hodnotu logické nuly po celé desce plošných spojů.

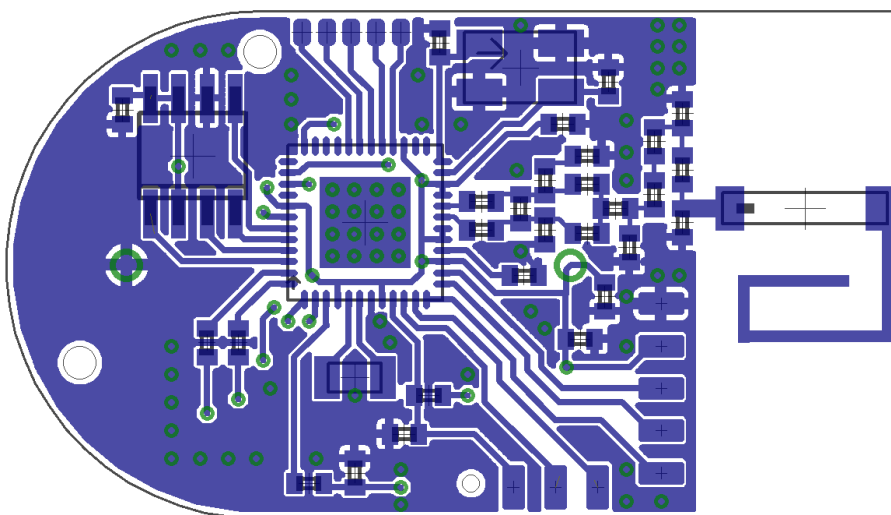
[15]



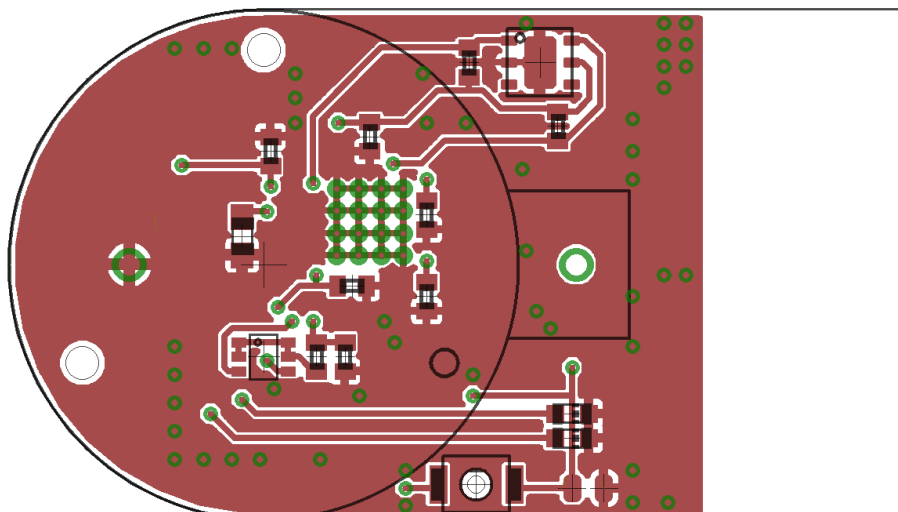
Obr. 16: Návrh desky plošných spojů - bottom

5.4 Přepřerování návrhu desky plošných spojů

Po oživení desky plošných spojů a implementaci softwaru vše fungovalo podle předpokladů. Jediný problém, který se vyskytl, byl v dosahu bezdrátové komunikace. Převodník SimpliCI/TCP IP spolehlivě přijímal data z měřicí jednotky na volném prostranství do vzdálenosti 15 m. Takový dosah je pro zařízení tohoto typu nepřijatelný. Kvůli vyřešení problému byla snaha upravit signálovou cestu k anténě. Prvním krokem bylo nahrazení hmotových cívek, na kterých vznikají ztráty, drátovými. Toto opatření ale nepřineslo žádnou změnu v dosahu. Dalším krokem byla záměna balunu za jiný typ. Ale ani to nepomohlo ke zvýšení dosahu zařízení. Proto bylo rozhodnuto, že jediným možným dalším krokem je nový návrh desky plošných spojů. Tento návrh nebude obsahovat balun, který sice šetří místo na desce plošných spojů ale pravděpodobně je příčinou malého dosahu měřicí jednotky. Při přepřerování návrhu desky plošných spojů došlo vlivem nahrazení balunu deseti diskretními součástkami ke zvětšení rozměrů na 41 mm x 23 mm. Při příležitosti výroby nové desky plošných spojů a získání více prostoru byly nahrazeny pájecí plošky pro připojení JTAG většími, kvůli snadnějšímu pájení. Také došlo k úpravě obvodu pro kontrolu stavu baterie. Nově vyrobená měřicí jednotka má spolehlivý dosah na vzdálenost 100 m ve volném prostranství.



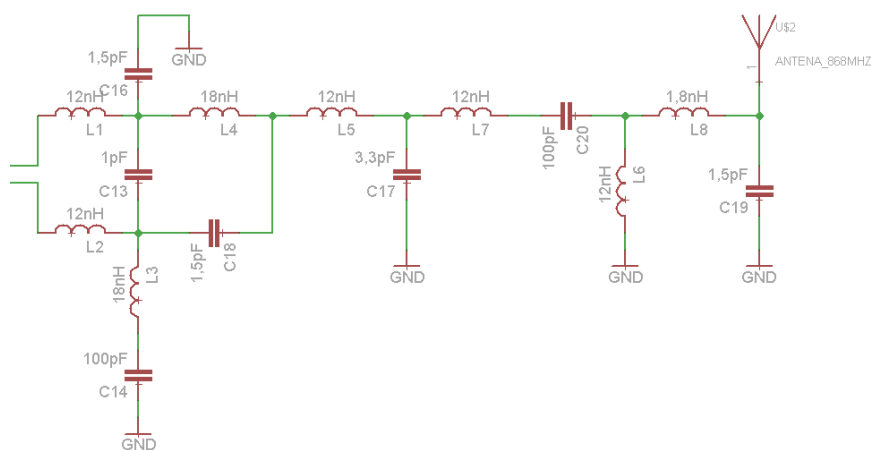
Obr. 17: Přepřerovaný návrh desky plošných spojů - bottom



Obr. 18: Přeprocessovaný návrh desky plošných spojů - top

5.4.1 Diskrétní impedanční přizpůsobení antény

Diskrétně řešené impedanční přizpůsobení antény zabírá mnohem víc místa na desce plošných spojů. Jediná součástka (balun) byla nahrazena deseti indukčnostmi a kapacitami různých hodnot. Výhoda tohoto zapojení spočívá v dosahu bezdrátové komunikace měřicí jednotky s převodníkem SimpliciTI/TCP IP.

