

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Bezdrátová síť senzorů pro měření vlhkosti půdy

Tomáš Sirůček

Vedoucí: doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.

Obor: Elektronika

Studijní program: Elektronika a komunikace

Květen 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sirůček** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **466187**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Bezdrátová síť senzorů pro měření vlhkosti půdy.

Název diplomové práce anglicky:

Wireless Sensor Network to Measure Soil Moisture

Pokyny pro vypracování:

- 1) Navrhněte architekturu bezdrátového měřicího systému pro měření vlhkosti půdy,
- 2) proveděte rešerši vhodných senzorů, na základě studie vyberte senzor pro měření vlhkosti půdy až do hloubky 1 m,
- 3) navrhněte a implementujte měřící jednotku založenou na vhodném mikrokontroléru a senzoru vlhkosti,
- 4) implementujte síť modulů (alespoň jeden) a centrální jednotky, komunikující pomocí sítě LoRa,
- 5) diskutujte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] KIM, Dong-Seong; TRAN-DANG, Hoa. Industrial Sensors and Controls in Communication Networks. Computer Communications and Networks. Springer International Publishing, Cham, 2019.
- [2] HAC, Anna. Wireless sensor network designs. John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [3] DARGIE, Walteneus; POELLABAUER, Christian. Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice. John Wiley & Sons, 2010.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D., katedra radioelektroniky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **28.01.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.05.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval panu docentu Vítkovi za vstřícné a odborné vedení této práce, konzultace a věcné podněty.

Prohlášení

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

V Praze, 21. května 2021

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá systémem pro bezdrátové měření půdní vlhkosti. V teoretické části je vypracována studie věnující se různým interpretacím půdní vlhkosti a metodám či senzorům pro její určení. Praktická část je rozdělena na tři větší celky. První se zabývá návrhem a realizací měřící jednotky s mikrokontrolérem STM32WL55. Ve druhém je popsán proces realizace centrální jednotky s kitem STM32F746G-DISCO a poslední celek se zabývá realizací měřícího systému spojením těchto dvou jednotek a zprovozněním vzájemné komunikace pomocí LoRa fyzické vrstvy. Na závěr je celý systém testován.

Klíčová slova: internet věcí, STM32WL, LoRa, senzor, systém sběru dat, vlhkost, teplota

Vedoucí: doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.

Abstract

This master thesis deals with a system for wireless measurement of soil moisture. The theoretical part is a study devoted to various interpretations of soil moisture and methods or sensors for its determination. The practical part is divided into three larger sections. The first deals with the design and implementation of a measuring unit with a STM32WL55 microcontroller. The second describes the process of implementation of the central unit with the kit STM32F746G-DISCO and the last section deals with the implementation of the measuring system by connecting these two units and commissioning mutual communication using LoRa PHY. Finally, the whole system is tested.

