

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SENSOR VLHKOSTI PŮDY A TEPLoty

SENSOR OF SOIL HUMIDITY AND OF TEMPERATURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Karásek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vladislav Škorpil, CSc.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**
Ústav telekomunikací

Student: Vojtěch Karásek

ID: 195586

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Sensor vlhkosti půdy a teploty

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte koncepci jednoduchého bateriově napájeného senzoru/měřiče relativní vlhkosti půdy a teploty okolí pomocí LoRa technologie. Sensor bude napájen bateriově a bude připojen buď přímo k vlastnímu LoRa přijímači, nebo do komunitní LoRaWAN sítě. Vyhodnocovací server bude reportovat emailem překročení mezních nastavených hodnot a umožňovat plynulý zápis naměřených hodnot do vhodné cloudové služby (příp. do vlastní databáze) s podrobným zpětným prohlížením hodnot a grafů. Při návrhu kladte důraz na přenositelnost zařízení, bezpečnost přenosu dat a dlouhou provozní dobu. Navržené řešení realizujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MANN, B. C pro mikrokontroléry, BEN, 2003. ISBN 80-7300-077-6

[2] KOSEK, J. PHP tvorba interaktivních internetových aplikací, Grada Publishing 1999, 492 stran, ISBN 80-716-373-1

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 27.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Vladislav Škorpil, CSc.

Konzultant: Ing. Ondřej Pavelka (Ademco CZ s.r.o.)

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
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 problematikou návrhu bateriově napájeného radiového senzoru vlhkosti půdy a teploty. V práci je popsána bezdrátová technologie LoRa, její základní principy, parametry přenosu a využití. Dále jsou popsány rozdílné typy senzorů vlhkosti půdy a teploty. V poslední řadě se řeší konkrétní návrh senzoru a základnové stanice.

KLÍČOVÁ SLOVA

LoRa, Chirp, DS18B20, RFM95, ESP32, ATmega328, Arduino, MQTT

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with subject of battery powered radio sensor measuring soil humidity and temperature. In thesis is described LoRa wireless technology, it's basic principles, parameters and usage. There are described different kinds of soil moisture and temperature sensors. Finally, a particular sensor and base station design is addressed.

KEYWORDS

LoRa, Chirp, DS18B20, RFM95, ESP32, ATmega328, Arduino, MQTT

KARÁSEK, Vojtěch. *Senzor vlhkosti půdy a teploty*. Brno, 2018, 53 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: doc. Ing. Vladislav Škorpil, CSc.

PROHLÁŠENÍ

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

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících 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.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Panu Ondřejovi Pavelkovi za ochotnou pomoc, konzultace a návrhy na zlepšení. Také děkuji mnohokrát Panu Ondřejovi Krajsovi za pomoc s praktickou částí a trpělivost, v neposlední řadě bych rád poděkoval vedoucímu práce Panu Vladislavovi Škorpilovi.

Brno

.....

podpis autora



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsaný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

podpis autora



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



Obsah

Úvod	12
1 Teoretická část práce	13
1.1 Úvod do internetu věcí	13
1.2 LoRa	14
1.3 Senzory	17
1.3.1 Senzory teploty	18
1.3.2 Senzory vlhkosti půdy	20
1.4 Mikrokontroléry	23
1.4.1 Arduino Uno	23
1.4.2 ESP32	24
2 Praktické testy	26
2.1 Měření vlhkosti	26
2.1.1 Test ponoření	26
2.2 Komunikace LoRa	29
2.2.1 Sběrnice SPI	30
2.2.2 Zapojení	30
2.2.3 Inicializace rádia a odeslání zprávy	31
3 Návrh	34
3.1 Koncepce	34
3.2 Použité komponenty	34
3.2.1 Senzor	34
3.2.2 Základnová stanice	36
3.3 Návrh plošného spoje	37
3.3.1 Senzor	38
3.3.2 Základnová stanice	39
3.4 Vytvoření přístrojové skříně	39
4 Oživení	42
4.1 Osazení a ladění	42
4.2 Ověření funkce	43
5 Závěr	45
Literatura	46
Seznam symbolů, veličin a zkratk	47

Seznam příloh	48
A Rozhraní Thingspeak	49
B Schéma zapojení senzoru	50
C Návrh DPS senzoru	51
D Schéma zapojení základnové stanice	52
E Návrh DPS základnové stanice	53

Seznam obrázků

1.1	Rostoucí signál Up-chirp v časové doméně	14
1.2	Klesající signál Down-chirp v časové doméně	15
1.3	Signál Up-chirp ve frekvenční doméně[1]	15
1.4	Srovnání různých rozprostíracích faktorů[1]	16
1.5	Zařazení LoRa technologie do současných radiových komunikací	18
1.6	Senzor teploty a vlhkosti DHT11	20
1.7	Odporový senzor vláhý	21
1.8	Kapacitní senzor vlhkosti	22
1.9	Klon Arduina Uno	24
1.10	ESP32	25
2.1	Test ponoření odporového čidla vláhý do vody	28
2.2	Test ponoření kapacitního čidla vláhý do vody	29
2.3	Radiové moduly LoRa HopeRF RFM95	31
3.1	Návrh v prostředí Fusion360	40
3.2	Detail vrchní části krabičky	41
4.1	Osazený senzor bez krytu a baterie	42
4.2	Osazený přijímač	43
4.3	Senzor při práci	44
A.1	Ukázka uživatelského webového rozhraní Thingspeak	49

Seznam tabulek

1.1	Parametry při různých módech přenosu, šířka kanálu 125 kHz	17
2.1	Zapojení RFM95	31
3.1	Přehled součástí senzoru	38
3.2	Přehled součástí Základnové stanice	39

Seznam výpisů

2.1	Inicializace LoRa vysílače a odesílání zprávy	32
2.2	Přijmutí zprávy	33

Úvod

V této bakalářské práci bude řešena problematika zařízení pro zaznamenávání veličin naměřených pomocí konkrétních typů senzorů, dále problematika bezdrátového spojení tohoto zařízení se základnovou stanicí pomocí nízkoenergetické radiové komunikaci na velkou vzdálenost LoRa. Výstup základnové stanice bude promítán na vybranou webovou službu, kde budou autonomně ukládány výsledky měření vzdáleného čidla.

Pro tento účel budou vybrány vhodné typy senzorů pro měření relativní vlhkosti půdy a okolní teploty, které budou testovány a použity v praktické části. Bude probrán alespoň základní princip radiové technologie LoRa a její praktické použití.

V praktické části bude prezentován vlastní návrh elektronického zařízení, které bude detailně popsáno a fyzicky zhotoveno.

1 Teoretická část práce

1.1 Úvod do internetu věcí

V dnešní době často slýcháváme o konceptu internetu věcí, který ve svém výsledku slibuje zlepšení kvalit našich každodenních životů. Je to vize o které se mluví jako o obrazu budoucnosti, například jedna taková vize je, že v domácnosti budeme mít chytrou lednici, která pozná jaké potraviny v ní jsou a dokáže nás upozornit jaké potraviny chybí a kde je můžeme nejlevněji nakoupit či dokonce si je objednat a donášková služba nám je rovnou dovoze domů.

Tento a podobné koncepty internetu věcí se však dnes dostávají do současnosti, takže na některé z nich nemusíme vůbec čekat, protože už jsou k dispozici, například když se chceme po práci stavět nakoupit nebo se někam najíst a bojíme se přelidněných prostorů, můžeme se podívat na službu, která nám řekne oblíbené časy místa, případně vypočítá maximální délku čekání nebo dokonce zjistí jestli je volné místo k parkování. Tak poznáme kolik lidí se na místě nachází nebo se bude později nacházet a my si na základě toho můžeme vybrat kam půjdeme. Ano, třeba takovou to informaci nám dnes běžně dává vyhledávač Google, ale odkud se tyto informace berou?

Tedy půjdeme na to od začátku, uvažujeme že obchodní centrum nebo restaurace je připojená na síť internet. Dále máme dvě možnosti, aby jsme mohli zjistit kýženou informaci. První je, že společnost má informační systém, ze kterého lze informace vyčíst, například rezervační systém restaurace. Tímto způsobem může tento software efektivně přispět do internetu věcí jako zdroj informací.

Druhý způsob je pro internet věcí typičtější, informace je zjištěna za pomoci prostředku jakým je senzor. Senzor je totiž prostředek, kterým zjišťujeme informaci neboli zprávu z reálného světa a to je pro internet věcí základ. Jinými slovy by se tento koncept dal nazvat „internet senzorů“, ale to by bylo moc omezující, protože internet věcí potřebuje další věci k jeho činnosti. Konkrétně potřebuje další věci, které musí být „chytré“, jak dneska označujeme spoustu elektrických zařízení (chytrý telefon, chytrá televize, chytrá lednice, . . .) a tímto označením máme na mysli to, že zařízení dokáží komunikovat mezi sebou například pomocí bezdrátových technologií. A právě komunikace je další základní prvek internetu věcí. Například kdyby jsme měli skupinu modulů měřících teplotu na úhoří a komunikační kanál mezi nimi a základnovou stanicí by blokovalo nevlídné počasí, tak tato skupina by nemohla přispívat měřenými informacemi do internetu věcí, tím pádem jejich smysl by byl velmi malý.

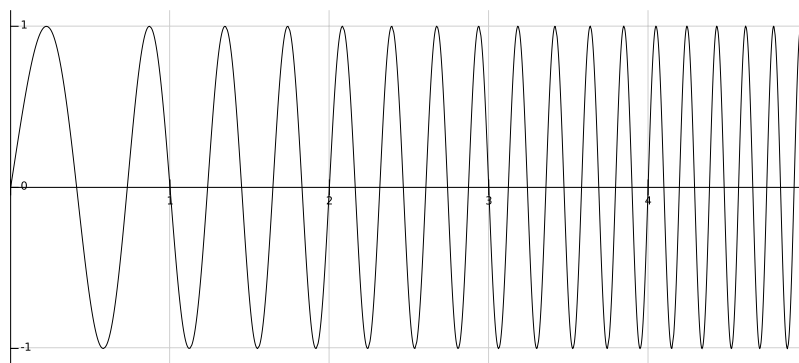
Když by jsme se vrátili k příkladu, kde si chceme udržovat informaci o tom kolik lidí je ve veřejném prostoru jako je obchodní centrum nebo restaurace a chtěli

bychom toho dosáhnout za pomoci senzorů, tak zjistíme, že realizace za pomoci jednoduchých čidel je obtížná. Za pomoci čidel by toho šlo dosáhnout, například kdyby každý nakupující či host měl RFID tag, který by zaznamenal RFID přijímač u vstupu do prostoru. Ale určitě tušíte, že tento přístup není aplikovatelný v tomto případě. Proto musíme tento způsob se senzory pro tuto aplikaci zavrhnout. Lepší možnost by byla, kdyby jsme použili způsob popsany výše, kde informaci vezmeme rovnou z informačního systému, to klade požadavek pouze na distribuci informace a kompatibilitu tohoto systému.

1.2 LoRa

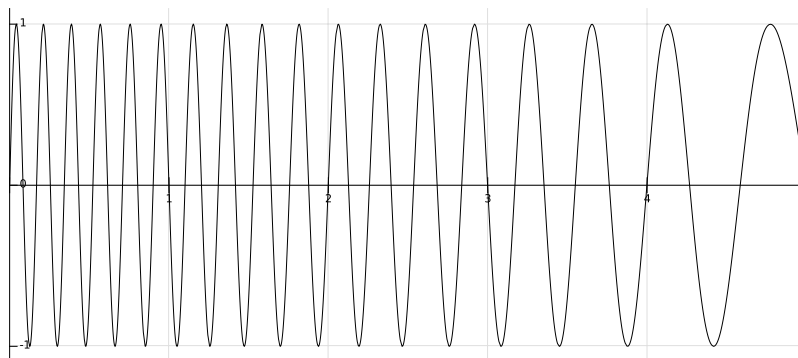
Technologie LoRa je navržena pro energeticky nenáročnou komunikaci se snadnou implementací. Název je odvozen ze slov dlouhý dosah (Long Range) a běžně se dosah technologie pohybuje okolo 2 km. Odesílaná informace se rozprostírá po celém kmitočtovém pásmu, to dělá odeslanou informaci robustní vůči okolnímu rušení a odposlouchání, díky tomu že signál s rozprostřeným spektrem má menší spektrální hustotu ve srovnání s úzkopásmovým signálem, signál je tak vysílán poblíž šumové hladiny.

Pro modulaci dat se používá modulace radarového pulsu Chirp (Compressed High Intensity Radar Puls). Modulovaný signál se skládá z jednotlivých Chirp pulsů. Jeden Chirp puls je signál harmonický se stálou amplitudou, měníci svoji frekvenci v čase. Frekvence je lineární funkcí času nebo případně exponenciální. Rozeznáváme signál s rostoucí frekvencí v čase (Up-chirp) a s klesající frekvencí v čase (Down-chirp), jsou to dva základní symboly datové komunikace.