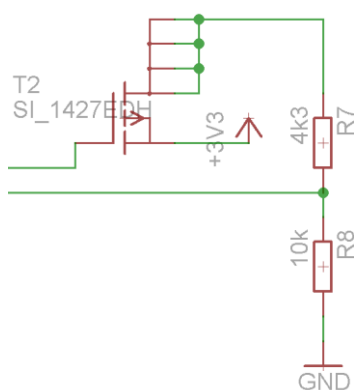


Obr. 19: Diskrétně řešené impedanční přizpůsobení antény

5.4.2 Přeprocessovaný obvod pro kontrolu stavu baterie

Při příležitosti výroby druhé desky plošných spojů byl přeprocessován i obvod pro kontrolu stavu baterie. Předchozí řešení přinášelo nepřesnosti, protože napájecí napětí přivedené na vstup obvodu pro kontrolu stavu baterie procházelo přes mikrokontroler, kde mohlo

docházet ke ztrátě nebo naopak zesílení signálu. V přepracovaném návrhu je napájecí napětí přímo z baterie přivedeno na PMOS tranzistor SI1427EDH (vyráběný firmou Vishay Siliconix) zapojený jako spínač. Na hradlo PMOS tranzistoru je připojen jeden ze vstupně-výstupních pinů mikrokontroleru, kterým se tranzistor podle potřeby otevírá a zavírá. Zbytek obvodu zůstal beze změny. Výstupní signál z napěťového děliče je přiveden na vstupně-výstupní pin mikrokontroleru, který slouží jako převodník A/D. Převodník porovnává výstupní napětí z obvodu pro kontrolu stavu baterie s vnitřním referenčním napětím 2,5 V.



Obr. 20: Přepracovaný obvod pro kontrolu stavu baterie

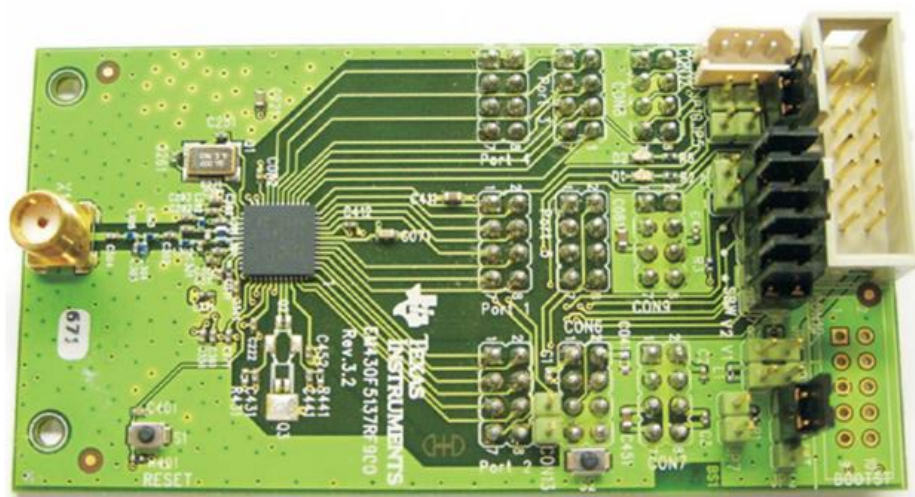
5.5 Softwarové řešení

Návrh softwaru byl proveden ve vývojářském prostředí Code Composer Studio 5.3.0. V tomto prostředí je možné programovat všechny mikrokontrolery a vestavěné procesory vyráběné firmou Texas Instruments. V Code Composer Studiu jsou sdruženy všechny užitečné nástroje pro programování a odlaďování vestavěných aplikací. Intuitivní prostředí provádí uživatele krok po kroku celým vývojem aplikace. [17]

5.5.1 Vývojový kit

Pro softwarové řešení bezdrátové komunikace byl využit vývojový kit poskytovaný firmou Texas Instruments k vývoji bezdrátových aplikací založených na mikrokontrolerech řady CC430. Využití tohoto kitu poskytlo možnost souběžného návrhu hardwaru a softwaru. Tento vývojový kit EM430F5137RF900 se skládá ze dvou desek plošných spojů. Každá z nich je osazena mikrokontrolerem CC430F5137, anténou a všemi dalšími nezbytnostmi pro realizaci bezdrátového projektu. Nachází se na ní také dvě LED diody, dvě tlačítka a několik pinových lišt pro snadnější odlaďování programu. Při softwarovém řešení bezdrátové

komunikace jedna z desek představovala měřicí jednotku a druhá převodník SimpliCI/TCP IP. Díky tomu byla bezdrátová komunikace mezi zařízeními připravena dříve, než byly vyrobeny a oživeny měřicí jednotky. Tato bezdrátová komunikace probíhá na frekvenci 868 MHz. Ovládá se pomocí komunikačního protokolu SimpliCI. To je protokol vytvořený firmou Texas Instruments speciálně pro bezdrátové aplikace zaměřené na nízkou spotřebu.[18]



Obr. 21: Vývojový kit EM430F5137RF900 [18]