Keywords: IoT, STM32WL, LoRa, sensor, DAQ system, moisture, temperature

Title translation: Wireless Sensor Network to Measure Soil Moisture

Obsah

1 Úvod	1		
2 Měření půdní vlhkosti	3		
2.1 Vodní potenciál	3		
2.2 Půdní vlhkost	4		
2.2.1 Nasycení půdy	5		
2.3 Metody měření půdní vlhkosti	7		
2.3.1 Gravimetrická metoda	7		
2.4 Senzory pro nedestruktivní měření	7		
2.4.1 Odporové senzory	7		
2.4.2 Kapacitní senzory	8		
2.4.3 Senzory na principu časové reflektometrie	10		
2.4.4 Senzory na principu frekvenční reflektometrie	11		
2.4.5 Neutronová sonda	11		
3 Měřicí jednotka	13		
3.1 Kapacitní sonda	14		
3.2 Převodník C-F	19		
3.2.1 Prototyp převodníku	19		
3.2.2 Finální návrh převodníku	22		
3.3 Řídící deska	25		
3.3.1 Mikrokontrolér STM32WL55CC	25		
3.3.2 Obvodové řešení	27		
3.4 Kompletace	36		
3.5 Firmware	39		
3.5.1 Inicializace periférií	40		
3.5.2 Měření	41		
3.5.3 Kalibrace sond	43		
3.5.4 Úsporný režim	43		
4 Centrální jednotka	45		
4.1 Konstrukční řešení	45		
4.1.1 LoRa-UART převodník	46		
4.1.2 Řídící deska	46		
4.1.3 UART-WiFi převodník	48		
4.1.4 Kompletace	48		
4.2 Firmware	50		
4.2.1 Inicializace periférií	50		
4.2.2 Domovská obrazovka	51		
4.2.3 Sensorová obrazovka	52		
4.2.4 Wi-Fi obrazovka	53		
5 Měřicí systém	55		
5.1 Komunikace	55		
5.1.1 LoRa	55		
5.1.2 LoRaWAN	56		
5.1.3 Inicializace bezdrátové periferie STM32WL55	57		
5.1.4 Komunikační protokol měřicího systému	57		
5.2 Testování	58		
6 Závěr	61		
A Schémata	63		
B Literatura	67		

Obrázky

2.1 Příklad gradientu vodního potenciálu [1]	4	3.9 Schéma desky pro testování verzí převodníku C-F	20
2.2 Příklad senzoru vodního potenciálu [2]	5	3.10 Návrh dvouvrstvé DPS pro testování verzí převodníku C-F ...	21
2.3 Složení půdy	6	3.11 Osazené desky pro testování verzí převodníku C-F	21
2.4 Příklad odporového senzoru vlhkosti půdy společnosti RobotDyn [3]	8	3.12 Schéma obvodu zpracování signálu sondy	22
2.5 Přibližné hodnoty relativní permitivity jednotlivých složek zeminy [4]	8	3.13 Návrh dvouvrstvé DPS pro zpracování signálu sondy	23
2.6 Příklad kapacitního senzoru vlhkosti půdy společnosti Meter Environment [5]	9	3.14 Osazené finální verze desky pro zpracování signálu sondy	24
2.7 Příklad TDR senzoru vlhkosti půdy společnosti CAMPBELL SCIENTIFIC [6]	10	3.15 Blokové schéma mikrokontroléru STM32WL55[9]	26
2.8 Příklad FDR senzoru vlhkosti půdy společnosti CM Manufacturing [7].	11	3.16 Blokové schéma bezdrátové periferie mikrokontroléru STM32WL55[10]	27
2.9 Princip činnosti neutronové sondy [8]	12	3.17 Blokové schéma řídicí desky ...	28
3.1 Blokové schéma měřící jednotky	13	3.18 Schéma HMI části řídicí desky .	28
3.2 Vývoj konstrukce kapacitní sondy	14	3.19 Schéma napájecí části řídicí desky	30
3.3 Hřebenová konstrukce kapacitní sondy	15	3.20 Schéma konektorů řídicí desky .	31
3.4 Konstrukce třetí verze sondy (s drážkami)	16	3.21 Schéma RF části řídicí desky ..	32
3.5 Vodivá barva Bare Conductive .	17	3.22 Řez skladbou desky s označením JLC7628	33
3.6 Vodivá barva Chemtronics CircuitWorks	17	3.23 Výpočet potřebných rozměrů RF vedení	33
3.7 Řez finální verzí sondy	18	3.24 Kompletní návrh 4-vrstvé řídicí desky	34
3.8 Měření kapacity finální verze sondy	19	3.25 3D náhled řídicí desky	35
		3.26 3D tištěné díly měřící jednotky	37
		3.27 Jednotlivé sondy s převodníky a kabely	38
		3.28 Průchod kabelů k řídicí desce .	39