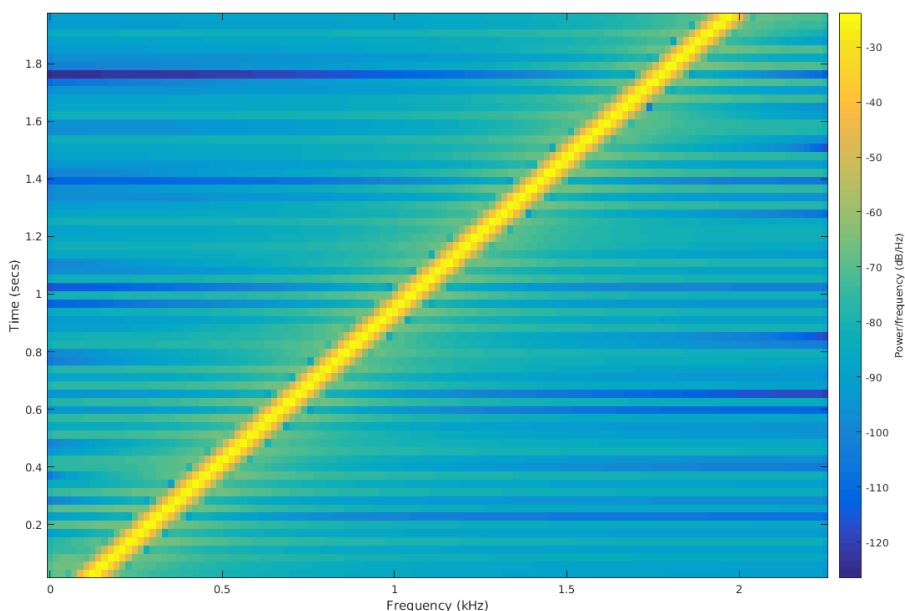
Obr. 1.1: Rostoucí signál Up-chirp v časové doméně

LoRa vysílá v nelicenčních pásmech a vysílací čas a výkon jsou omezeny. Komunikační moduly jsou distribuovány v různých verzích, každá verze má specificky naladěné anténní obvody, pro efektivní vysílání v určeném kmitočtovém pásmu. Jsou vybrána nelicenční pásma pro Evropu 868 MHz, pro Severní Ameriku 915 MHz



Obr. 1.2: Klesající signál Down-chirp v časové doméně

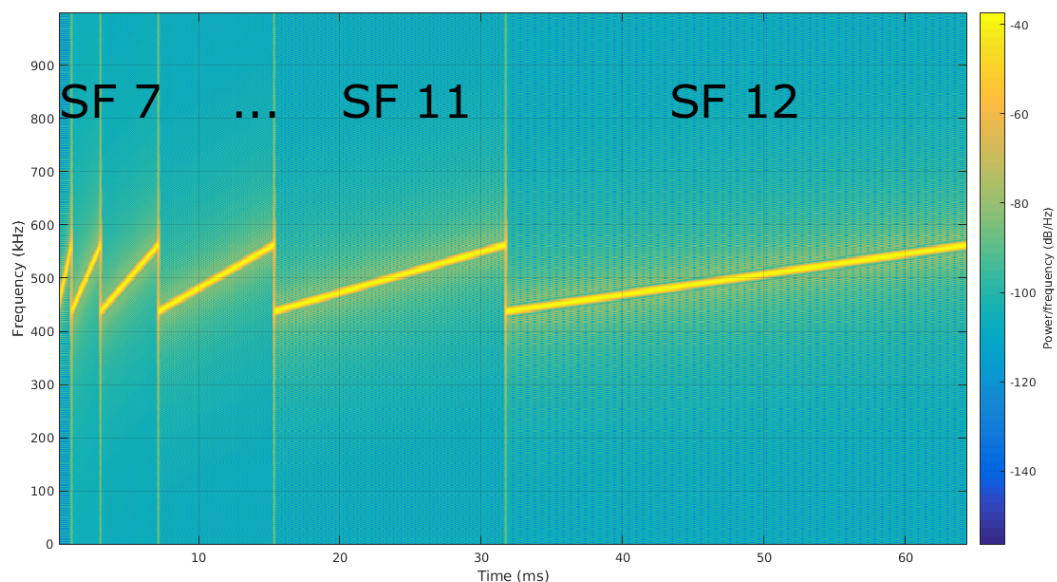
a pro Asii 433 MHz. Tyto kmitočty jsou jako příklad, na trhu se prodávají i méně časté varianty pro jiná nelicenční pásma.



Obr. 1.3: Signál Up-chirp ve frekvenční doméně[1]

Na obrázku 1.3 vidíme rostoucí Chirp puls v časové doméně a stejný puls je také zobrazen na obrázku 1.1, ale ve frekvenční doméně. Signál má své nastavitelné parametry, které ovlivňují přenos. První parametr je šířka pásma, po kterém se signál rozmítá z nízkých kmitočtů na vysoké (Up-chirp) nebo z vysokých kmitočtů na nízké (Down-chirp). Tímto rozmítáním pulsu se využije celá šířka přenosového kanálu, která je však omezena podle regulací pro různé geograficky oddělené regiony. Běžné šířky kanálů pro Evropu jsou 125 kHz a 250 kHz a pro Ameriku i 500 kHz. U větší šířky pásma je signál rozmítaný do větší šíře a dovoluje nám přenášet

větší objem dat, zatímco signál rozmítaný po užším kmitočtovém pásmu dovoluje přenášet pouze menší objem dat, jak si ještě ukážeme dále. Dalším parametrem je faktor rozprostření (Spreading Factor, SF). Tento parametr ovlivňuje časovou doménu signálu nebo konkrétněji udává, jak dlouho trvá jeden plný Chirp puls. Faktor rozprostření se dá nastavit od 7 do 12, kde každé navýšení o jedna impuls prodlouží na dvojnásobek a respektive snížení o jedna impuls zkrátí na polovinu. Na nejnižší faktor rozprostření, tedy faktor 7, připadá nejkratší doba vysílání impulsu a je tedy poloviční oproti faktoru 8 a až třiceti dvojnásobně kratší oproti faktoru 12, který je nejpomalejší. Je tedy jasné, že výhoda nízkého rozprostíracího faktoru je vysoká datová rychlost, protože stihneme odeslat více Chirp impulsů za jednu sekundu. Nevýhodou je, že krátké impulsy je těžší na přijímací straně dekodovat, a tak citlivost přijímače klesá.



Obr. 1.4: Srovnání různých rozprostíracích faktorů[1]

Zprávy LoRa mají standartní tvar, který je dodržován pro správnou funkci. Paket datové jednotky je tvořen preambulí, časovou synchronizací, daty a CRC kontrolním součtem. Preambule je tvořená osmi symboly Up-chirp a časová synchronizace dvěma signály down-chirp. Každá naslouchající stanice může zachytit symboly preambule a na základě toho zjistit, že v dosahu je přítomna vysílací stanice. Přijmutí dvou synchronizačních signálů Down-chirp je velmi důležité. Stanice díky nim rozpozná začátek paketu a od okamžiku příjmu dekoduje jednotlivé symboly komunikace.

Tab. 1.1: Parametry při různých módech přenosu, šířka kanálu 125 kHz

Faktor rozprostření	Trvání symbolu [ms]	Bitová rychlost [b/s]	Citlivost [dBm]
SF 12	682	293	-137
SF 11	365	537	-134,5
SF 10	204	976	-132
SF 9	113	1757	-129
SF 8	64	3125	-126
SF 7	36	5468	-123

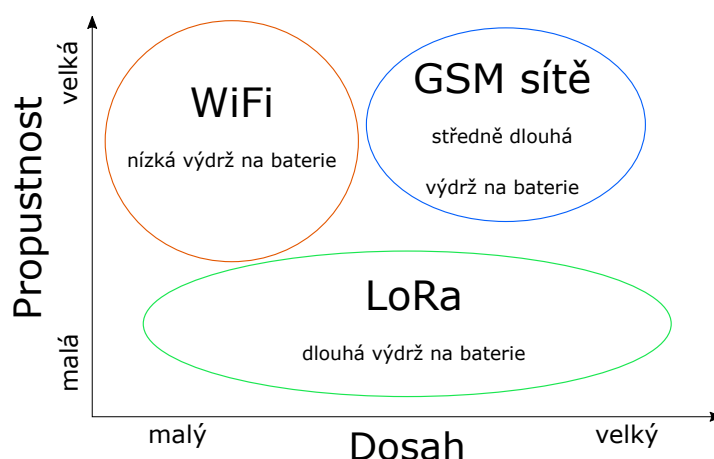
LoRa vs LoRaWAN

Technologie LoRa je vyvinuta společností Semtech. Byla vyvinuta jako technologie, která má zásobit trh internetu věcí nízkoenergetickými komunikačními moduly s nízkou datovou propustností. Často pro účel přenosu dat senzorů a komunikaci MQTT. Komunikaci lze využít jako komunikaci bod-bod nebo v komunitní síti LoRaWAN. LoRaWAN je síť typu LP-WAN (Low Power Wide Area Network) a skládá se z koncových bodů, které vnášejí do systému informace a přístupových bodů, které sbírají data od velkého množství koncových bodů a distribuují je serverům na internetu. Síť spravuje organizace LoRa Alliance a o sběr dat se z velké části starají mobilní operátoři. Pokud chceme připojit zařízení na LoRaWAN síť, musíme zaplatit poplatky za využívání infrastruktury a musíme splňovat podmínky pro komunikaci v dané síti, jako jsou parametry přenosu a maximální využití linky. Využitím linky je myšlena podmínka nepřekročení maximální doby vysílání v síti, udívaná v procentech (například 1 % z celkové doby).

1.3 Senzory

V této části se budeme zajímat jednoduchým rozdělením senzorů a zodpovíme si pár praktických rad pro tvorbu projektů jakým je tato práce. Senzor lze chápat jako převodník mezi podmětem vyjádřeným měřenou veličinou (snímanou) a výstupní veličinou (naměřenou). [2]

Každý senzor má svoji měřicí část a část linkovou. Měřicí část se stará o správný převod vlhkosti na použitelný signál. Poté část linková tento změřený signál přizpůsobí na výstupní napěťové úrovni, aby s nimi mohl pracovat vyhodnocovací obvod nebo MCU. Linková část senzoru může rovnou obsahovat napěťový komparátor, který má často otočný trimmer, kterým se dá měnit komparační úroveň. Díky tomu se dá nastavit, kdy čidlo sepne, například když bychom měli teplotní čidlo, které sepne při 25 °C, můžeme rozhodovací úroveň čidla posunout například na 20 °C nebo na



Obr. 1.5: Zařazení LoRa technologie do současných radiových komunikací

30 °C. Čidla s napěťovými komparátory mají kromě analogového výstupu i digitální výstup na kterém pozorujeme úroveň LOW a při překročení komparační úrovně pozorujeme úroveň HIGH (uvažujeme-li kladnou logiku). Vestavěný napěťový komparátor se tak může hodit pro kalibraci senzoru při koncové instalaci anebo může rapidně snížit složitost celého zařízení pro měření dané veličiny.

Mějme příklad jednoduchého senzoru s napěťovým komparátorem. Chceme měřit vláhu pokojové rostliny, napájení senzoru máme vyřešené pomocí síťového adaptéru =5 V. Pak stačí na digitální výstup senzoru zapojit LED diodu s ochranným rezistorem. Po úspěšném nastavení trimru do požadované polohy dioda svítí, když květina potřebuje zalít a zhasne po zalití. Přítomnost komparátoru tak zvyšuje soběstačnost a použitelnost senzoru.

1.3.1 Senzory teploty

Podíváme se napřed na principy práce základních teplotních senzorů a potom si projdeme konkrétní provedení senzorů, které můžeme najít na trhu. S teplotními senzory v elektrotechnice se můžeme setkat jako s termistory a rozumí se nimi součástky, které mají proměnný elektrický odpor v závislosti na okolní teplotě. Termistory mohou být vyrobeny z kovových i polovodičových materiálů. S rostoucí teplotou kovů, roste také jejich elektrický odpor, to je dáno tím, že rozkmit atomů se zvětšuje s teplotou a to způsobuje klesání střední doby mezi pružnými srážkami volných nosičů náboje s atomy krystalické mřížky kovu. Vedení elektrického proudu je tak ztíženo a odpor roste. Polovodičové senzory teploty rozdělujeme na termistory se záporným teplotním koeficientem NTC a senzory s kladným teplotním koeficientem PTC.