5.5.2 Komunikace s SHT21

Po osazení nově vyrobených desek plošných spojů vznikly tři měřicí jednotky. Prvním krokem bylo zajištění správné spolupráce mikrokontroleru s jednotlivými funkčními bloky měřicí jednotky. Nejdůležitějším blokem měřicí jednotky je po mikrokontroleru a bezdrátové komunikaci senzor teploty a relativní vlhkosti vzduchu SHT21. Komunikace se senzorem je popsána v knihovně „sht21.c“. Senzor komunikuje s mikrokontrolerem pomocí rozhraní I2C, které je nejprve zapotřebí inicializovat. K tomu slouží funkce „I2C_init“. Po spuštění napájení senzoru je třeba 15 ms vyčkat dokud nebude schopen přijímat příkazy od mikrokontroleru. Pro měření teploty slouží příkaz 0xE3, pro změření relativní vlhkosti vzduchu slouží příkaz 0xE5. Po přijetí příkazu a ověření CRC probíhá měření. Senzor měří relativní vlhkost vzduchu při rozlišení 12 bitů 22 ms. Teplota je měřena 66 ms s rozlišením 14 bitů. Po přijetí naměřených dat je senzoru odeslána zpráva o ukončení komunikace. Jakmile ji senzor přijme, automaticky se přepne do úsporného režimu, ve kterém spotřebovává 0,15 μ A. Naměřená data je nutné zpracovat. K tomu slouží tyto rovnice dodávané výrobcem. [9]

$$RH = -6 + 125 * \frac{S_{RH}}{2^{16}}$$

$$T = -46,85 + 175,72 * \frac{S_T}{2^{16}}$$

S_{RH} je hodnota dat ze senzoru při měření relativní vlhkosti vzduchu. S_T jsou data ze senzoru při měření teploty vzduchu. T je výsledná teplota ve stupních Celsia. RH představuje relativní vlhkost vzduchu uvedenou v procentech. Pro měření relativní vlhkosti vzduchu slouží v programu funkce „measure_RH“, pro měření teploty je to funkce „measure_T“.

5.5.3 Komunikace s Flash pamětí

Dalším krokem bylo zprovoznění komunikace mezi mikrokontrolerem a Flash pamětí. Funkce ovládající tuto komunikaci jsou popsány v knihovně „flash.c“. Komunikace probíhá na rozhraní SPI. Před použitím tohoto komunikačního rozhraní je třeba ho inicializovat. To zajišťuje funkce „SPI_init“. Před každým komunikačním cyklem je třeba přivést na pin CS (Chip Select) Flash paměti logickou nulu pro povolení komunikace. Po ukončení komunikačního cyklu je zapotřebí vrátit zpět logickou jedničku. Díky tomu se Flash paměť přepne zpět do úsporného režimu, kdy spotřebovává 2 μ A. Flash paměť je ovládána pomocí tří funkcí. Pro zápis na Flash paměť slouží funkce „writeFLASH“, která za poslední uložená data zapíše nová. Ukládají se 3 bajty, první z nich je relativní vlhkost vzduchu a další dva jsou teplota vzduchu. Další funkcí je „eraseFLASH“, která smaže záznamy z celé Flash paměti kromě první strany. Na první z 512 stran Flash paměti se ukládá frekvence měření. Poslední funkcí je „readFLASH“. Po jejím zavolání je vyčten z Flash paměti požadovaný záznam (relativní vlhkost vzduchu i teplota). To znamená, že jejím parametrem je číslo uloženého záznamu, který chceme nyní vyčíst.

5.5.4 Zbylé periferie

Ovládání tlačítka a obvodu pro kontrolu stavu baterie je popsáno v knihovně „mode.c“. Obvod pro kontrolu stavu baterie je ovládán pomocí funkce „battery_measure“. Tato funkce inicializuje převodník A/D, pustí do obvodu pro kontrolu stavu baterie napájecí napětí a vyhodnotí napětí na jeho výstupu. Poté je převodník A/D opět vypnut a tranzistor, který pouští napájecí napětí na vstup obvodu pro kontrolu stavu baterie uzavřen. Z napětí

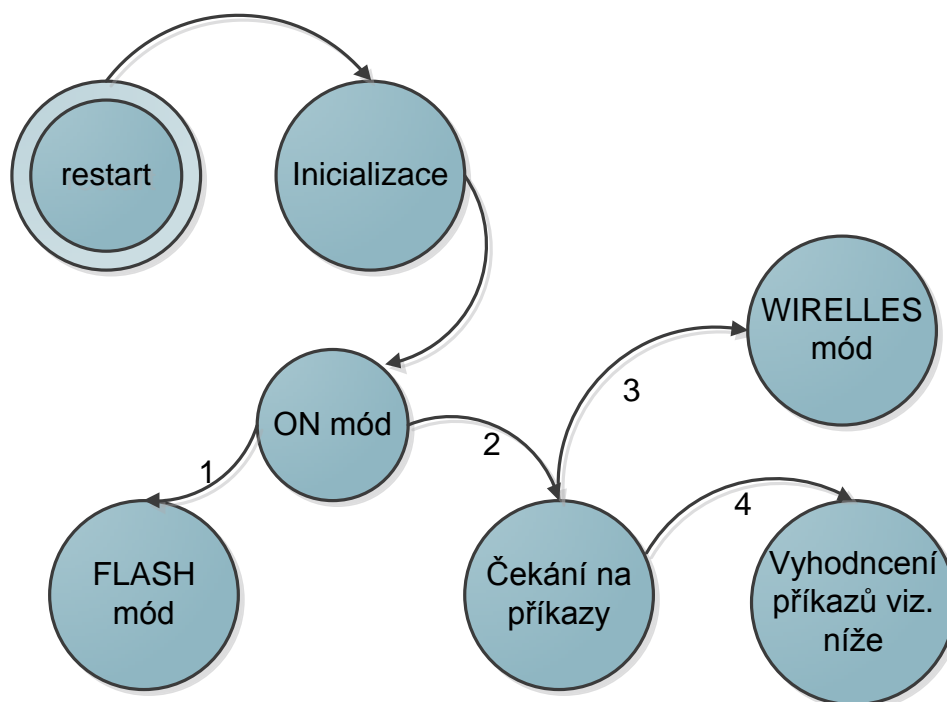
na výstupu obvodu pro kontrolu stavu baterie lze dopočítat vstupní napětí, tedy napájecí napětí.

Ovládání tlačítka je řešeno pomocí přerušení. Po stisku tlačítka program skočí do přerušení, ve kterém pomocí časovačů a jejich záchytných registrů vyhodnocuje dobu stisku tlačítka. Po uvolnění tlačítka do 3 s po jeho stisku dojde k restartu měřicí jednotky. Při přidržení tlačítka delším jak 3 s dojde k vypnutí měřicí jednotky.