3.29	Hotová měřicí jednotka	39
3.30	Blokové schéma FW měřicí jednotky	40
3.31	Závislost výstupního napětí NTC můstku na teplotě	42
4.1	Blokové schéma centrální jednotky	45
4.2	Vývojový kit STM32F746G-DISCO[11]	47
4.3	Blokové schéma LTDC periferie .	48
4.4	Kompletace centrální jednotky .	49
4.5	Finální vzhled centrální jednotky	49
4.6	Blokové schéma programu centrální jednotky	50
4.7	Náhled domovské obrazovky . . .	51
4.8	Náhled senzorové obrazovky	52
4.9	Náhled Wi-Fi obrazovky	53
4.10	Náhled klávesnice při zadávání hesla k Wi-Fi	53
5.1	Pokrytí LoRaWAN na území ČR[12]	56
5.2	LoRaWAN systém[13]	57
5.3	Skladba paketu	58
5.4	Testování měřicího systému	59
5.5	Graf z první fáze testování	59
5.6	Graf z druhé fáze testování	60
5.7	Graf z třetí fáze testování	60

Tabulky

3.1	Srovnání C-F převodníků	22
-----	-----------------------------------	----

Kapitola 1

Úvod

V posledních letech se nejen Česká republika potýká se suchem. Existuje spousta studií potvrzujících, že se klimatické podmínky postupně mění a přibývají suché epizody. Na místech, kde dříve tekly potůčky, dnes vidíme jen vyschlá koryta, dlouhodobě roste počet teplých dnů a klesá počet dnů mrazivých.

Jeden z největších dopadů má sucho nepochybně na zemědělství. Klesají výnosy polí a s tím úzce souvisí i nárůst cen za plodiny, které jsou suchem ovlivněny. Řešením této situace by bylo umělé zavlažování, jenže je potřeba s vodou hospodařit opatrně, protože jí je nedostatek.

Aby bylo možné efektivně plánovat umělé zavlažování, je kromě předpovědi počasí také potřeba znát aktuální stav zavlažované oblasti. I když se půda na povrchu jeví suchá, může být pod povrchem vody dostatek a naopak vlhký povrch půdy neznamená dostatek vody v hloubce kořenů.

Cílem této diplomové práce je realizovat měřící jednotky, které budou schopné měřit půdní vlhkost v různých hloubkách a to až do hloubky jednoho metru. Tyto jednotky následně budou naměřená data bezdrátově přenášet do centrální jednotky, která naměřené údaje zobrazí a dále odešle na vzdálený server, kde bude možno tato data dále zpracovat.

Teoretická část této práce se zabývá právě problematikou půdní vlhkosti, nasycení půdy či vodního potenciálu. Dále je vypracována studie, která se zabývá možnostmi a metodami měření půdní vlhkosti. V rámci praktické části je pak navržen kompletní bezdrátový systém pro monitorování půdní vlhkosti a následnou prezentaci naměřených dat. Vzhledem k realizaci odesílání dat na vzdálený server je zde i možnost kooperace se zavlažovacím systémem.

Kapitola 2

Měření půdní vlhkosti

Existují dva základní parametry, které souvisí s určováním množství vody v půdě: půdní vlhkost (hmotnostní či objemová) a vodní potenciál v půdě. Zatímco první parametr reálně vyjadřuje kolik vody se v půdě vyskytuje, druhý parametr popisuje spíše dostupnost této vody rostlinám (pro představu: z neporézní půdy voda extrahuje lépe, než z půdy, která absorbuje hodně vody).[14]