Při růstu teploty na NTC termistoru se uvolňují volné nosiče náboje z atomů krystalické mřížky a s větším počtem nosičů je možné přenést větší elektrický náboj, tím pádem odpor materiálu klesá. U PTC termistorů tento jev generace nosičů funguje také, ale převládá u tohoto typu efekt nárůstu pružných srážek nosičů jako u kovů, takže odpor od určité teploty prudce roste. [3]

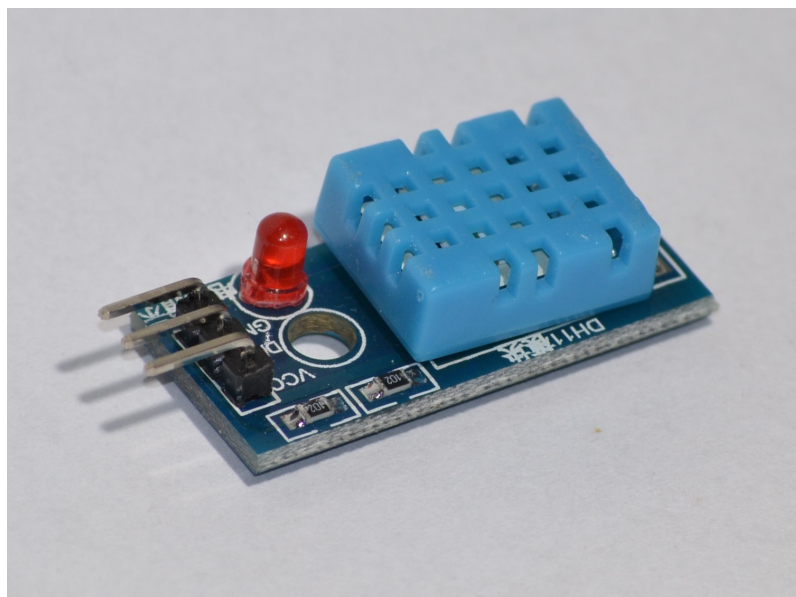
DHT11

Senzor DHT11 nabízí zajímavé kombinované řešení pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Komunikuje digitálně přes jedno-drátové obousměrné rozhraní a komunikaci na straně MCU, v našem případě Arduino, zajišťuje knihovna DHT. Rozsah měření teploty je od 0 °C do 50 °C s přesností ± 2 °C a rozsah měření relativní vlhkosti vzduchu od 20 % do 90 % s přesností ± 5 %. Výrobce Mouser uvádí ve svém katalogovém listu (i když výrobců tohoto senzoru je několik), že přesnost jednotky je dána kalibrací v laboratorních podmínkách, kde výsledkem kalibrace jsou kalibrační koeficienty uložené v paměti PROM čidla. Koeficienty se pak používají při měření jako reference a upravují naměřenou hodnotu, aby bylo dosaženo skutečné hodnoty bez většího počtu přepočtů.

DHT11 je v klidovém stavu s nízkou spotřebou energie, dokud nepřijme start signál, po rozpoznání start signálu odesílá synchronizační impuls, aby se MCU připravila na příjem zprávy. Poté je odeslána zpráva o délce 40 bitů, která je rozdělena na 8 bitů pro celé číslo teploty, 8 bitů pro desetinné číslo teploty a stejně tak 8 bitů pro celé číslo vlhkosti a 8 bitů pro desetinné číslo vlhkosti, posledních 8 bitů nese kontrolní součet zprávy. Po odeslání zprávy se čidlo přepne zpět do klidového stavu a čeká na příjem dalšího start signálu. Existuje ještě vylepšená verze čidla DHT22, ta se typicky rozlišuje bílou barvou plastového krytu oproti modré barvě u DHT11. DHT22 je také o něco větší a jeho přednost je zvětšený rozsah a vylepšená přesnost měření, to je -40 až 80 °C s přesností $\pm 0,5$ °C a 0 až 100 % relativní vlhkost s přesností ± 2 %. Za lepší přesnost a rozsah si ale připlatíme, DHT11 stojí v zahraničních obchodech okolo 25 korun a DHT22 okolo 70 korun českých.

DS18B20

Tento senzor od Maxim Integrated (dříve Dallas Semiconductor) je také digitální a také komunikuje po jednom vodiči, konkrétně po sběrnici 1-Wire. Jeho pouzdro je velmi malé, využívá totiž standardní pouzdro TO-92. Neměří však relativní vlhkost vzduchu. Jeho přesnost v teplotním rozsahu -10 °C až 85 °C je $\pm 0,5$ °C. Nabízí také až velmi jemné rozlišení a to si můžeme vybrat od 9 bitů do 12 bitů. Však čím větší rozlišení zvolíme, tím déle trvá měření. Je zapojen tzv. parazitním zapojením.



Obr. 1.6: Senzor teploty a vlhkosti DHT11

1.3.2 Senzory vlhkosti půdy

Zkoumání vlhkosti půdy je důležité pro obor agrikultury, abychom měli obsah vody v půdě pod kontrolou, protože správná vlhkost půdy má velký dopad na úrodu, která v půdě roste. Do květináčů a zahrad tak můžeme přidávat jednotky kontrolující vláhu a díky tomu můžeme ušetřit vodu, obzvláště v místech, kde je nedostatečná. Tyto jednotky mohou být jednoduchého principu například založeného na galvanickém článku s ručičkovým ukazatelem nebo i složitější měřiče využívající urychlených neutronů.

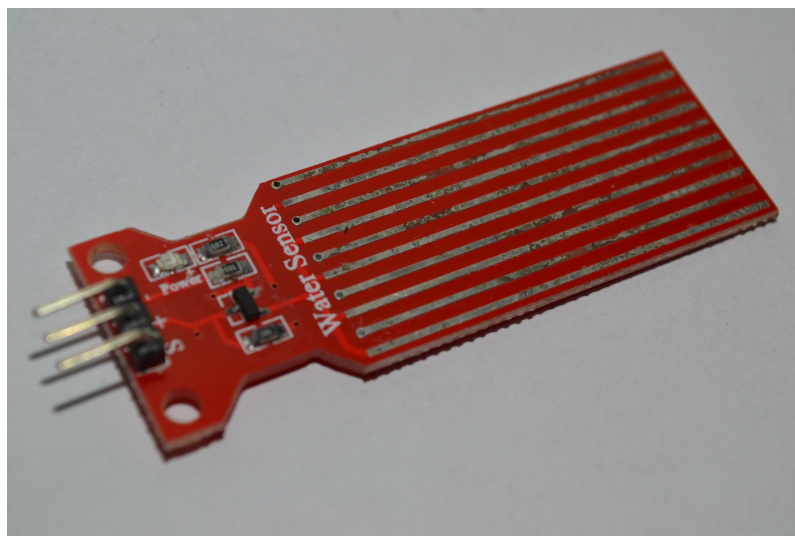
Měřením chceme zjistit obsah vody nacházející se v půdě a rozměr měřené veličiny je objem vody na objem půdy nebo váha vody na váhu půdy. Jeden z primitivních způsobů, jak toto zjistit, je použití gravimetrické metody. Ta spočívá v tom, že odebereme vzorek hlíny, ten zvážíme a poté vysušíme v peci. Po vysušení hlínu opět zvážíme a můžeme určit poměr vody v hlíně.

Odporové senzory

Odporové senzory využívají vodivost vody pro měření. Obecně suchá půda má menší vodivost, než mokrá půda, takže takovou to sondu můžeme popsat náhradním schématem proměnného rezistoru jehož odpor je závislý na objemu vody v substrátu ve kterém je umístěn. V anglické literatuře se můžeme setkat s pojmem humistor pro rezistor s takovou to závislostí. Se zvětšujícím se odporem se zvětšuje i úbytek napětí na humistoru, napětí potom porovnáváme nebo převádíme na číselnou hodnotu odpovídající vlhkosti půdy.

Odporové sondy pro měření vlhkosti půdy se zařazují mezi ty levnější provedení a mívají konstrukci z odhalených elektrod materiálu jako je hliník. Elektrody jsou v podobě hustě vyleptaných cest na desce plošných spojů nebo v lepším případě jsou to samostatné robustní elektrody s podobou vidlice.

Největší nevýhoda je právě v odhalených kontaktech senzorů, při uložení senzorů do vlhkého substrátu, jakým je hlína elektrody pozvolně korodují, a to i když jsou ze stejného materiálu. Vlhká hlína mezi elektrodami tvoří elektrolyt, který elektricky spojuje oba materiály a ty si tak vyměňují ionty, aby vyrovnali elektrický potenciál. Produktem chemického procesu jsou soli, které rozpouštějí kovy. Takže použitím takového senzoru nastavíme podmínky pro jev elektrolýzy a aktivní část senzoru se tak pozvolně rozpadá. Tento jev ještě urychlujeme přiváděním rozdílného potenciálu na elektrody a protékajícím proudem. Ve výsledku je tak velmi ovlivněna životnost rezistivního senzoru v provozu. Další nevýhoda je, že salinita půdy (slanost) ovlivňuje přesnost měření odporových senzorů, tento fakt by se měl brát v úvahu při kalibraci senzoru. Životnost senzoru se dá prodloužit, pokud jej napájíme pouze při intervalu měření, a ne konstantně po celou dobu. Na obrázku 1.7 lze vidět koroze a odpadávání plošných cest po zhruba měsíčním používání s trvalým napájením.



Obr. 1.7: Odporový senzor vláhý

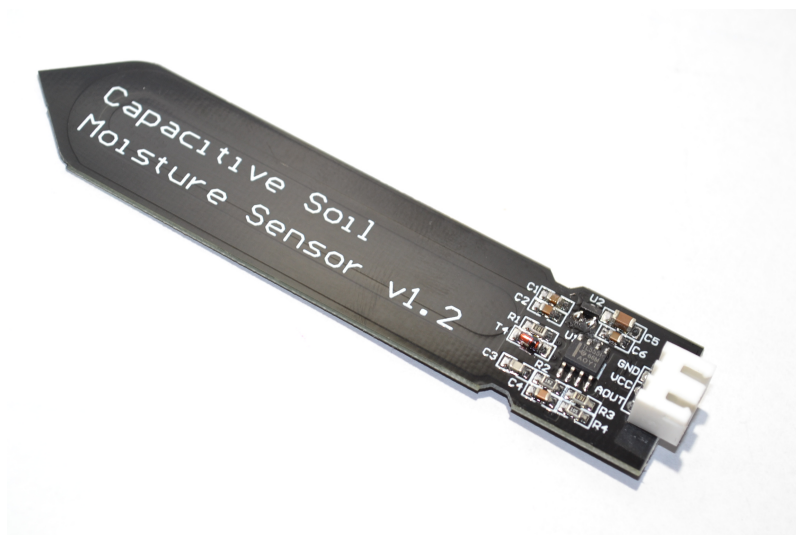
Kapacitní senzory

Kapacitní senzory využívají principu kondenzátoru. Desky kondenzátoru jsou uloženy na sondě v půdě, kde chceme měřit vláhu a dielektrikum kondenzátoru je samotná půda okolo sondy. Půda okolo sondy také určuje, jakou elektrickou kapacitu bude kondenzátor vykazovat. Kapacita deskového kondenzátoru se určí podle

vztahu

$$C = \epsilon \frac{S}{d}, \quad (1.1)$$

kde S je plocha desky, d je tloušťka dielektrika a ϵ je celková permitivita dielektrika. Plochy desek kondenzátoru jsou konstantní, tloušťka dielektrika také, takže kapacitu desek čidla může ovlivňovat jenom permitivita, tj. v tomto případě permitivita půdy. Permitivita složek půdy je značně menší (organická hmota: 4, minerální složky: 4, vzduch: 1), než permitivita vody (80), z toho můžeme vyvodit závěr, že kapacita desek čidla přímo koreluje s obsahem vody okolo čidla neboli kapacitor této konstrukce bude v suché hlíně vykazovat menší kapacitu nežli stejný kapacitor v mokré hlíně. Takto jsme vytvořili kapacitor s kapacitou úměrnou vlhkosti prostředí, v jakém se nachází. Ještě nám schází vyřešit, jak kapacitu převedeme na signál, který lze snáze vyhodnotit. V anglické literatuře se dočteme o kapacitních snímačích vlhkosti půdy



Obr. 1.8: Kapacitní senzor vlhkosti

jako o snímačích frekvenční domény (Frequency domain probes nebo FD-probes). [4] To je dáno tím, že kapacitu určenou z dielektrické konstanty půdy lze bez větších potíží převést na frekvenci. Z možných zapojení převodníků kapacita–frekvence lze použít obvody oscilátorů nebo klopné obvody (Schmittův klopný obvod), protože kapacitou lze měnit nimi produkováný signál. Konkrétně použijeme časovač 555, ten zjednodušeně používá nabíjení a vybíjení kapacity ke generování periodických pulsů. Zapojíme-li namísto klasického kondenzátoru kapacitu C půdního senzoru, obvod 555 bude generovat pulsy s periodou odpovídající vlhkosti půdy. Perioda signálu se určí vztahem

$$T = 0,693(R_A + R_B)C, \quad (1.2)$$

kde rezistory R_A a R_B nastavují střidu. Kmitočet vyjádříme vztahem

$$f = \frac{1,44}{(R_A + 2R_B)C}. \quad (1.3)$$

Frekvence na výstupu obvodu 555 je tedy nepřímo úměrná kapacitě C a převést ji můžeme převodníkem frekvence–napětí nebo ji můžeme přímo změřit pomocí MCU umožňujícího měření kmitočtu, třeba pomocí jednoho ze tří čítačů, které nabízí ATmega328p (Arduino).

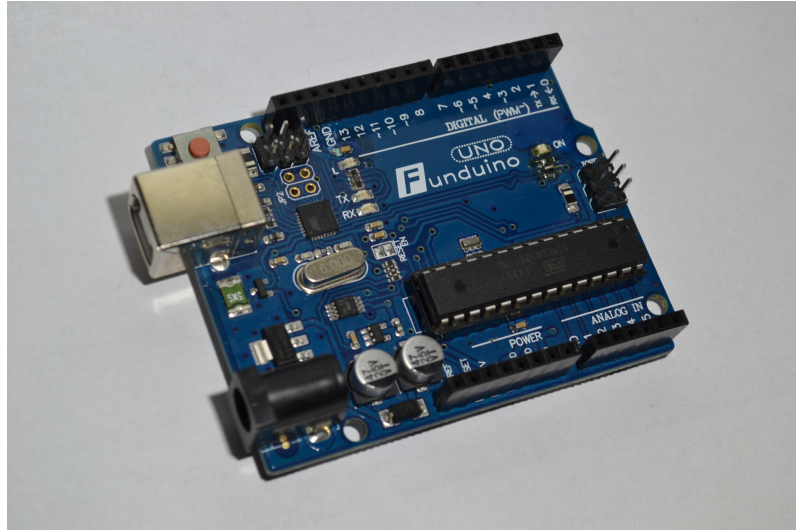
1.4 Mikrokontroléry

Mikrokontrolér nebo také ve zkratce MCU (Micro Controller Unit) je jednočipový počítač malých rozměrů, který je nasazen ve velkém množství aplikací pro řízení nejrůznějších systémů. Díky velké minimalizaci je možné vměstnat velké množství periférií na jeden malý čip, který dokáže velmi rychle provádět výpočty s nasbíranými daty ze vstupních jednotek. Je složen z procesorové jednotky s jedním či více jádry, operační paměti RAM, vyrovnávacích pamětí a dalších periférií jako jsou čítače, časovače, řadiče displejů, řadiče přerušení, A/D převodníků a mnoho dalších. . .