5.6 Uživatelská příručka

Měřicí jednotka má 4 použitelné módy. Jsou to ON, OFF, FLASH a WIRELLES. Po restartu a inicializaci (zahrnuje vyčtení periody měření z Flash paměti) zařízení vstoupí do ON módu, ve kterém se pokusí navázat bezdrátové spojení s převodníkem SimliciTI/TCP IP. Pokud se spojení nepodaří navázat, spustí se FLASH mód. Jestli-že je bezdrátové spojení navázáno pokračuje ON mód. Pak záleží na uživateli, co si přeje se zařízením dělat. Měřicí cyklus může probíhat s periodou od 1 s až do 18 hodin. Teplota je měřena s rozlišením na jedno desetinné místo, relativní vlhkost na jednotky procent.

Přidržením tlačítka delším jak 3 s se zařízení přepne do OFF módu. Stisknutím a uvolnění tlačítka kratším jak 3 s je zařízení restartuje. K restartu dochází i po 4 nezdařilých pokusech o odeslání jakékoli zprávy.



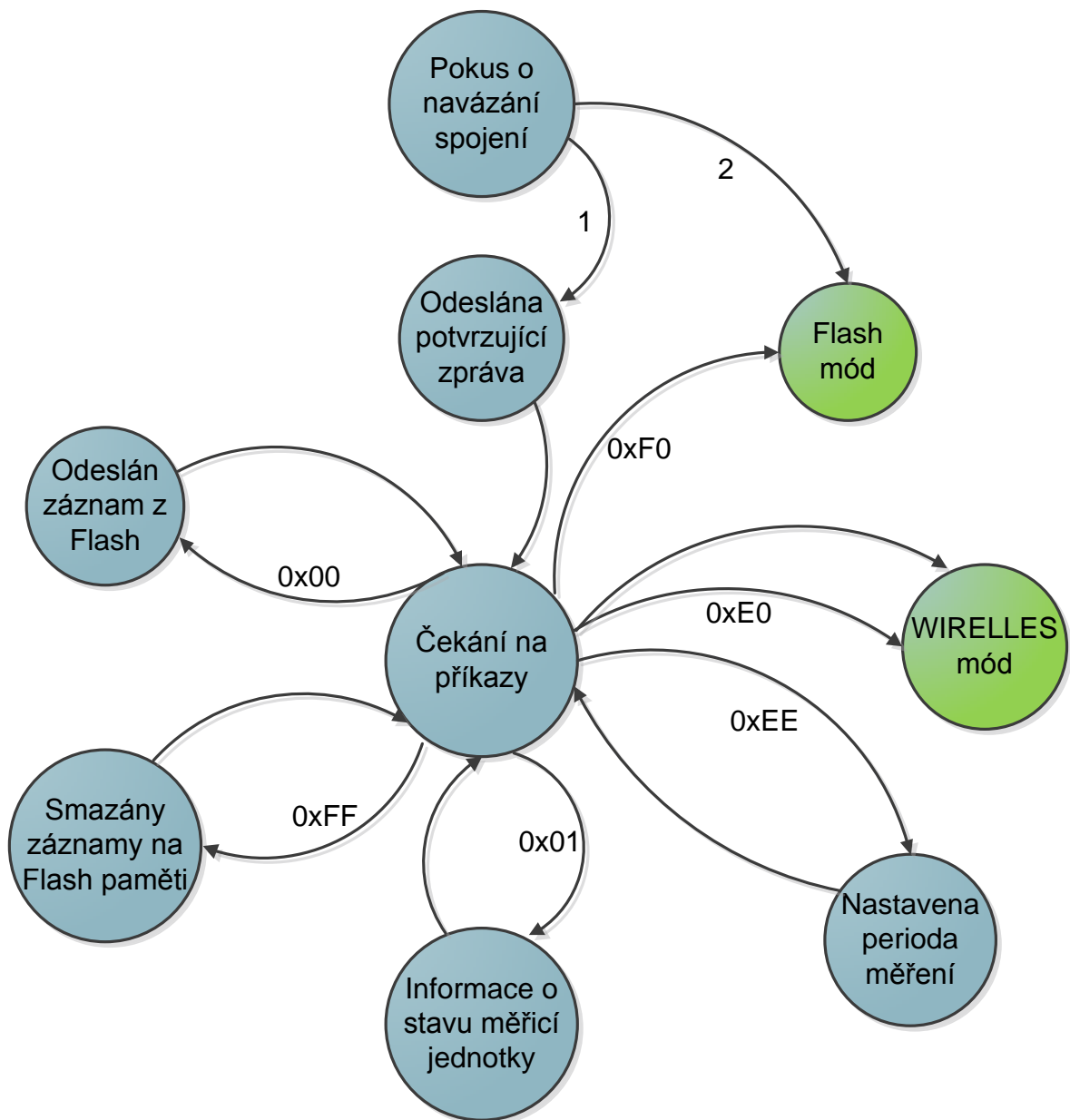
Obr. 22: Stavový automat – spuštění měřicí jednotky

Po restartu dojde k inicializaci komunikačních rozhraní I2C a SPI. Po inicializaci SPI je možné komunikovat s Flash pamětí. Proto je z ní poté vyčtena perioda měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Měřicí jednotka pak skočí do ON módu, ve kterém se pokouší o navázání bezdrátové komunikace. Pokud se navázání bezdrátové komunikace nezdaří (podmínka 1), měřicí jednotka vstoupí do FLASH módu. Podaří-li se bezdrátové spojení navázat (podmínka 2), čeká měřicí jednotka 3 s na příkazy. Když je nedostane (podmínka 3) vstoupí od WIRELLES módu. Pokud měřicí jednotka dostane příkazy (podmínka 4), tak je vyhodnocuje. Tato možnost je podrobněji popsána v následující kapitole.

5.6.1 ON mód

Po spuštění ON módu se rozsvítí obě led a svítí, dokud z něj zařízení nevystoupí.