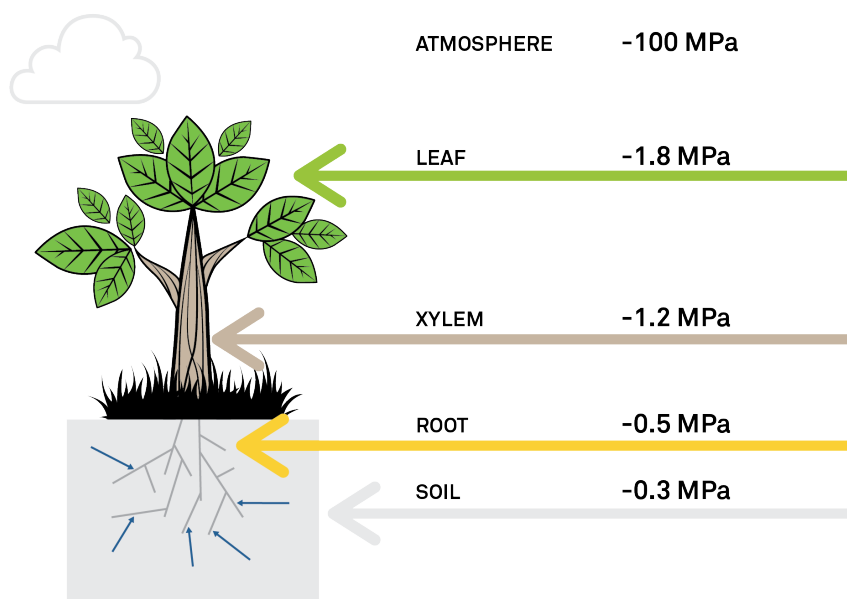
2.1 Vodní potenciál

Tato veličina[1] charakterizuje stav vody v rostlině, jejích částech nebo nejbližším okolí (půda, vzduch). Vždy platí, že voda bude proudit ve směru gradientu vodního potenciálu (směrem k nižšímu potenciálu), dokud nedosáhne ekvilibria (rovnovážného stavu). Na obrázku 2.1 je příklad gradientu vodního potenciálu v systému rostliny.

Hodnota vodního potenciálu je relativní, referenční hodnotou je potenciál čisté vody, na kterou působí stejný atmosférický tlak, stejná teplota a stejná gravitační síla. Potenciál takovéto čisté vody je konvenčně považován za nulový. Vodní potenciál Ψ_w je chemický potenciál vody (μ_w) vztažený na její molární objem (V_w) a udává se v jednotkách tlaku (nejčastěji [MPa]). Skládá se z několika složek: potenciál maticový (Ψ_m), potenciál osmotický (Ψ_s), potenciál tlakový (Ψ_p) a potenciál gravitační (Ψ_g).

$$\Psi_w = \Psi_m + \Psi_s + \Psi_p + \Psi_g = \frac{\mu_w}{V_w}$$

Maticový potenciál je ze zmíněných složek nejvýznamnější, co se půdy týče (v rostlině už to neplatí). Vyjadřuje sílu, jakou jsou k sobě přitahovány částice zeminy a vody, jedná se především o vodíkové vazby a Van der Waalovy síly. Zemina je tvořena velmi malými částčkami, což poskytuje velký povrch,



Obrázek 2.1: Příklad gradientu vodního potenciálu [1]

na který se voda může vázat. Jedná se o složku, která je nejvíce ovlivněna typem půdy (písčité půdy má velké částice, které tak na sebe vážou mnohem méně vody, než částice bahnitě půdy, které jsou o dost menší).

Osmotický potenciál vody závisí na koncentraci látek, které jsou v ní rozpuštěny. Vyjadřuje sílu, která je potřebná k průchodu vody polopropustnou membránou (částice rozpuštěné ve vodě touto membránou neprojdou). Hodnota osmotického potenciálu je rovna záporné hodnotě osmotického tlaku.

Tlakový potenciál udává rozdíl mezi tlakem vody v soustavě a tlakem atmosférickým a gravitační potenciál je dán působením gravitace a polohou vody vzhledem k referenční poloze (nejčastěji povrch půdy).

Na obrázku 2.2 je příklad sezoru vodního potenciálu TEROS 21 od společnosti METER Environment.

2.2 Půdní vlhkost

Tato veličina popisuje relativní množství vody v půdě[15][14]. Existují dvě možnosti vyjádření: objemová a hmotnostní vlhkost.