Univerzálním nástrojem MCU jsou jejich vstupně-výstupní jednotky nazývané GPIO (General Purpose Input Output), jsou to vývody čipu, které lze používat jako vstup nebo výstup v závislosti toho, co si vybereme. Mikrokontrolery můžeme najít na místech pro vyhodnocování dat ze senzorů, v nápojových automatech nebo v řídicích jednotkách dronů.

1.4.1 Arduino Uno

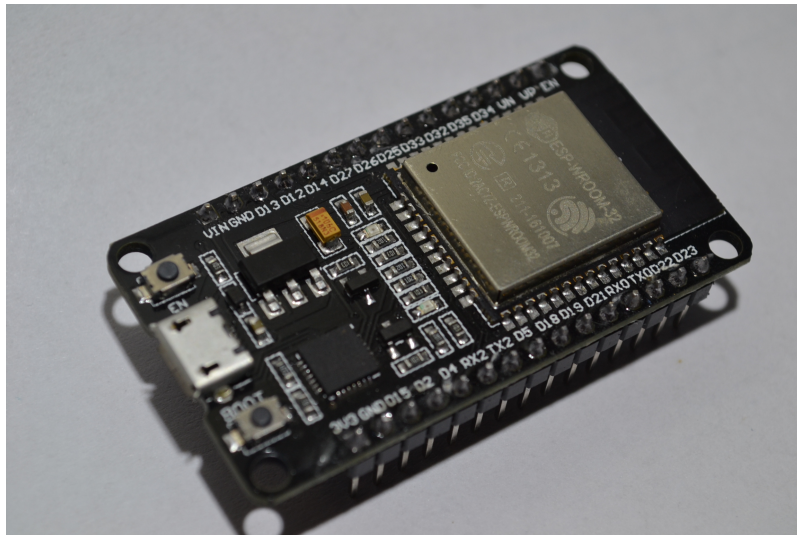
Arduino je vývojová platforma známá pro spoustu inženýrů, ale i kutilů a studentů technických škol. Úspěch této platformy je daný tím, že se u ní povedlo zkloubit velmi všestranný 8 bitový čip ATmega3258 od výrobce Atmel s vývojovou deskou, která poskytuje snadné připojení periférií do MCU bez potřeby pájení a také nabízí převodník pro komunikaci po USB sběrnici, aby byl zajištěno snadné programování. Čip je vyroben CMOS technologií a má pracovní napětí 5 V, frekvence čipu je určena externím krystalem a jeho maximum je 20 MHz, nejčastěji se používají krystaly 8 nebo 16 MHz. Programy se ukládají do FLASH paměti o velikosti 32 KB. Počet vstupně výstupních linek GPIO je 14. Na obrázku 1.9 je vidět klon Arduina Uno, oproti originálnímu kousku je rozdíl hlavně v ceně, jinak si můžeme všimnout, že tento klon nabízí patici PTH a ne SMD montáž pro ATmega 3258p, takže čipy lze snadno vyměňovat. To se hodí při vývoji zařízení na tomto čipu založených.



Obr. 1.9: Klon Arduina Uno

1.4.2 ESP32

ESP32 není takový průkopník jako Arduino, ale skýtá mnohé vylepšení oproti němu. Jeho přednost je osazený modem WiFi, díky kterému se dokáže MCU chovat jako stanice či vysílač ve WiFi sítích. Naměřené hodnoty ze senzorů tak nemusíme složitě dostávat na externí rozhraní displejů či komunikačních linek, ale stačí založit na samotném ESP32 webový server a hodnoty číst z něho, například na Vašem chytrém telefonu. Čip je následovník jednotky ESP8266 a oproti němu má vylepšené parametry a podporuje technologii BLE (Bluetooth low energy), oba čipy vyvinula společnost Espressif Systems. Nabízí až dvě výpočetní jádra o kmitočtu typicky až 160 MHz. Logika MCU pracuje s 3,3 V, ale na DPS je i vestavěný regulátor pro vstupní napětí 5 V. ESP32 umí využívat GPIO „piny“ pro digitální i analogovou komunikaci, naproti tomu Arduino má digitální a analogové vývody odděleně. Velikost paměti pro programy je 512 KB. Psát kód pro ESP32 je možné stejně jako pro Arduino v prostředí Arduino IDE. Jako drobnost navíc má ESP32 teplotní senzor, Hallovu sondu a funkci rozpoznání dotyku (touch sensor).



Obr. 1.10: ESP32

2 Praktické testy

2.1 Měření vlhkosti

2.1.1 Test ponoření

V tomto testu použijeme dva typy senzorů vláhly popsané v teoretické části a vystavíme je testu ponoření do vody. Přitom vyzkoušíme dva různé případy, kdy v prvním případě použijeme normální vodu a v druhém případě vodu s přídáním soli. Tímto jednoduchým testem zjistíme, jaká je závislost vlhkosti aplikované na senzory a výstupního napětí senzorů. Na základě toho můžeme určit jakým způsobem máme výstupní hodnoty senzorů prezentovat. Jestliže závislost vlhkosti na napětí senzoru bude lineární, bude i stupnice na výstupu lineární, pak stačí jenom vhodně upravit snímanou hodnotu vlhkosti na toužený výstupní rozsah, například 0 až 100 % a máme hotovo. Bude-li závislost vlhkosti senzoru na výstupní napětí nelineární, potom bude i výstupní stupnice ukazovat nelineárně. Drobnou nelinearitu bychom mohli ignorovat pro náš účel, větší nelinearitu můžeme upravit funkcí inverzní

k funkci nalezené.

Oba testované senzory jsou analogového principu a mají na výstupu stabilní stejnosměrné napětí. Odporový senzor má na sobě pull-down rezistor, který nastavuje nulové napětí na výstupu při suchých snímacích elektrodách. Z toho můžeme určit, že napětí poroste s přidáním vody. Úplným ponořením do vody zjistíme, jaké je jeho maximální napětí na výstupu. Kapacitní senzor používá o špetku složitější mechanismus s převodem kapacity jako vstupní veličiny na kmitočet jako výstupní. Pro zjednodušení implementace je na jeho výstupu RC článek, takže pulsy generované časovačem 555 jsou integrovány, a tak se nemusíme starat o převod z frekvence na napětí externě. Kdyby kapacitní senzor měl na výstupu veličinu s proměnným kmitočtem, tak bychom mohli kmitočet změřit přímo mikrokontrolérovou jednotkou, pomocí vestavěného čítače, kterých bývá v jednotce i více.

Částí tohoto testu bude zjistit, jaký vliv má slanost vody na měřená čidla. Voda s větším obsahem soli je bohatší na záporné i kladné ionty, které nesou elektrický proud, takže vodivost slaného prostřední je navýšena. To, jak asi tušíme, bude mít vliv na čidla s odporovým principem snímání vláhly, která neměří přímo objem vody v materiálu okolo senzoru, ale pouze dostává odhad o tomto objemu měřením vodivosti materiálu přímo doléhajícího na něj. Měřené hodnoty odporového čidla budou tedy přímo ovlivněny obsahem soli ve vodě. To ve výsledku bude znamenat, že při praktickém měření se zasazenými senzory v jiných půdách či polích, budou i naměřené hodnoty ovlivněny a pro stejný objem vody v půdě budou hodnoty vláhly jiné,

protože půdy budou mít jinou salinitu. V testu uvidíme, jak velký dopad to má na měřené hodnoty a navrhne úpravu ovlivněných hodnot.

Kapacitní čidlo neměří vodivost prostřední, ale kapacitu materiálu před a za snímacími elektrodami. Obsah vody v prostoru okolo čidla je úměrný výstupní kapacitě, a tak se dá říct, že čidlo měří přímo obsah vody v materiálu. Kapacita je přímo úměrná permitivitě prostředí, měření by tedy mohlo být ovlivněno odlišnou permitivitou slané vody oproti vodě neslané či odlišnou salinitou půdy. Podle zdroje [5] je salinita půdy nepřímo úměrná s obsahem vody v půdě. To znamená, že v suché půdě je více soli než v půdě na území s větším výskytem srážek, protože soli nejsou srážkami odplavovány. To by v praxi kapacitní senzory nemělo příliš ovlivňovat, protože i když bude mít hlína velký obsah soli, voda bude pořád stěžejní veličinou pro určení výstupu senzoru.

V testu se slanou vodou je použito 2,5 g/l soli, tento obsah soli podle zdroje [5] odpovídá slabě zasolené půdě. Pro představu, v půdě s tímto obsahem soli bychom nevyplodovali mrkev ani brambory.

Odporové čidlo

Na grafu 2.1 můžeme vidět závislost hloubky ponoření na výstupním napětí senzoru. Sensor má na délku 4 centimetry a postupujeme po půl centimetrech než je celá strana snímacích cest ponořena. Jako celek charakteristika může připomínat logaritmickou závislost (podobná té, co bývá u tranzistorů), ale ta to však není. Nejvyšší změnu pozorujeme, když suchý sensor namočíme, to je bod nespojitosti. Dále od tohoto bodu je charakteristika lineární a ke konci roste o něco pomaleji. Bod nelinearity se projeví, jenom pokud je sensor „na suchu“, tento stav není moc pravděpodobný a při jeho běžném využití nám tato nelinearita nevadí. Můžeme tedy říci, že odporové čidlo vláhy vykazuje lineární závislost. Napěťový rozsah výstupu čidla je od 0–3 V.

Z grafu je také zřejmé, že obsah soli ve vodě ovlivňuje měření odporových čidel. Nejvyšší rozdíl je 0,6 V a hodnoty jsou v průměru změněny o 0,3 V. To znamená, že pro toto konkrétní čidlo a salinitu 2,5 g/l bude pravá referenční hodnota v průměru o 0,3 V menší.

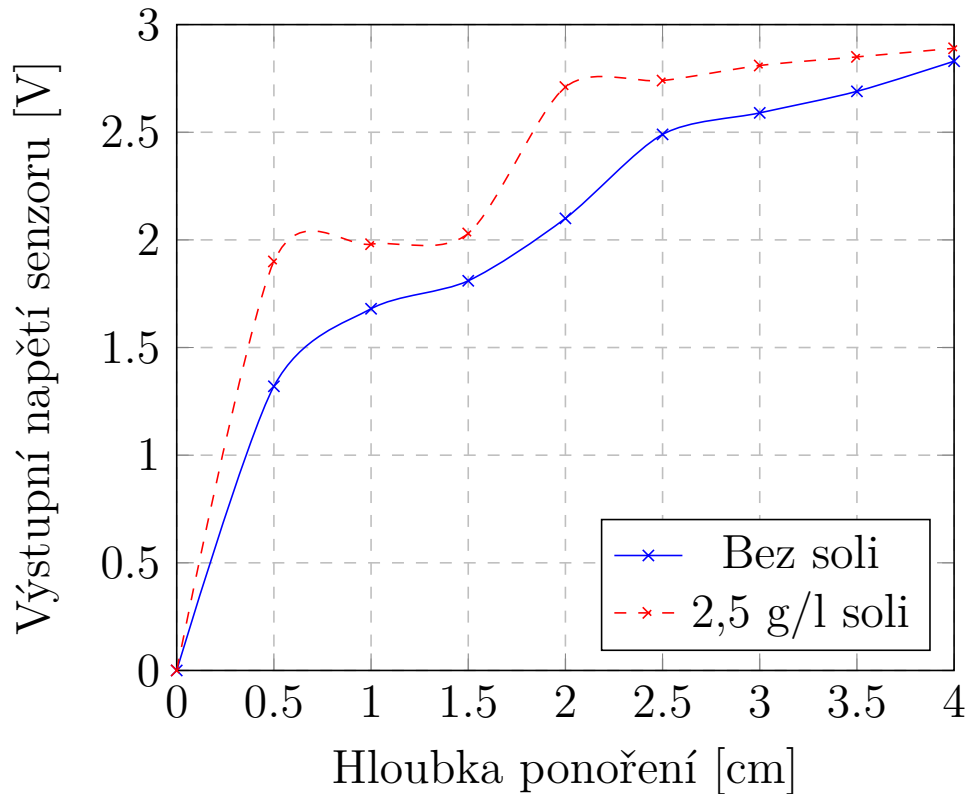
Jestliže známe průměrnou hodnotu chyby, můžeme měřenou hodnotu upravit.

$$U_u = U_x - AVG_{err}, \quad (2.1)$$

kde U_u je upravená hodnota, U_x naměřená hodnota a AVG_{err} je průměrná absolutní chyba. To je ale nepraktické, protože málokdy známe absolutní chybu měření v terénu. Pokud chceme odporovým čidlem měřit vláhu a neznáme odchylku od referenční hodnoty, ale známe salinitu půdy, můžeme změřenou hodnotu upravit tímto

Obr. 2.1: Test ponoření odporového čidla vláhý do vody

Závislost ponoření na napětí odporového čidla



způsobem.

$$U_u = U_x - (V_s * k), \quad (2.2)$$

kde V_s je objem soli ve vodě v g/l a k je kalibrační konstanta odporového čidla. Kalibrační konstanta odporového čidla je

$$k = \frac{AVG_{err}}{V_s}. \quad (2.3)$$

Tato konstanta kalibruje senzor pro hodnotu slanosti půdy V_s při kalibraci použitou. Při měření na půdě nebo roztoku, který byl použit pro kalibraci se konstanta vyruší a chyba měření způsobená salinitou půdy je nulová, salinita půdy je potom referenční.