Po inicializaci měřicí jednotka implicitně vstoupí do ON módu, ve kterém se pokusí navázat bezdrátové spojení s převodníkem SimpliCI/TI/TCP IP. Při úspěšném navázání bezdrátového spojení měřicí jednotka odešle převodníku SimpliCI/TI/TCP IP zprávu potvrzující navázání spojení. Po odeslání potvrzující zprávy měřicí jednotka čeká 3 s na příkazy (přijatá data odeslaná z uživatelské aplikace). Po přijetí a vykonání příkazu zařízení čeká opět 3 s na další příkaz. Pokud do 3 s nedostane žádný příkaz, spustí se WIRELLES mód. Pomocí příkazů je možné: nastavit periodu měření, vymazat záznamy na flash paměti, spustit FLASH mód, zjistit periodu měření a počet záznamů na flash paměti, vyčíst záznam z flash paměti. Příkazy jsou podrobně popsány v příloze Datové pakety, která je na CD.



Obr. 23: Stavový automat - ON mód

5.6.2 WIRELLES mód

Po spuštění WIRELLES módu svítí 1 s zelená LED dioda (P 2.1).

Do WIRELLES módu se zařízení dostane, když v ON módu nedostane 3 s žádné příkazy. Ve WIRELLES módu dochází k měření teploty, relativní vlhkosti vzduchu, napětí baterie a bezdrátovému odesílání naměřených dat se zadanou frekvencí. Pro snížení spotřeby se měření napětí baterie provádí při každém desátém měřicím cyklu (mezitím se odesílá

poslední změřená hodnota napětí na baterii). Po změření a odeslání dat se zařízení přepne do úsporného režimu, z kterého se probudí po vypršení periody měření.

5.6.3 FLASH mód

Po spuštění FLASH módu 1 s svítí červená LED dioda (P 2.2).

Do FLASH módu se zařízení dostane, když v ON módu dostane příkaz pro přepnutí do FLASH módu, nebo pokud se nepodaří navázat bezdrátové spojení se sběrným bodem. Ve FLASH módu se měří teplota a relativní vlhkost vzduchu. Tyto hodnoty se ukládají na Flash paměť. Staré záznamy se nepřepisují, nové záznamy se zapisují až za poslední uložená data na Flash paměti. Po změření a uložení dat na Flash paměť se zařízení přepne do úsporného režimu, z kterého se probudí po vypršení periody měření. Na Flash paměť je možné uložit až 44968 cyklů měření. Pokud je místo už jen pro méně jak 88 cyklů měření rozsvítí se červená LED dioda (P2.2). Po zaplnění celé Flash paměti zůstane svítit červená LED dioda a zařízení se přepne do OFF módu.

5.6.4 OFF mód

Po spuštění OFF módu zablikají obě LED diody (1 s svítí, 1 s nesvítí, 1 s svítí).

Do OFF módu se zařízení dostane po přidržení tlačítka na dobu delší jak 3 s nebo pokud je zařízení ve FLASH módu a celá FLASH paměť se zaplní. V OFF módu je zařízení přepnuté do úsporného režimu, z kterého se dostane jedině restartem.

Závěr

Cílem bakalářské práce byla realizace bezdrátového senzoru teploty a relativní vlhkosti vzduchu. A následné zkonstruování měřicí jednotky, která by umožňovala bezdrátovou komunikaci s převodníkem SimliciTI/TCP IP. Tato měřicí jednotka bude součástí měřicího zařízení ovládaného uživatelem prostřednictvím aplikace v operačním systému Android.

Byla provedena základní rešerše komerčně dostupných senzorů pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Na základě jejího výsledku byl vybrán senzor SHT21, který se pro fyzickou realizaci projektu jeví jako nejvýhodnější díky svým vlastnostem jako jsou nízká spotřeba, vysoká přesnost i malé rozměry.

Pokračovalo se návrhem desky plošných spojů a softwaru. Při testování měřicí jednotky se objevila chyba odstranitelná pouze přepracováním návrhu desky plošných spojů. Zařízení mělo nedostatečný dosah, přibližně 10 m na volném prostranství. Po přepracování návrhu desky plošných spojů se dosah ve volném prostranství zvýšil na 100 m. Toto zvýšení dosahu bylo způsobeno změnou impedančního přizpůsobení signálové cesty mezi mikrokontrolerem a anténou. Ze signálové cesty musel být odstraněn balun, který byl nahrazen devíti diskrétními součástkami (kapacitory a induktory). Balun v sobě integruje vlastnosti několika diskrétních součástek a tím šetří místo na desce plošných spojů ale jeho nevýhodou jsou vyšší ztráty.

Měřicí jednotka může měřit teplotu a relativní vlhkost vzduchu ve dvou stavech. V jednom z nich (WIRELES) je s danou periodou bezdrátově odesílá. Po změření a odeslání dat se přepne do úsporného režimu, z kterého vystoupí až po vypršení periody měření. V úsporném režimu spotřebovává 8 μA . Při odesílání dat spotřeba vzroste na 35 mA. Při měření, které trvá 88 ms je spotřeba 0,3 mA. V druhém stavu (FLASH) je bezdrátová část vypnuta a naměřená data se s danou periodou zapisují na Flash paměť. Po dobu zápisu na Flash paměť je spotřeba proudu 10 mA. Po spuštění měřicí jednotky se přepne na 3 s do režimu, ve kterém data přijímá (ON). V tu chvíli je možné posílat měřicí jednotce příkazy (změna periody měření, vyčítání dat z Flash paměti, atd.). V tomto režimu spotřebovává 15 mA.