Objemová vlhkost půdy se značí θ a je definována jako:

$$\theta = \frac{V_w}{V_s},$$



Obrázek 2.2: Příklad senzoru vodního potenciálu [2]

kde V_w je objem vody v půdním vzorku a V_s je objem půdního vzorku (včetně vody a vzduchu). Jedná se o ne úplně jednoznačné určení půdní vlhkosti, protože záleží na míře komprese půdy (množství vzduchu). Dále je také technologicky složité změřit přesný objem čisté vody v půdě.

Hmotnostní vlhkost půdy se značí w a je definována jako:

$$w = \frac{m_w}{m_{ds}},$$

kde m_w značí hmotnost vody v půdě a m_{ds} značí hmotnost suché půdy. Jedná se o nejjednoznačnější určení půdní vlhkosti, protože hmotnosti jsou jasně dané, narozdíl od objemů. K určení hmotnostní vlhkosti se používá gravimetrická metoda.

Dalším používaným pojmem je objemová hmotnost půdy $\rho_b [g \cdot cm^{-3}]$, která udává hmotnost určitého objemu suché půdy v přirozeném stavu (včetně vzduchu). Z fyzikálního hlediska se jedná o hustotu směsi půdních částic a vzduchu. Tato veličina se používá pro převod mezi objemovou a hmotnostní vlhkostí:

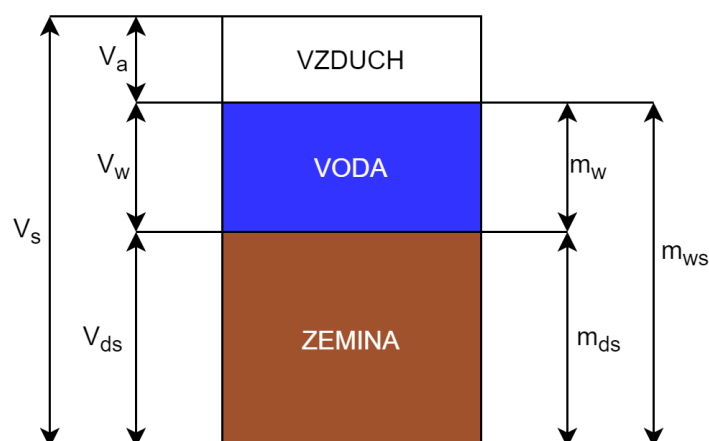
$$w = \frac{m_w}{m_{ds}} = \frac{V_w \cdot \rho_w}{V_s \cdot \rho_b} = \theta \cdot \frac{1}{\rho_b}, \quad \theta = w \cdot \rho_b,$$

při zaokrouhlení hustoty vody na $\rho_w = 1g \cdot cm^{-3}$.

Na obrázku 2.3 jsou zobrazené jednotlivé složky půdy s vyznačenými hmotnostmi a objemy použitými ve vzorcích.

■ 2.2.1 Nasycení půdy

Z hlediska objemové vlhkosti máme přesně danou stupnici, kdy na jedné straně je zcela vysušená půda odpovídající vlhkosti 0% a na straně druhé



Obrázek 2.3: Složení půdy

máme čistou vodu odpovídající vlhkosti 100%. V běžných podmínkách se však půdní vlhkost pohybuje mezi těmito hranicemi, ale nikdy nedosáhne 100%. Proto byla zavedena veličina *Nasycení půdy* s označením S_w , která je definována takto:

$$S_w = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V_s \cdot \phi} = \frac{\theta}{\phi},$$

kde $V_v = V_a + V_w$ je objem prázdného prostoru (pórů) v půdě a ϕ je pórovitost půdy. Pórovitost je veličina vyjadřující poměr objemu pórů a objemu tělesa:

$$\phi = \frac{V_v}{V_s}.$$

Nasycení dosahuje hodnot v rozmezí 0 až 1, resp. 0% až 100%, kdy tyto krajní hodnoty jsou spíše teoretické a v reálném prostředí nedosažitelné. Zemina totiž bude mít v reálném prostředí vždy nějakou zbytkovou vlhkost.