Kapacitní čidlo

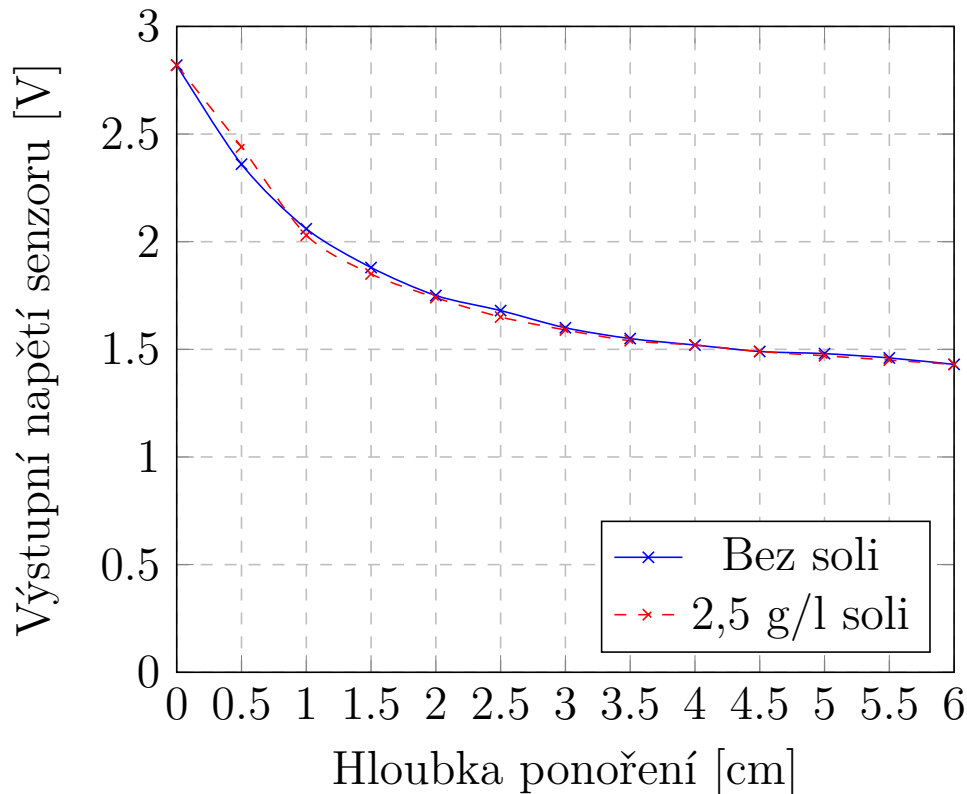
Závislost ponoření kapacitního čidla na výstupním napětí není lineární a není rostoucí jako u odporového čidla. Aby jsme hodnoty otočili a výstup byl přímo úměrný vstupu, použijeme tuto rovnici

$$U_{ind} = U_{max} - U_x, \quad (2.4)$$

kde U_{max} je maximální hodnota napětí na výstupu senzoru, U_x naměřená hodnota neúměrná vstupní veličině a U_{ind} je hodnota indikovaná, která je přímo úměrná vstupní veličině.

Obr. 2.2: Test ponoření kapacitního čidla vláhý do vody

Závislost ponoření na napětí kapacitního čidla



Na grafu 2.2 krásně vidíme, že slaná voda nemá vliv na měření kapacitního čidla oproti neslané vodě. Tím pádem můžeme vyvrátit to, že různě slaná půda bude měnit výsledky měření vláhý.

2.2 Komunikace LoRa

V této kapitole se podíváme jak je možné uskutečnit komunikaci po této radiové technologii s rozprostřeným spektrem.

Pro komunikaci s použitým radiovým modulem budeme využívat synchronní sběrnici SPI (Serial Peripheral Interface), nejprve si tedy ukážeme princip této čtyřdrátové sběrnice a její způsob zapojení.

2.2.1 Sběrnice SPI

U běžné sériové komunikace se potýkáme s dvěma linkami Tx a Rx pro odesílání a příjem po sobě jdoucích dat bit po bitu (v sérii za sebou). Zařízení tak mohou být ve spojení obousměrně a může probíhat komunikace. Aby v tom byl pořádek, oboje strany jsou dohodnuté na společné rychlosti (např. 9600 baudů), která musí být dodržena na obou stranách. Data mohou být odesílány nezávisle v obou směrech a v systému není kontrola nad tím, kdy jsou data odesílána. Potom říkáme, že oboje strany komunikují asynchronně, nezávisle na sobě. Jednotlivé odesílané bajty dosáhnou synchronizace vysílací strany a přijímací strany pomocí start bitů a stop bitů v každé zprávě.

V asynchronní komunikaci musí tedy být synchronizace vložena do stejného kanálu jako jsou užitečná data. To zvyšuje nadbytečnost a snižuje efektivitu přenosu. Tuto nevýhodu napravuje synchronní přenos, kde je synchronizace zajištěna hodinovým signálem na speciální lince zvlášť mimo přenosové linky. Tato linka se označuje CLK nebo SCK a přesný okamžik rozhodování je určen vzestupnou (raising) nebo sestupnou (falling) hranou. Hodinový signál generuje pouze jedna strana a ta je nazývána Master, ostatní zařízení na stejné lince jsou označovány jako Slave. Datové linky jsou zde pojmenovány podle směru přenosu MOSI (Master Out/Slave In) a MISO (Master In/Slave Out).

Poslední kontakt je SS (Slave Select) a pomocí něho se vybírá zařízení Slave určené ke komunikaci se zařízením Master. Vysoká úroveň na této lince znamená, že Slave zařízení není vybráno čili označuje neaktivní stav a Slave může spát. Naopak nízká úroveň označuje aktivní stav a komunikace probíhá. Při přítomnosti více zařízení Slave je zapotřebí linka SS pro každé zařízení Slave nebo může být využito zapojení Daisy-chain, kde si data ze zařízení Master řetězovitě předávají zařízení Slave navzájem. [6]

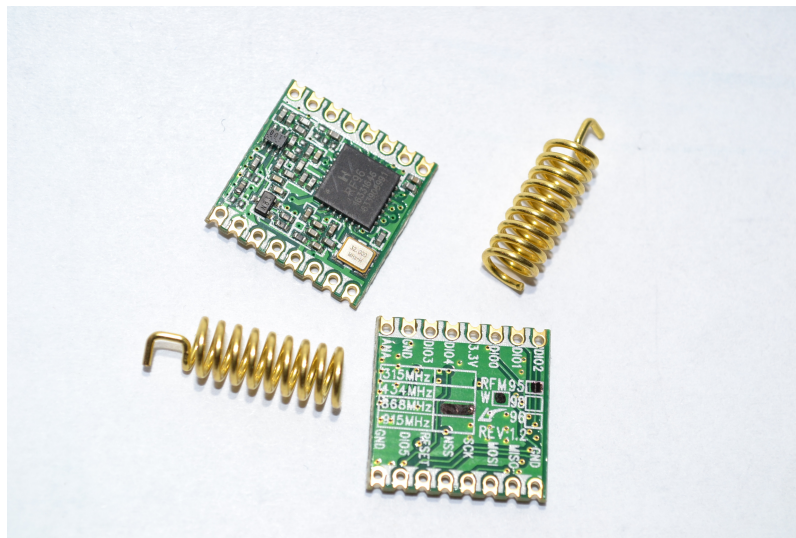
2.2.2 Zapojení

Při zapojování SPI zařízení musíme vědět jaké kontakty mikrokontrolérové jednotky odpovídají konkrétním kontaktům SPI sběrnice a ty souhlasně propojit s těmi na zařízení které chceme propojit. Zařízení Slave na sběrnici je jen jedno, takže jeden kontakt SS bude stačit. Zapojení je v tabulce 2.1 s respektem k označení kontaktů ATmega328 a odpovídajících kontaktů platformy Arduino.

Na modulu nalezneme pět vstupně-výstupních kontaktů (označené DIO), které jsou používány při komunikaci a lze je rozdílně mapovat přepsáním interního registru RegDioMapping1 a 2. V návrhu se využívá pin DIO0 pro přerušení.

speciální význam	ATmega328	Arduino pin		RFM95
přerušení č. 0	PD2	GPIO 2	...	DIO0
SS pin	PB2	GPIO 10	...	NSS
SCK pin	PD7	GPIO 13	...	SCK
MOSI pin	PB3	GPIO 11	...	MOSI
MISO pin	PB4	GPIO 12	...	MISO
	PB6	GPIO 9	...	RESET
		3,3 V	...	3,3 V
		GND	...	GND

Tab. 2.1: Zapojení RFM95



Obr. 2.3: Radiové moduly LoRa HopeRF RFM95

2.2.3 Inicializace rádia a odeslání zprávy

Při programování LoRa modemu můžeme použít rozšířené knihovny `RadioHead.h` jejímž autorem je Mike McCauley nebo stejnojmennou knihovnu `LoRa.h` od uživatele Sandeepmistry služby GitHub. Oboje knihovny nabízejí příznivý způsob pro ovládní různých LoRa modemů a podrobné nastavení parametrů komunikace. Zapojení je stejné při použití obou knihoven. Zde si ukážeme krátký program pro inicializaci LoRa modemu a odeslání zprávy každých pět sekund.

Výpis 2.1: Inicializace LoRa vysílače a odesílání zprávy

```

1  #include <SPI.h>
2  #include <LoRa.h>
3
4  #define ss 5
5  #define rst 14
6  #define dio0 2
7
8  void setup() {
9      Serial.begin(9600);
10
11     LoRa.setPins(ss, rst, dio0);
12     LoRa.setTxPower(20);
13     LoRa.setCodingRate4(5);
14     LoRa.setSpreadingFactor(12);
15     LoRa.setSignalBandwidth(125E3);
16     LoRa.setPreambleLength(8);
17
18     while (!LoRa.begin(868E6)) {
19         Serial.println(".");
20         delay(500);
21     }
22     LoRa.setSyncWord(0x78);
23     Serial.println("LoRa_inicializace_probekha_v_poradku!");
24 }
25 void loop() {
26     LoRa.beginPacket();
27     LoRa.write("Ahoj_svet!");
28     LoRa.endPacket();
29
30     delay(5000);
31 }

```

V kódu 2.1 je použita knihovna `LoRa.h` a také je nutné naimportovat standartní knihovnu `SPI.h` pro komunikaci s modulem. Na dalších řádcích definujeme kontakty `Slave select`, reset modemu a kontakt přerušení mikrokontroleru (Na Arduino je to pin 2). Ve funkci `setup()` inicializujeme modem a nastavíme parametry pro přenos dat. Níže jsou popsány možné parametry. [7]

setTxPower() Nastaví vysílací výkon v dB. Rozsah je od 2 do 20 dB. Výchozí hodnota je 17 dB.

setSpreadingFactor() Nastaví faktor rozprostření. Rozsah je od 6 do 12. Výchozí hodnota je 7.

setSignalBandwidth() Nastaví šířku radiového pásma. Rozsah je od 7,8 kHz do 250 kHz. Výchozí hodnota je 125 kHz. Zápís ve tvaru „E konvence“, např. 125E3.

setCodingRate4() Nastaví požadovaný kódový poměr. Podporované hodnoty jsou mezi 5 a 8 včetně odpovídající kódovým poměrům mezi 4/5 a 4/8 včetně. Při nastavení čísla 4 se žádný protichybový kód nepoužije.

setPreambleLength() Nastaví počet symbolů preamble na začátku zprávy. Rozsah je od 6 do 65535. Výchozí hodnota je 8.

setSyncWord() Nastaví synchronizační slovo rádia. Pokud chceme aby dvě stanice komunikovali spolu, toto slovo musí být stejné. Rozsah je od 0x00 do 0xFF. Výchozí hodnota je 0x12.

enableCrc(), disableCrc() Zapne nebo vypne interní cyklický redundantní součet modemu.

Jestli se nepodaří modem inicializovat, budou se na sériovou linku vypisovat pouze tečky.

V nekonečné smyčce `loop()` začneme paket a zapisujeme do něj data pomocí metody `write()` nebo `print()`. Data se odešlou po zadání příkazu `endPacket()`. Oba příkazy `beginPacket()` i `endPacket()` vracejí návratovou hodnotu 0 při chybě. Jak textovou zprávu přečíst ukazuje výpis kódu 2.2.