Seznam literatury

- [1] MIKAN, Jaroslav. *Měření plynu*. 1. vyd. Říčany u Prahy: GAS, 2003, 351 s. ISBN 80-732-8053-1. 307-315
- [2] Měření vlhkosti vzduchu. In: Katedra mikroelektroniky, elektrotechnický fakulta ČVUT v Praze [online]. [cit. 2013-11-04]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/cviceni/Navody%20na%20cviceni/07.Mereni%20vlhkosti.pdf>
- [3] HONEYWELL INTERNATIONAL. [online]. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://www.buildingcontrolworkbench.com/Portals/1/GrayBook/Gelcncom.htm>
- [4] SENSORS. [online]. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://www.sensorsmag.com/sensors/humidity-moisture/choosing-a-humidity-sensor-a-review-three-technologies-840>
- [5] FRADEN, Jacobs. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. 3rd ed. New York: Springer-Verlag, c2004, xvii, 589 s. ISBN 03-870-0750-4.
- [6] ENCYCLOPEDIA OF CHEMICAL ENGINEERING EQUIPMENT. [online]. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://encyclopedia.che.engin.umich.edu/Pages/ProcessParameters/HumidityMeasurement/HumidityMeasurement.html>
- [7] SENSIRION. [online]. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT1x_Datasheet_V5.pdf
- [8] SILICON LABORATORIES. [online]. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/Si7005.pdf>
- [9] SENSIRION. [online]. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT21_Datasheet_V3.pdf

[10] Hw.cz. [online]. [cit. 2013-11-14]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbernice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeeprom-24lc256>

[11] Root.cz. [online]. [cit. 2013-11-14]. Dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbernice-spi-a-i2c/#ic=serial-box&icc=text-title>

[12] Embedded. [online]. [cit. 2013-11-14]. Dostupné z: <http://www.embedded.com/electronics-blogs/beginner-s-corner/4023908/Introduction-to-Serial-Peripheral-Interface>

[13] TEXAS INSTRUMENTS. *SimpliciTI: Simple Modular RF Network Specification*. San Diego, California USA, 2007, 34 s.

[14] CC430F5137. TEXAS INSTRUMENTS. [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/cc430f5137>

[15] JOHANSON TECHNOLOGY. [online]. [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.johansontechnology.com/>

[16] ATMEL CORPORATION. [online]. [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/56151/ATMEL/AT45DB011.html>

[17] Code Composer Studio. TEXAS INSTRUMENTS [online]. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.ti.com/tool/ccstudio>

[18] Texas Instruments: EM430F5137RF900 CC430F5137 Wireless Development Tool. Element14 [online]. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.element14.com/community/docs/DOC-51215/1/texas-instruments-em430f5137rf900-cc430f5137-wireless-development-tool>

Seznam zkratek

I2C Internal Integrated Circuit

SPI Serial Peripheral Interface

RH	relative humidity
RV	relativní vlhkost
A/D	analogově digitální
SMD	surface mount device
LCC	Leadless Chip Carrier
QFN	quad-flat no-leads
DFN	dual-flat no-leads
SDA	serial data
SCL	serial clock
ACK	acknowledge
MOSI	master out slave in
MISO	master in slave out
SS	slave select
AES	Advanced Encryption Standard
JTAG	Joint Test Action Group