Dalším faktorem, který je potřeba zohlednit a který souvisí s vodním potenciálem je *bod vadnutí* (objemová vlhkost, při které již voda v zemině není dostupná pro rostlinu) θ_r a proto se zavedla další veličina - relativní (příp. efektivní) nasycení půdy S_e (označováno také jako využitelná vodní kapacita - VVK), která je definována takto:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r},$$

kde θ_s je hodnota objemové vlhkosti při maximálním nasycení (označuje se jako polní kapacita) a odpovídá pórovitosti půdy ϕ . Relativní nasycení dosahuje hodnot 0 až 1, případně 0% až 100%. Hodnota 0 odpovídá bodu vadnutí a hodnota 1 odpovídá polní kapacitě.

2.3 Metody měření půdní vlhkosti

Existuje několik metod měření [16] a několik typů senzorů půdní vlhkosti [4]. Metody měření se dělí na destruktivní a nedestruktivní. U destruktivních metod dochází k odběru vzorku půdy a následnému měření. Z destruktivních metod zde pouze zmíním gravimetrickou metodu, ale jinak se budu zabývat senzory pro nedestruktivní měření. Různé typy senzorů se liší cenou, jednoduchostí použití, přesností měření půdní vlhkosti, stabilitou v čase nebo vlivem složení půdy na přesnost měření.

2.3.1 Gravimetrická metoda

Jedná se o destruktivní laboratorní metodu. Nejprve je nabrán vzorek půdy, u které je potřeba změřit vlhkost, ten se zváží a půda se poté vysuší 24 hodin při 105°C nebo 48 hodin při 60°C . Poté se zváží i vysušená půda a hmotnostní vlhkost w původního půdního vzorku se spočítá dle vzorce:

$$w = \frac{m_w}{m_{ds}} = \frac{m_{ws} - m_{ds}}{m_{ds}},$$

kde m_w je hmotnost vody, m_{ds} je hmotnost suché půdy a m_{ws} je hmotnost vlhké půdy, tedy původního vzorku.

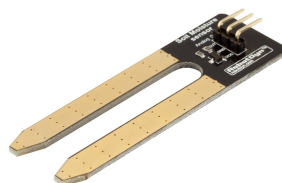
Již z podstaty měření nelze tuto metodu použít pro kontinuální měření či sledování a logování půdní vlhkosti, ale často se tato metoda používá pro kalibraci senzorů pro nepřímé měření půdní vlhkosti. Nepřímé měření znamená, že nesledujeme přímo vlhkost nebo obsah vody v půdě, ale sledujeme parametr, který je vlhkostí půdy ovlivňován (např. elektrická vodivost, permitivita či tepelná vodivost).

2.4 Senzory pro nedestruktivní měření

2.4.1 Odporové senzory

Tyto senzory pracují na principu měření elektrického odporu zeminy mezi dvěma elektrodami. Tyto elektrody nesmí být z principu funkce kryté izolací a tak často dochází k postupné degradaci materiálu elektrod z důvodu koroze způsobené elektrolýzou. Přesnost a spolehlivost tohoto typu senzorů je velmi nízká, protože elektrický odpor půdy je kromě vlhkosti závislý také na složení půdy, především na množství volných iontů, protože čistá voda sama o sobě vodivá není. Na druhou stranu se jedná o nejlevnější a na použití nejjednodušší typ senzoru, takže je často používán bastlíři či nadšenci pro jednoduchou indikaci suchá/mokrý půda, ale na přesné a seriózní měření půdní vlhkosti je naprosto nepoužitelný.