Výpis 2.2: Přijmutí zprávy

```
1 void loop() {
2   int velikost_paketu = LoRa.parsePacket();
3
4   if (velikost_paketu) {
5     Serial.print("Prijimam_paket_o_velikosti");
6     Serial.println(velikost_paketu + "B,zprava_je:");
7
8     while (LoRa.available()) {
9       Serial.print((char)LoRa.read());
10    }
11  }
12 }
```

Ve smyčce `loop()` se kontroluje jestli přišel paket příkazem `parsePacket()`, jestli ano, velikost paketu v bajtech se uloží do proměnné `velikost_paketu` a pokračuje se dále do podmínky. V podmínce se napřed vypíše velikost paketu a poté se vypíše obsah paketu bajt po bajtu ve formě ASCII znaků na jeden řádek.

3 Návrh

3.1 Koncepce

Hlavními požadavky pro senzor vlhkosti hlíny je malá velikost a dlouhá výdrž na jedno nabití. Pro měření vlhkosti půdy jsem vybral kapacitní čidlo popsané v kapitole 1.3.2 kvůli jeho dobré přesnosti a odolnosti vůči korozi měřících elektrod.

3.2 Použité komponenty

3.2.1 Senzor

Navržený senzor se skládá ze dvou desek plošných spojů a komponentů k nim připojených. První a hlavní DPS obsahuje napájení, řízení a komunikaci s okolním světem. Ve druhé DPS jsou elektrody pro měření vlhkosti půdy a podpůrné obvody pro měření. Tyto dvě funkce desek by mohli být spojeny i do jediné DPS v případě jiného návrhu.

Kapacitní čidlo vlhkosti hlíny

Použité čidlo je výrobek třetí strany a je běžně dostupné u velkého počtu online obchodníků a od něj se odvozuje velikost a tvar celého přístroje.

Kapacitní čidlo je ve svém základě citlivé na permitivitu prostředí v okolí měřících elektrod, kterou převádí na kapacitu, nadále kapacita je pomocí obvodu 555 na senzoru převedena na kmitočet a kmitočet je pomocí jednoduchého integračního článku převeden na napětí.

Čidlo je šípovitého tvaru a na zadní ploché straně má kontakty pro připojení napájení a analogový výstup 0-VDD. Při návrhu hlavní DPS byl uvažován tvar čidla, konkrétně jeho šířka.

Teploměr

Jako teploměr pro měření okolní teploty je vybrán Maxim DS18B20 s přesností na půl stupně. Komunikuje po digitální sběrnici 1-Wire a nabízí přesnost $\pm 0,5$ °C. V jeho malém pouzdře TO-92 a s jeho nízkou cenou je to ideální kus.

Mikro počítač

Jako řídicí mikrokontrolérová jednotka byl použit známý 8bitový čip společnosti Atmel ATmega328. Oproti verzi stejného čipu v pouzdře PDIP použité na vývojové

desce Arduino Uno, byla použita menší varianta pro plošnou montáž v pouzdře TQFP.

Napájení

Obvod je napájen z Li-Ion baterie typu 18650 kulatého tvaru s nominálním napětím 3,7 V, která by měla poskytnout dlouhou provozní dobu díky kapacitě 2100 mAh. Baterie je nabíjena nabíjecím obvodem od Texas Instruments BQ25601 se spínaným regulátorem s integrovaným spínačem. Obvod reguluje vstupní napětí o velikosti 5 V ze vstupního konektoru micro USB a řídí nabíjecí cykly pro nabíjení baterie. Podporuje nabíjecí proud až 3 A a nabízí sběrnici I²C pro komunikaci s napájeným systémem, například pro sdělení úrovně nabití baterie. Nabíjecí obvod je v moderním SMD pouzdře QFN bez nožiček.

Baterie nabízí elektrický potenciál mezi kladnou a zápornou elektrodou 3 až 4,2 voltů podle úrovně nabití. Tento rozsah napětí je přijatelný pro většinu součástek na desce, ale ne pro použitý LoRa modul, ten má pracovní napětí podle katalogového listu 1,8-3,7 V a absolutní maximum 3,9 V. Proto je napětí baterie regulováno lineárním regulátorem s nízkým úbytkem napětí mezi vstupem a výstupem (LDO), konkrétně MCP 1700 s nízkým klidovým proudem a úbytkem napětí pouze 178 mV. Díky LDO regulátoru bude na výstupu vždy fixní napětí 3,3 V anebo nižší, pokud napětí baterie klesne pod 3,478 V.

Napájení bylo rozděleno na dvě větve VCCIO a +3V3. Větev VCCIO je napájena vždy a je k ní připojena mikrokontrolérová jednotka a ICSP hlavička. Druhá větev +3V3 je oddělena od napájení spínacím tranzistorem, a to kvůli řízení spotřeby energie. Jsou k ní připojeny senzory a komunikace, která není potřeba napájet pořád. Konkrétně senzor vlhkosti hlíny, teploměr a LoRa modul. V návrhu byl použit MOSFET tranzistor s P kanálem NTR1P02 v pouzdře SOT-23. Výhoda oproti použití tranzistoru PNP je nízký odpor kanálu v otevřeném stavu čímž eliminujeme ztráty. Hradlo tranzistoru G je připojeno k mikrokontroléru pro ovládání, nízká úroveň tranzistor otevře a respektive vysoká úroveň na hradle G tranzistor uzavře. To přijde vhod, když výstupy mikrokontroléru ještě nejsou nastavené, potom bude tedy tranzistor otevřený a napájení bude propagováno.

Komunikace

Senzor pro energeticky nenáročnou komunikaci se základnovou stanicí nebo sítí LPWAN využívá modul RFM95 s čipem RF95 od společnosti HopeRF který vyšel z čipu SX1276 od společnosti Semtech. Modul je určen pro Evropské radiové bezlicenční pásmo 868 MHz, lze ho používat i pro jiná radiová pásma (433 MHz, 915 MHz), ale pro ty nemá modul naladěné radiové obvody, tudíž nemá tak velký

zisk jiných pásmech. Jak bylo dříve zmíněno, modul se napájí 3,3 volty, a tudíž není kompatibilní například s vývojovou platformou Arduino Uno bez převodníku úrovní. Komunikace s mikrokontrolérem je zajištěna synchronní sběrnicí SPI tzn. pomocí kontaktů MISO, MOSI, SCK a SS. Z modulu je vyveden konektor na anténu malého formátu U.FL, abychom dosáhli vyššího zisku signálu použitím externí antény.

Aby bylo možné senzor jednoduše přeprogramovat, například pomocí Arduino IDE, je na desce senzoru osazen USB-UART převodník CP2102 od Silicon Labs. Čip je v malém pouzdře QFN s 24 kontakty a je napájen přímo z USB portu díky integrovanému regulátoru na jeho interní napětí 3,3 V, tím pádem nebude napájen při provozu na baterii. Jeho výstup DTR zajistí automatický restart mikrokontroléru při nahrávání kódu.

Pro zavedení zavaděče (ang. bootloader) do 32 kB Flash paměti ATmega328 jsou na senzoru vyvedeny kontakty pro ICSP hlavičku. Pomocí programátoru a softwaru jako je AVR Studio tak lze provést první naprogramování nutné pro další programování skrze sériovou linku.

3.2.2 Základnová stanice

Základnová stanice slouží jako LoRa přístupová brána pro jeden či více senzorů. Jejím hlavním úkolem je přijatá data publikovat na MQTT server na internetu, aby bylo možné sledovat čtení senzorů odkudkoliv.

Na stanici se také bude nacházet RGB LED dioda pro zpětnou vazbu uživateli. Modrá barva bude znamenat, že senzor, který jako poslední komunikoval se základnovou stanicí změřil vlhkou hlínu. S menší naměřenou vlhkostí bude barva přecházet přes zelenou (hlína je vlhká akorát) po červenou barvu (záhonek potřebuje zalít), tak bude mít uživatel představu o jeho záhoncích, aniž by se musel dívat na webovou službu.

Mikropočítač

Při výběru řídicí jednotky základnové stanice je zásadní připojení k internetu a dostatečný výkon pro vytváření HTTP či HTTPS žádostí. Proto je použit rozšířený čip Espressif ESP32 s dostatkem výkonu i paměti a podporou standardu IEEE 802.11n. Konkrétně je v návrhu použit modul ESP32-WROOM-32 s anténou na tištěném spoji. Při instalaci v hliníkové krabičce lze i použít verze ESP32-WROOM-32U s konektorem U.FL pro vyvedení externí antény pro lepší signál.

Napájení

Stanice je napájena z micro USB konektoru a o stabilní napětí pro napájecí síť 3,3 V se stará spínaný regulátor Texas Instruments TPS561201 s integrovaným spínačem a zatížitelností až 1 A. Je v pouzdře SOT-23 a k provozu potřebuje jen nízký počet součástek.

Komunikace

Základnová stanice používá stejný LoRa modul jako senzor, takže HopeRF RFM95. Z anténního kontaktu je vyvedena krátká cesta k rohovému SMA konektoru pro připojení antény.

Pro programování ESP přes USB port je zde také USB-UART převodník Silicon Labs CP2102. Protože postup pro nahrávání kódu na ESP je jiný než pro čipy ATmega, je zde i přítomen hardware navíc. Pro nahrání bajtkódu je nutné, aby ESP bylo v režimu sériového zavaděče. Do tohoto režimu jej dostaneme uzemněním GPIO 0 kontaktu, proto na desce v návrhu je přítomno tlačítko s tímto účelem a také tlačítko uzemňující terminál EN pro restartování jednotky. Pro usnadnění programování mikrokontroleru, je na desce tranzistorové pole s dvěma NPN tranzistory zajišťujícími uzemnění kontaktů GPIO 0 a EN ve správném pořadí automaticky při nahrávání kódu, díky výstupům DTR a RTS z převodníku CP2102.

Pro účely funkce programování In-system programming (ISP) jsou na desce vyvedeny kontakty pro ICSP hlavičku. Navíc jsou na desce také vyvedeny kontakty pro montáž dutinkové lišty s kontakty napájení a tří GPIO portů.

3.3 Návrh plošného spoje

Při konstrukci obou zařízení byl využit software pro návrh plošných spojů Eagle.

Schémata zapojení i návrhy DPS senzoru a základnové stanice naleznete v příloze B, C, D a E.

Na DPS senzoru i základnové stanice jsou součástky s pouzdry QFN. Tento typ pouzdra je velmi malý (4x4 mm) a nemá žádné nožičky, pouze obnažené kontakty ze spodní strany a z boku. Při návrhu plošného spoje je nutné myslet na jejich chlazení. Aby bylo možné spojit zemní plochu DPS se zemní plochou součástky, je nutné udělat prokovy pod takovou součástkou. Při osazování se prokovy vyplní cínem pro vyplnění volných míst a tím lepší odvod tepla.

Označení na desce	Hodnota	ks	Pouzdro
ANT		1	U.FL
ATmega328P		1	TQFP32
BQ25601		1	QFN24
C1, C2	22p	2	C-EUC0402
C3	1u	1	C-EUC0402
C4	1u	1	C-EUC0603
C5, C8, C9	10u	3	C-EUC0603
C6	4u7	1	C-EUC0603
C7	47n	1	C-EUC0603
CP2102		1	QFN24
ICSP		1	CONN_03X2FEMALE
L1	1u	1	L1812
MCP1700_LDO		1	SOT23-3
MOSFET-P		1	SOT23-3
R1, R3, R4, R7, R8, R9, R10	10k	7	R-EU_R0402
R11	10k	1	R-EU_R0603
R12	100k	1	R-EU_R0402
R2	4k7	1	R-EU_R0402
R5	1k	1	R-EU_R0603
RFM95	868MHz	1	
USB		1	MICRO_B
XTAL	16MHz	1	ABM8
ZD	5V1	1	SOD123

Tab. 3.1: Přehled součástek senzoru

3.3.1 Senzor

Deska plošného spoje senzoru je na jedné straně o něco méně obsazená, toto místo je určeno pro kapacitní čidlo vlhkosti hlíny, které bude na místě držet pomocí dvou šroubů. Na desce bude taky díra jako průchodka pro pigtail konektor vedle LoRa modulu pro montáž externí antény.

Velikost desky je 8,2x2,2 cm. Všechny součástky až na micro USB konektor se nacházejí na horní straně DPS. Na spodní straně však taky nalezneme kontakty pro baterii, která se bude na této straně nacházet. Její propojení bude realizováno dvěma dráty na obou stranách připájených.