Seznam příloh

Příloha 1: Rozpiska součástek

Příloha 2: Schéma zapojení přepracované měřicí jednotky

Příloha 3: Vodivý motiv - top

Příloha 4: Vodivý motiv - bottom

Příloha 5: Osazovací výkres - top

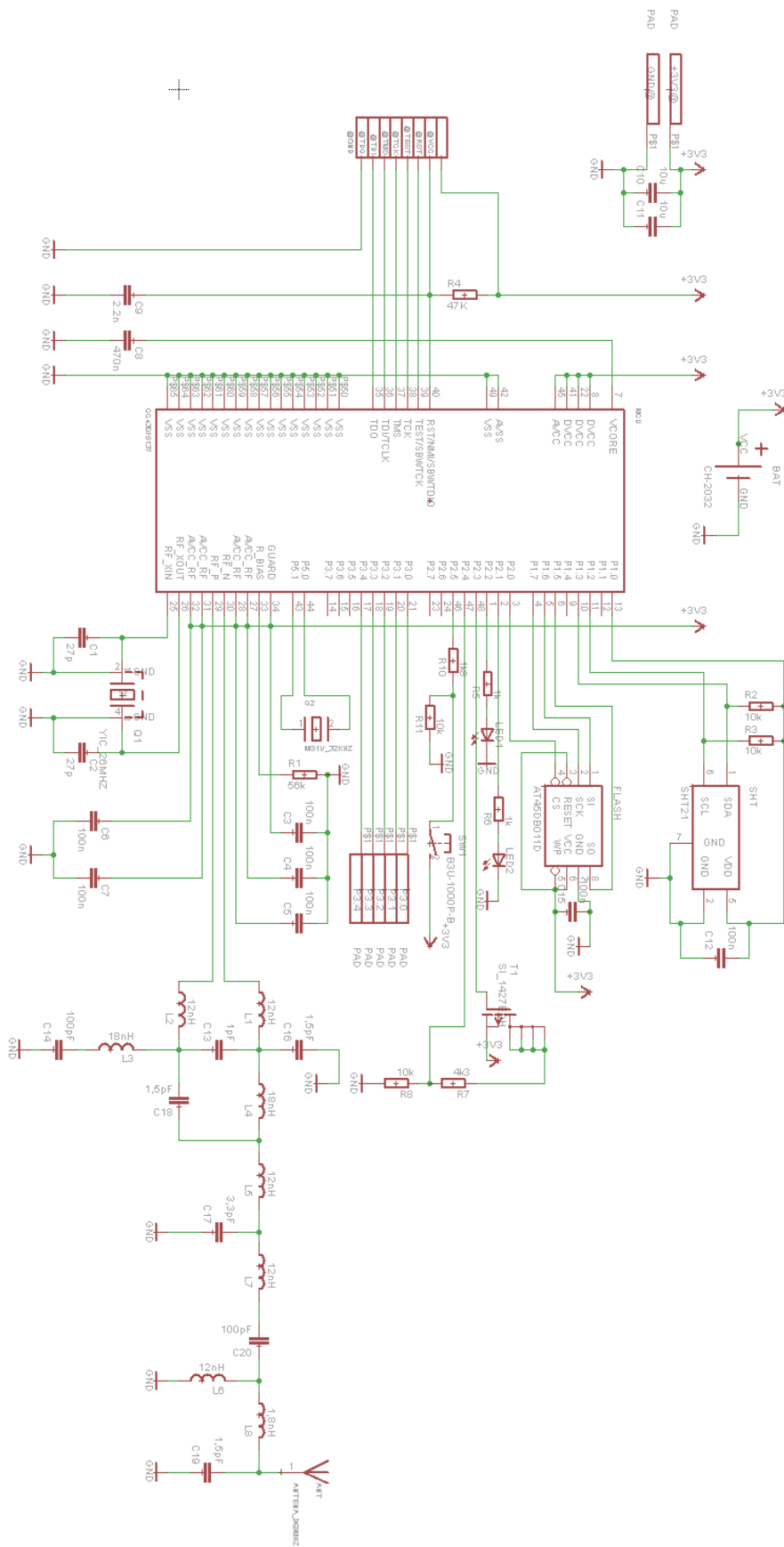
Příloha 6: Osazovací výkres -bottom

Příloha 7: CD/DVD

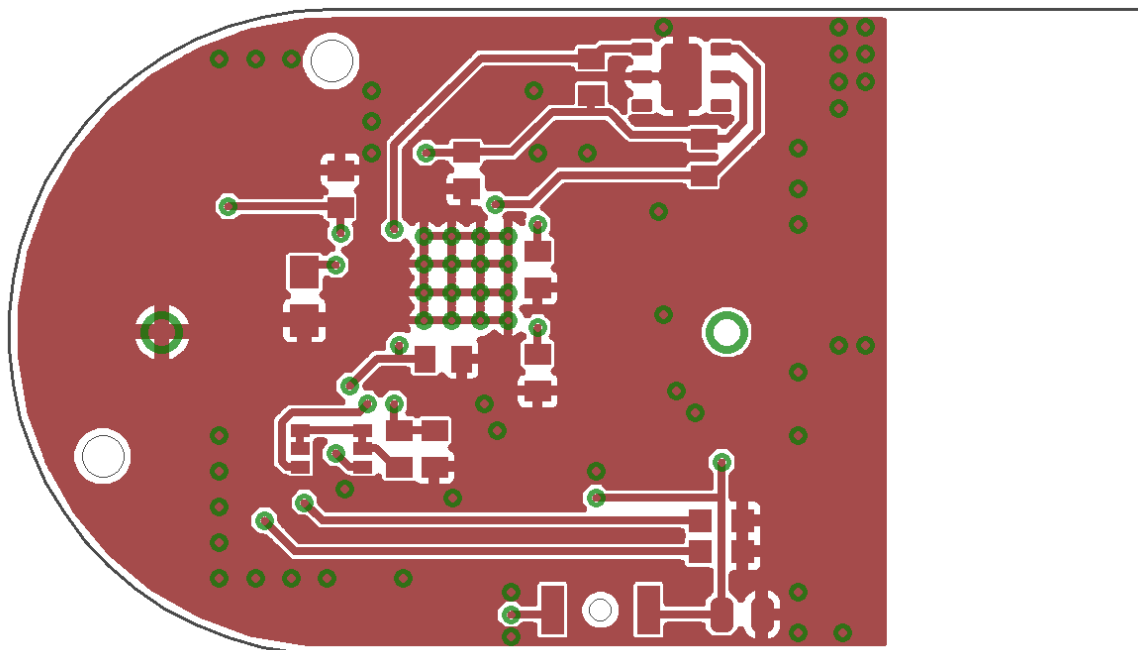
Příloha 1: Rozpiska součástek

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
ANT	868 MHz	ANT_JOHANSON_T	anténa
BAT		CH-2032	držák baterie
C3, C4, C5, C6, C7, C12, C15	100 nF	C0402	kapacitor
C10, C11	10 uF	C0402	kapacitor
C1, C2	27 pF	C0402	kapacitor
C8	470 nF	C0603	kapacitor
C9	2,2 nF	C0402	kapacitor
C14, C20	100 pF	C0402	kapacitor
C13	1 pF	C0402	kapacitor
C16, C18, C19	1,5 pF	C0402	kapacitor
C17	3,3 pF	C0402	kapacitor
Flash		SOIC8	Flash paměť AT45DB011
LED1, LED2		CHIP-LED0603	LED dioda
L1, L2, L5, L6, L7	12 nH	L0402	induktor
L3, L4	18 nH	L0402	induktor
L8	1,8 nH	L0402	induktor
MCU		QFP48	CC430F5137
Q1	26 MHz	YIC_KRYSTAL	krystal
Q2	32 kHz	MS1V-T1K	krystal
R1	56 kΩ	R0402	rezistor
R2, R3, R8, R11	10 kΩ	R0402	rezistor
R5, R6	1 kΩ	R0402	rezistor
R4	47 kΩ	R0402	rezistor
R7	4,3 kΩ	R0402	rezistor
R10	1,8 kΩ	R0402	rezistor
SHT		DFN6	senzor SHT21
SW1		B3U-1000P-B	tlačítko
T1		SOT-363	PMOS SI_1427EDH

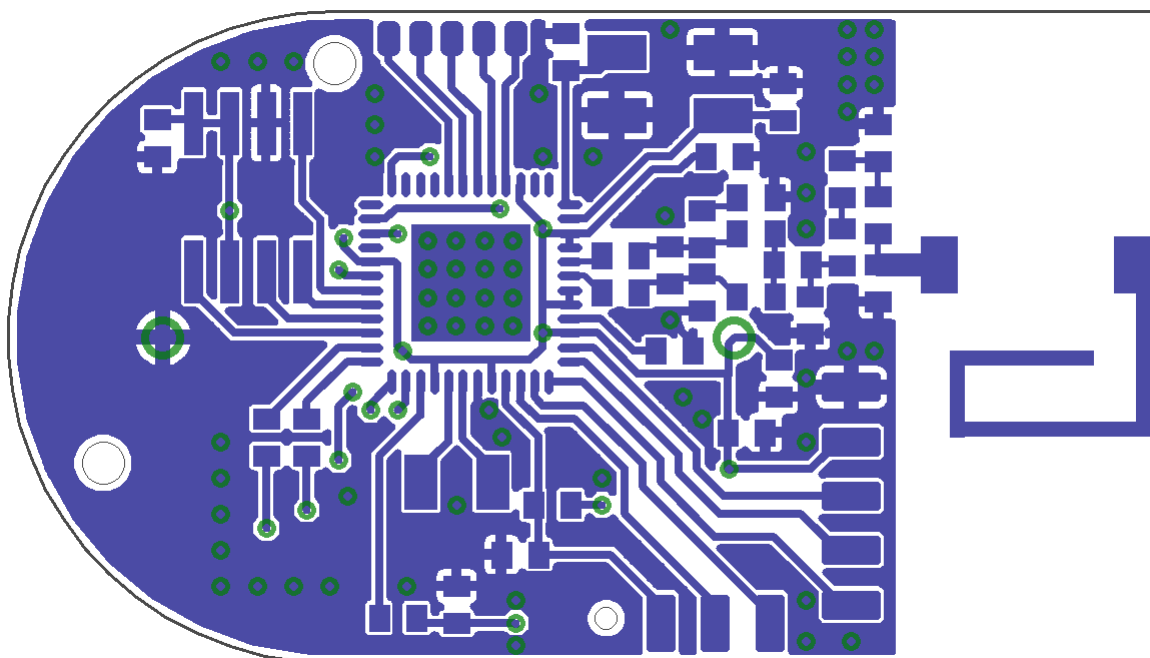
Příloha 2: Schéma zapojení přepracované měřicí jednotky