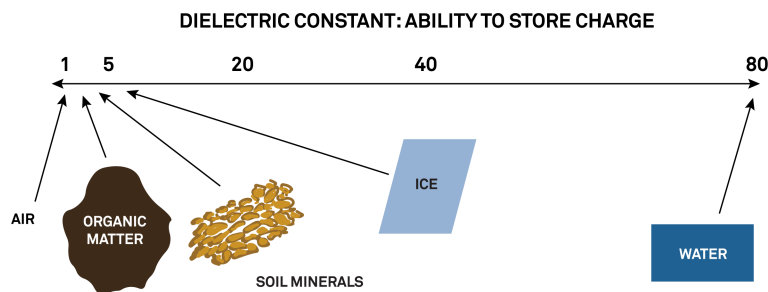
RobotDyn



Obrázek 2.4: Příklad odporového senzoru vlhkosti půdy společnosti RobotDyn [3]

2.4.2 Kapacitní senzory

Kapacitní senzory pracují na principu nepřímého měření vlhkosti jako funkce permitivity půdy[17][18]. Tyto senzory jsou konstruovány tak, že půda tvoří dielektrikum kondenzátoru. Kapacita tohoto kondenzátoru se mění v závislosti na permitivitě dielektrika. S rostoucí vlhkostí půdy roste i její permitivita, na které je přímo úměrně závislá výsledná kapacita. Na obrázku 2.5 jsou znázorněny přibližné hodnoty relativní permitivity různých složek zeminy. Z tohoto obrázku je patrné, že permitivita zeminy nejvíce závisí na podílu vody v celé směsi.



Obrázek 2.5: Přibližné hodnoty relativní permitivity jednotlivých složek zeminy [4]

Konkrétní konstrukce kondenzátoru se liší mezi různými typy těchto senzorů. Některé jsou konstruovány přímo na desce plošných spojů a to buď ve formě dvou nebo tří souběžných vodičů nebo hřebenové struktury a mohou být z jedné nebo obou stran desky. Další typy jsou ve formě tří rovnoběžných kovových tyčí napojených na koaxiální kabel tak, že střední tyč je připojena ke středovému vodiči a krajní dvě tyče jsou připojeny ke stínění kabelu, nebo s integrovanou elektronikou (příklad na obrázku 2.6). Dalším řešením je použití vodivé struktury (dva podélné či příčné pásy, hřebenová struktura) na nevodivé konstrukci (nejčastěji válcová tyč). Ve všech případech je pro správnou funkci nutné, aby elektrody byly elektricky izolovány. Součástí senzoru také často bývá obvod zpracování signálu, protože kapacita je nevhodná veličina

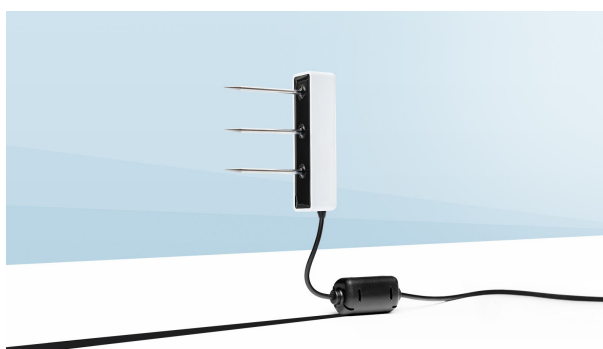
na přenos vedením k nějakému nadřazenému systému. Nejčastějšími variantami jsou převod na analogovou hodnotu (napětí přímo úměrné kapacitě), převod na frekvenci, která je často přímo úměrná kapacitě nebo digitální výstup (IIC, SPI a další). Při převodu na napětí bývá často sonda součástí výstupního RC dolnoproustného filtru. Při převodu na frekvenci je sonda časovacím elementem obvodu.

Výhodami tohoto typu senzorů jsou například:

- vysoká přesnost po kalibraci pro danou zeminu,
- variabilita prostorového uspořádání elektrod a možnost měřit ve více hloubkách najednou,
- nízká závislost na složení půdy,
- relativně nízké pořizovací náklady.