Označení na desce	Hodnota	ks	Pouzdro
BOOT, RESET		2	BUTTON_EDGE
C1	1u	1	C-EUC0402
C2, C4	10u	2	C-EUC1206
C3, C6	100n	2	C-EUC1206
C5, C7	22u	2	C-EUC1206
CP2102		1	QFN24
ESP-WROOM-32		1	
ICSP		1	CONN_03X2FEMALE
IO		1	CONN_05
L1	3u3	1	L1812
LED_RGB		1	5MM
MBT3904DW1		1	SC70-6
R1, R2, R4	470	3	R-EU_R0402
R10	33k	1	R-EU_R1206
R11	10k	1	R-EU_R1206
R3, R5, R8, R9, R12	10k	5	R-EU_R0402
RFM95	868MHz	1	
SMA		2	SMA_EDGE
TPS561201		1	SOT23-6
USB		1	MICRO_B

Tab. 3.2: Přehled součástek Základnové stanice

3.3.2 Základnová stanice

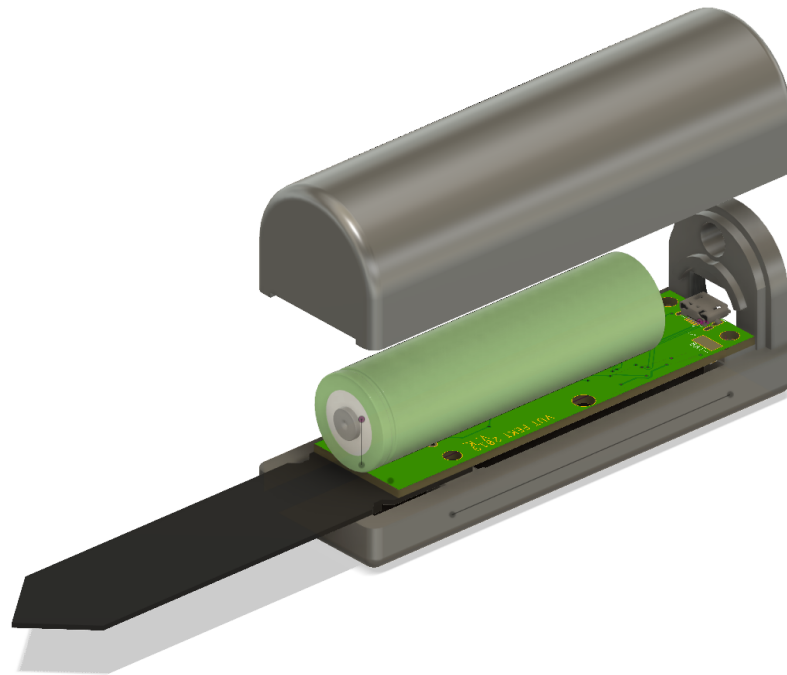
Velikost DPS je 8x6 cm, a i v tomto návrhu základnové stanice jsou téměř všechny součástky SMD typu až na pár výjimek jako je RGB dioda a vývody pro připájení dutinkové lišty. Stejně jako na senzoru je zde řešeno chlazení QFN pouzdra USB převodníku a také stejným způsobem chlazení ESP32-WROOM32 modulu.

Tištěný spoj je navržen do krabičky Hammond U-HA1455B802 s plastovými čely na protilehlých bočních stranách. Na těchto stranách budou přístupné dvě tlačítka, USB konektor pro napájení a komunikaci, dva SMA konektory pro WiFi a LoRu a RGB LED dioda pro zpětnou vazbu uživateli.

3.4 Vytvoření přístrojové skříně

Pro senzor vlhkosti hlíny byla navržena a vytisknuta krabička pomocí 3D tisku. Velikostně krabička opisuje desku plošného spoje, její součástky a baterii typu 18650.

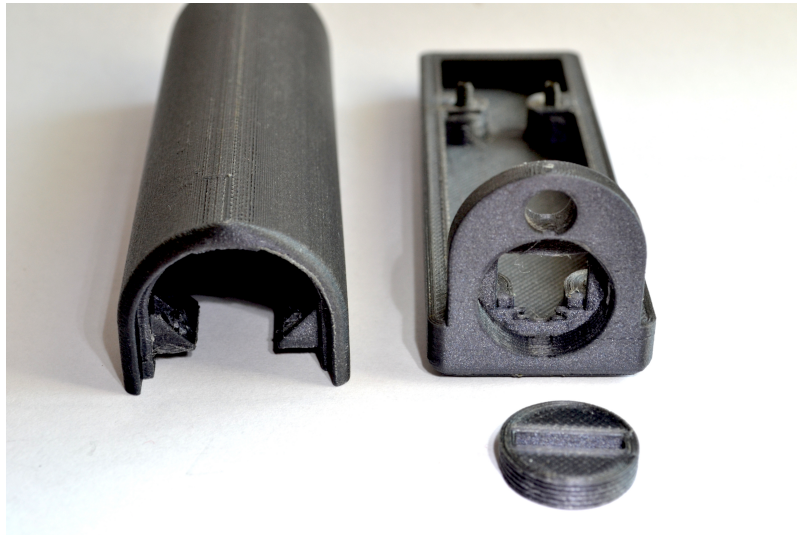
Pro tisk byl použit karbonový filament, ale jiné materiály jsou také doporučeny. Návrh byl vytvořen v programu Fusion360 od společnosti Autodesk. Deska plošných spojů byla přenesena i se součástkami na ní z programu Eagle.



Obr. 3.1: Návrh v prostředí Fusion360

Přístrojová skříň je dvoudílná a k uchycení včetně DPS slouží čtyři pravotočivé závity metrického standardu ISO M2.5. Závit a šachta pro vedení šroubu má délku dohromady 7,6 mm, šrouby o délce 8 mm jsou doporučeny. Tloušťka krabičky je 4 mm ze všech stran a stěny krabičky není nutné plně vyplnit při tisku, stačí menší hustota filamentu. Při používání je nutné mít demontovanou ICSP hlavičku kvůli hloubce krabičky.

Před používáním skříňky doporučuji nanést tekuté silikonové těsnění nebo silikonový tmel na doléhající místa dílů pro vodotěsnost. Z krabičky tak pouze přesahuje šípovitý senzor vlhkosti hlíny. Skříňka obsahuje dva otvory z vrchní části, menší je určen pro našroubování SMA konektoru pro anténu LoRa vysílače a větší otvor obsahuje závit do kterého se šroubuje protikus pomocí mince, tak otvor tvoří šachtu na jejíž konci je přístupný USB konektor pro nabíjení baterie a komunikaci se senzorem. Detail této části je na obrázku 3.2.

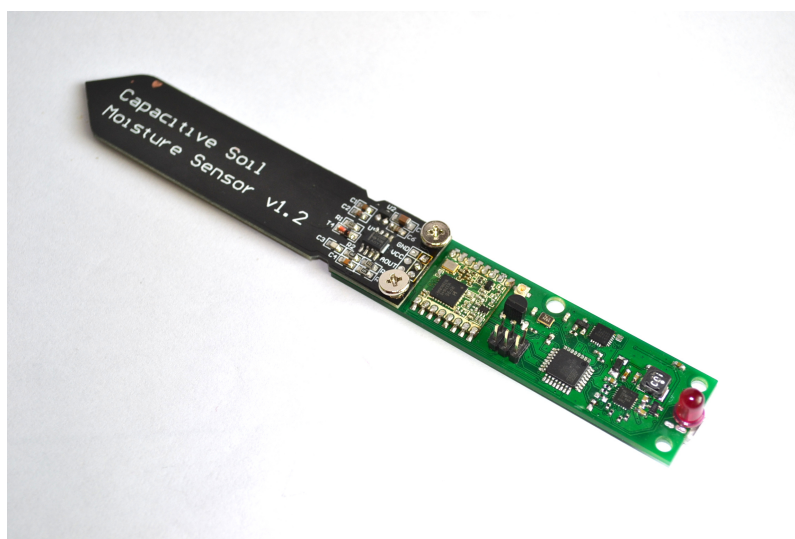


Obr. 3.2: Detail vrchní části krabičky

4 Oživení

4.1 Osazení a ladění

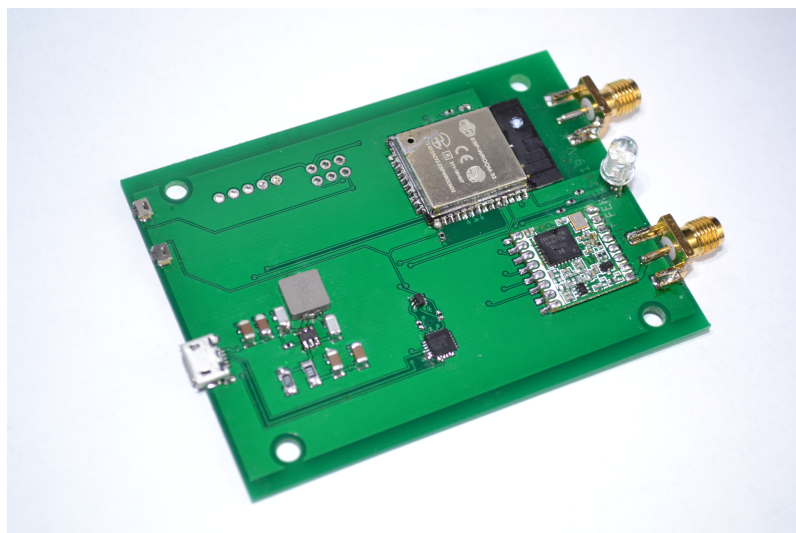
Desky plošných spojů byly vyrobeny profesionálně službou PCBWay. Osazeny byly ručně SMD součástkami i součástkami vývodovými. Nejprve byly osazeny a otestovány spínané regulátory, a to připojením na laboratorní zdroj s napětím 3,7 a 5 V. Postupným zvyšováním proudové limitace laboratorního zdroje proběhl test oživení. Pokud nebyly nalezeny žádné zkratky, byl osazen i zbytek desky a test oživení se zopakoval.



Obr. 4.1: Osazený senzor bez krytu a baterie

Při oživování zařízení byla nalezena chyba návrhu v zapojení napájení USB-UART převodníku na obou deskách. Kvůli této komplikaci docházelo ke zkratu v napájecí cestě. Chybu se podařilo odstranit přerušením tištěného spoje skalpelem a propojením dvou sousedních kontaktů převodníku (VBUS a VREGIN). Opravené schémata desek byly vloženy do přílohy této práce.

Nejvíce úsilí při osazování bylo vynaloženo při pájení QFN pouzder. Postup byl následující. Nejprve byla jemně pocínována velká zemnicí plocha uprostřed. Poté se součástka uchytila jednou ploškou tak, aby umístění ostatních plošek bylo přesné. Po přidání tavidla se pájecím hrotem s kuličkou cínu přejeli všechny strany čipu, a tak se plošky prohráli a pevně elektricky a mechanicky spojili. Výsledek přepájení byl kontrolován pod lupou. Nakonec se součástka přichytila zemnicí plochou, a to nahřátím z druhé strany DPS také s pomocí tavidla a cínu. Tak byl zajištěn dobrý přenos tepla mezi součástkou a zemnicí plochou desky.



Obr. 4.2: Osazený přijímač

4.2 Ověření funkce

Po osazení senzoru je třeba nahrát zavaděč do paměti Flash, aby bylo možné senzor přeprogramovat pomocí sériové linky přes USB rozhraní. Poté můžeme nahrát odpovídající programy pro senzor a pro základnovou stanici. Oboje stanice musí mít nastavené stejné synchronizační slovo pro LoRa komunikaci. Na základnové stanici musí být zadány správné iniciály k připojení k WiFi síti a také správný API klíč k zápisu na MQTT server, v mém případě služba ThingSpeak.

Pokud jsme tak ještě neučinili, nanese se silikonové těsnění mezi doléhající díly krabičky.

Před použitím taky nabijeme baterii senzoru. Při nabíjení svítí červená LED dioda umístěná z druhé strany USB konektoru, po dokončení nabíjení LED dioda zhasne. Při chybovém stavu nebo odpojení baterie LED dioda bliká. Po nabití zašroubujeme krytku USB konektoru mincí a namontujeme anténu na SMA závit.

Poté můžeme senzor umístit do záhonku. Senzor v nastaveném intervalu měří vlhkost půdy a teplotu okolí, naměřené data jsou odesílány na základnovou stanici a publikovány na internet.



Obr. 4.3: Senzor při práci

5 Závěr

V průběhu vypracování této bakalářské práce byly zkoumány různé typy čidel pro měření vlhkosti půdy a teploty. Ze zkoumaných senzorů byly vybrány ty nejlepší varianty a ty se použili v praktické části.

Ze zkoušených čidel vláhly se jednoznačně osvědčilo čidlo na kapacitním principu, zatímco se ukázalo, že odporové čidlo, i přes svoji výhodu lepší linearity, se ukázalo jako horší volba z důvodu životnosti. Po zhruba měsíci a půl používání je odporové čidlo značně degradované korozí. Kapacitní čidlo díky zakrytým elektrodám je mnohem dlouhodobější volba pro měření vláhly půdy.

Z čidel teploty v této práci zvítězilo digitální čidlo s malou velikostí, ale velkými ambicemi kvůli jeho nízké ceně a velké přesnosti na půl stupně celsia. Je to Maxim Integrated DS18B20.

Zadání této práce obsahovalo využití radiové technologie LoRa čili technologie v oblasti internetu věcí. Hlavními vlastnostmi technologie jsou nízká energetická náročnost, vysoká citlivost přijímače i v zarušeném prostředí a velká vzdálenost komunikujících bodů. Přenosové rychlosti jsou nízké, ale právě pro senzorové jednotky jako je čidlo vlhkosti půdy a teploměr dostačující, proto má tato technologie svoje místo v budoucnosti pro podobné využití.

V práci pro mě bylo velkým přínosem vyzkoušet si navrhnout elektrické zařízení od schématických diagramů, rozvržení desek plošných spojů a dílů na nich až po jejich zprovoznění a oživení.