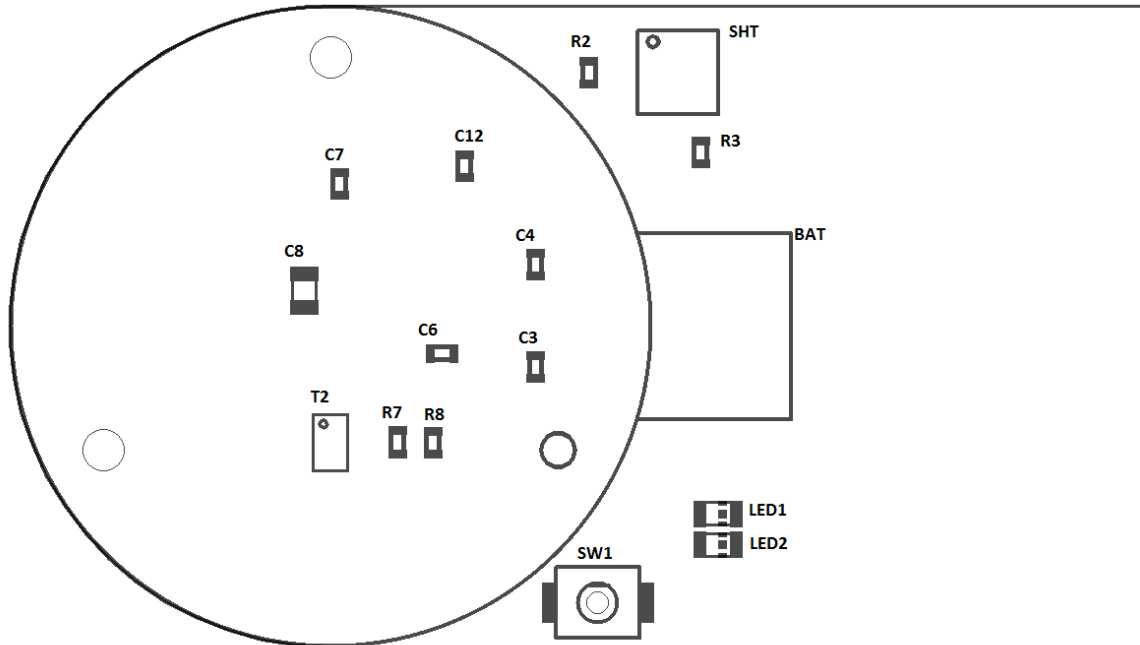
Příloha 3: Vodivý motiv - top



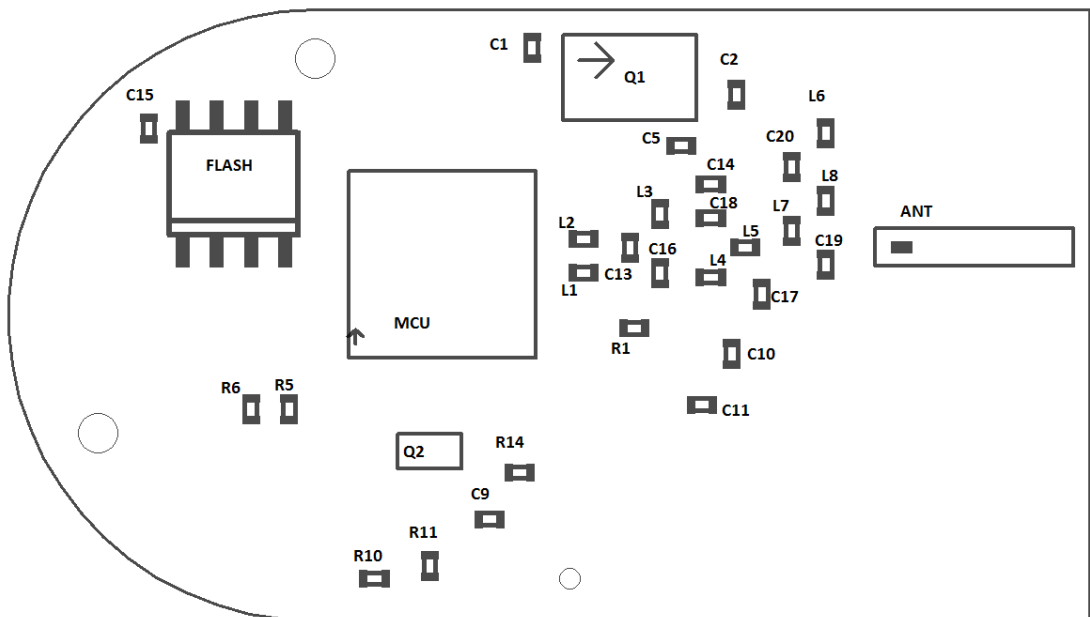
Příloha 4: Vodivý motiv- bottom



Příloha 5: Osazovací výkres – top



Příloha 6: Osazovací výkres – bottom



Příloha 7: CD/DVD

CD/DVD obsahuje následující položky:

- elektronickou verzi bakalářské práce
- schéma a návrh desky plošných spojů v programu EAGLE
- program zkompileovatelný v Code Composer Studio
- tabulku Datové pakety