Literatura

- [1] Mark Stenglein. Chirp. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Chirp>.
- [2] Martin Adámek. Obecné rozdělení senzorů, 2011. URL: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_1_2.htm.
- [3] Pavel Dobyš. Teplotní závislost odporu polovodičového termistoru a kovového snímače teploty, 2017. URL: <http://fyzika.feec.vutbr.cz/vyuka/fp1/18/nav-18-2017-JFYZv5.pdf>.
- [4] Sandra Dotzer. Measuring soil moisture with fd-probes. In *EnMAP Field Guides*, pages 2–3, Postdam, Německo, 2015. EnMAP Consortium. doi:<http://doi.org/10.2312/enmap.2015.011>.
- [5] Mendelova univerzita v Brně. Půdoznalství. URL: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=5501&typ=html.
- [6] Sparkfun. Serial peripheral interface (spi), 2017. URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi/all>.
- [7] Sandeepmistry. Lora api, 2018. URL: <https://github.com/sandeepmistry/arduino-LoRa/blob/master/API.md>.

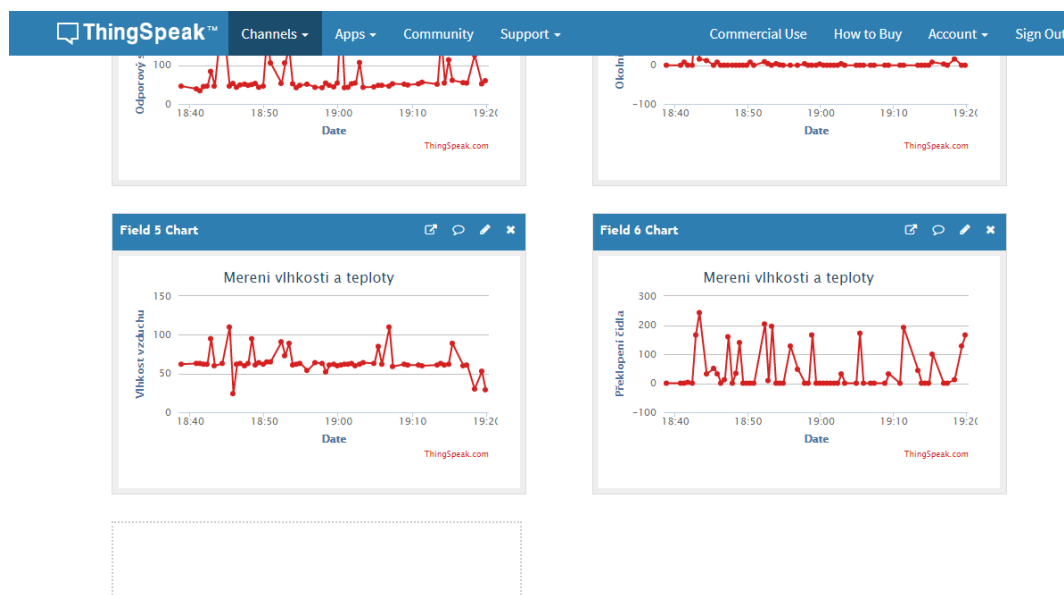
Seznam symbolů, veličin a zkratek

LoRa	Long Range
GPIO	General Purpose Input Output
DIO	Digital Input Output
PTC	Positive Temperature Coefficient
NTC	Negative Temperature Coefficient
LPWAN	Low Power Wide Area Network
MCU	Micro Controller Unit
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
USB	Universal Serial Bus
PTH	Pin Through Hole
SMD	Surface Mount Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
MOSI	Master Out Slave In
MISO	Master In Slave Out
SCK	Serial Clock
CLK	Clock
SS	Slave Select
LDO	Low Drop-Out
DPS	Deska plošných spojů

Seznam příloh

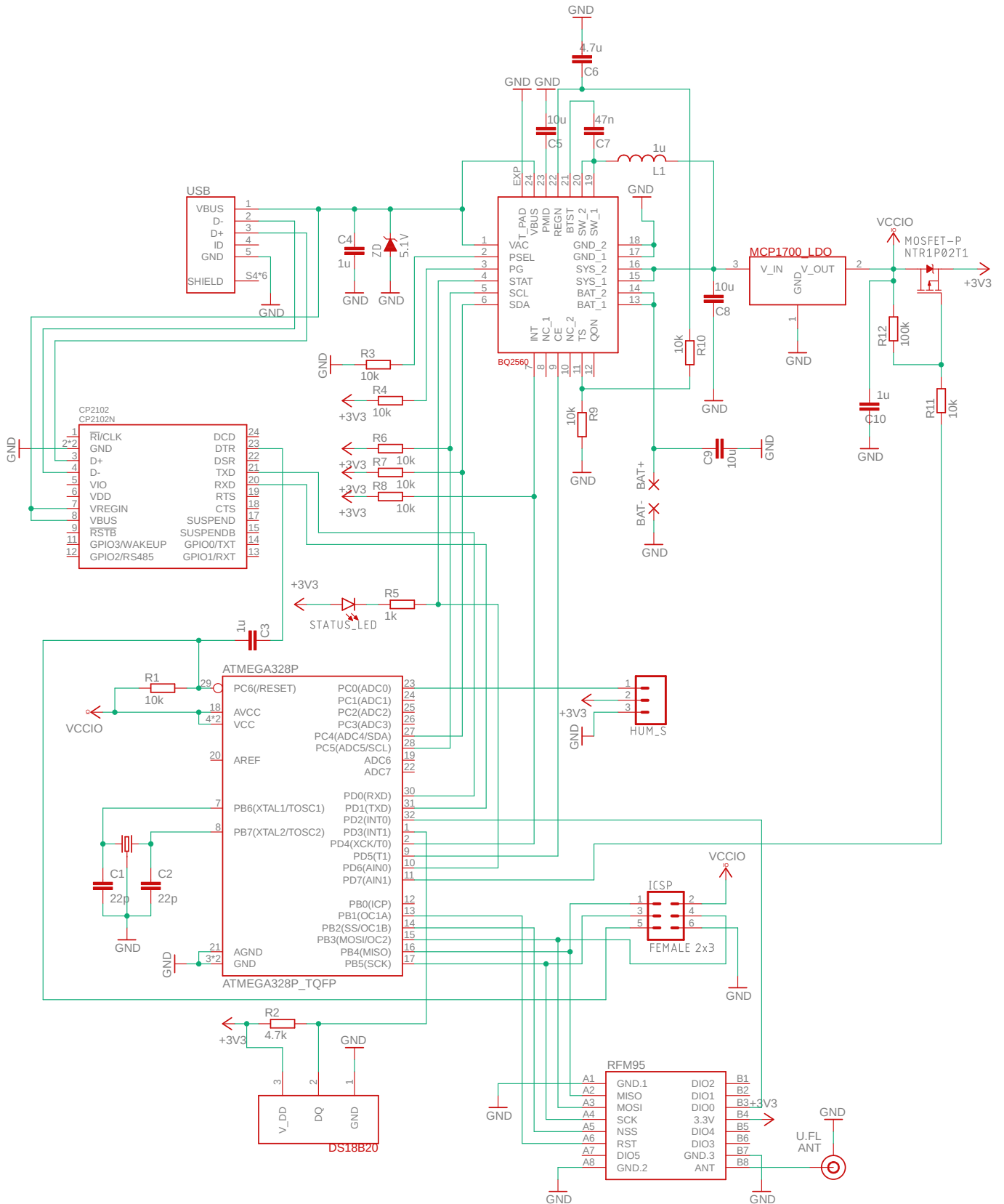
A Rozhraní Thingspeak	49
B Schéma zapojení senzoru	50
C Návrh DPS senzoru	51
D Schéma zapojení základnové stanice	52
E Návrh DPS základnové stanice	53

A Rozhraní Thingspeak

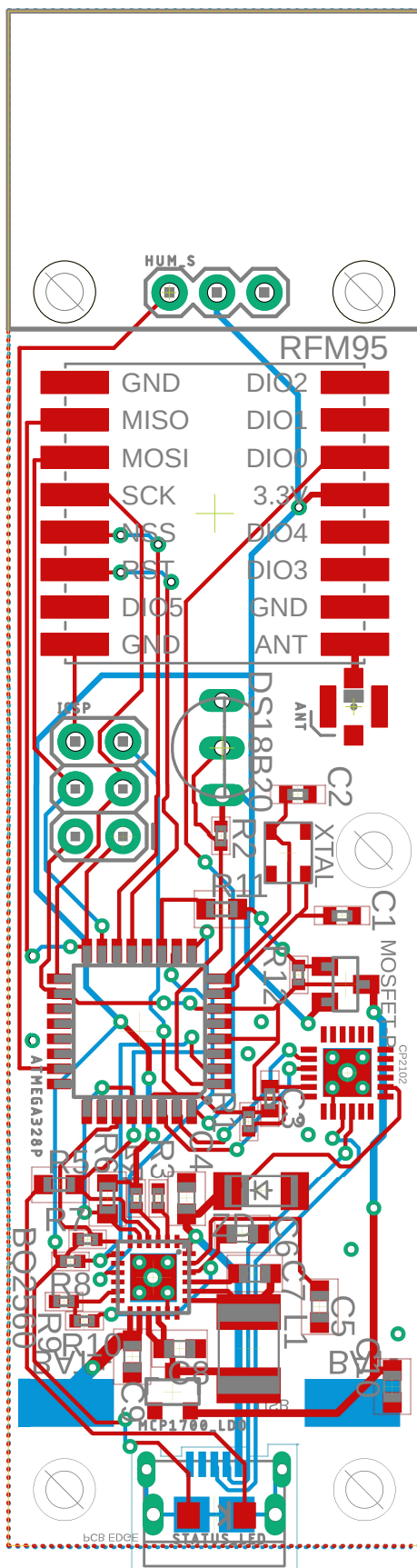


Obr. A.1: Ukázka uživatelského webového rozhraní Thingspeak

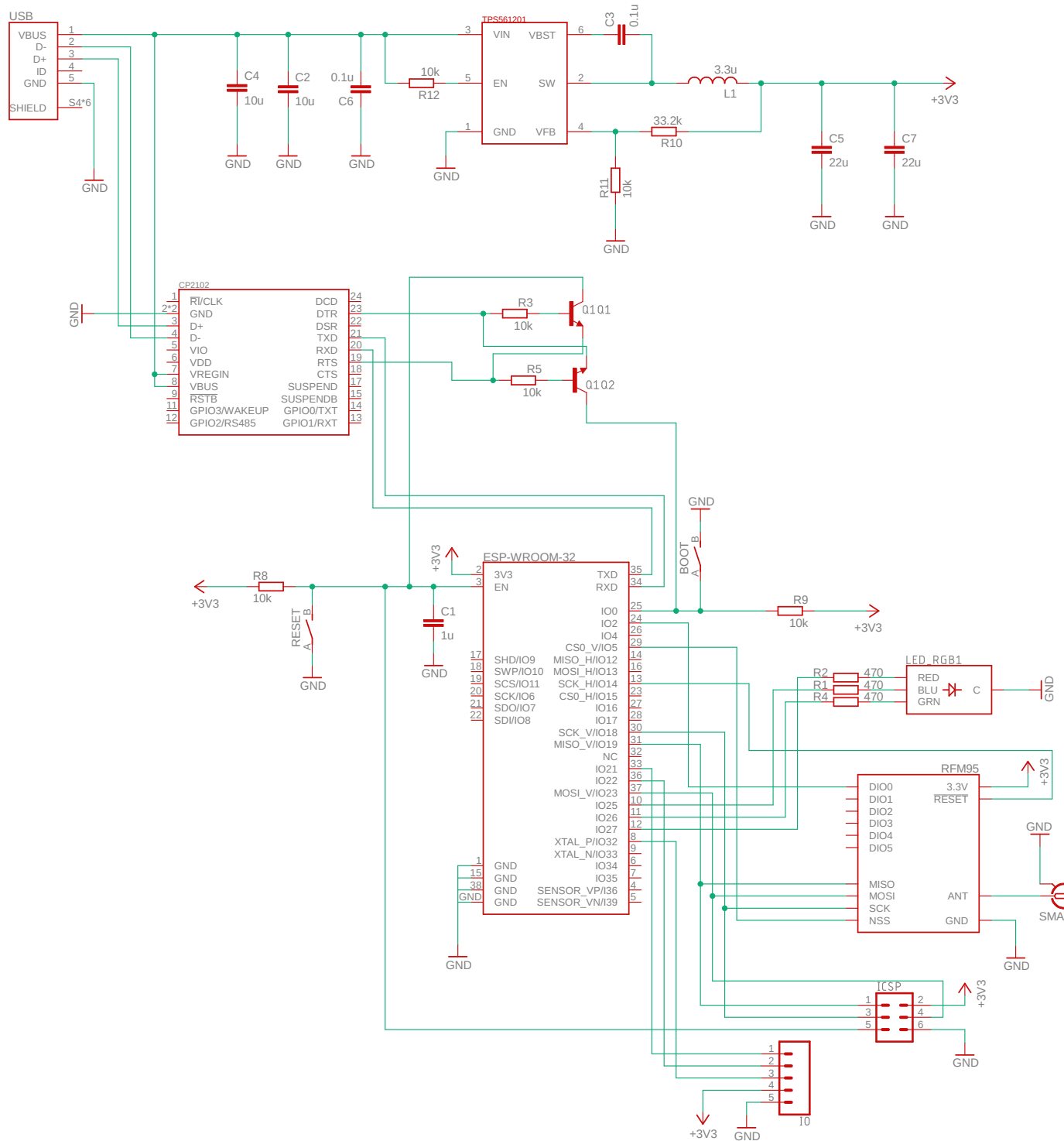
B Schéma zapojení senzoru



C Návrh DPS senzoru



D Schéma zapojení základnové stanice



E Návrh DPS základnové stanice