Mezi nevýhody naopak patří:

- nutnost kalibrace pro danou zeminu,
- malý objem měřené zeminy - elektrické pole vytvořené kapacitní sondou (oblast dielektrika kondenzátoru) má malý dosah,
- vyšší citlivost na teplotu,
- nutnost dokonalého kontaktu mezi zeminou a sondou - po opakovaném vlhčení a sesychání půdy dochází k vzniku vzduchové mezery mezi sondou a okolní půdou - dochází ke zkreslení výsledků.



Obrázek 2.6: Příklad kapacitního senzoru vlhkosti půdy společnosti Meter Environment [5]

2.4.3 Senzory na principu časové reflektometrie

Stejně jako kapacitní senzory, i senzory půdní vlhkosti na principu časové (pulsní) reflektometrie (TDR - time-domain reflectometry) pracují na principu nepřímého měření vlhkosti jako funkce permitivity půdy[19]. Narozdíl od kapacitních senzorů však tyto senzory neměří kapacitu, ale rychlost šíření vysokofrekvenčního elektromagnetického impulsu. Původně byla metoda TDR vyvinuta k detekci a lokalizaci poruch elektrických vedení. Elektromagnetické vlnění se totiž částečně odráží od každé diskontinuity (prasklina či konec vedení). Elektronika senzoru generuje vysokofrekvenční pulsy (složeny z různých frekvenčních složek o frekvencích řádově setin až jednotek GHz), které se šíří podél několika zářičů (většinou 2 nebo 3 - příklad od společnosti CAMPBELL SCIENTIFIC na obrázku 2.7) a na jejich konci se odráží zpět. Čas potřebný pro šíření vlny podél těchto zářičů na konec a zpět závisí na permitivitě okolního prostředí:

$$t = \frac{2 \cdot L \cdot \sqrt{\epsilon_r}}{c},$$

kde L je délka zářiče, ϵ_r je relativní permitivita půdy a c je rychlost šíření světla ve vakuu.

Výhodami tohoto typu senzorů jsou například:

- vysoká přesnost bez nutnosti kalibrace pro danou zeminu,
- minimální narušení půdy při instalaci,
- umožňuje současně měřit i elektrickou vodivost půdy.

Mezi nevýhody naopak patří:

- vyšší pořizovací cena než u kapacitního senzoru,
- malý objem měřené zeminy - zhruba 3 až 4cm podél zářičů,
- omezené možnosti použití v silně zasolených půdách (s vysokou elektrickou vodivostí).



Obrázek 2.7: Příklad TDR senzoru vlhkosti půdy společnosti CAMPBELL SCIENTIFIC [6]

2.4.4 Senzory na principu frekvenční reflektometrie

Senzory na principu frekvenční reflektometrie (FDR - frequency-domain reflectometry) pracují podobně jako senzory na principu časové reflektometrie, ale místo rychlosti šíření elektromagnetického impulsu získávají informaci o permitivitě půdy porovnáním frekvenčního spektra vysílaného a odraženého signálu[20]. Po kalibraci pro danou půdu mají lepší přesnost, než senzory TDR, ale vzhledem k nutnosti většího výpočetního výkonu mají vyšší cenu.



Obrázek 2.8: Příklad FDR senzoru vlhkosti půdy společnosti CM Manufacturing [7]

2.4.5 Neutronová sonda

Senzory na principu neutronové sondy[8] se skládají z duté válcové tyče zavedené do půdy až do maximální hloubky, v jaké bude prováděno měření půdní vlhkosti. V nadzemní části je tyč spojena s krabičkou, v níž je umístěna vyhodnocovací a případně i komunikační elektronika. Uvnitř duté tyče je umístěna sonda s kapslí se zdrojem rychlých neutronů (směs radioaktivního materiálu a berylia), se kterou je možné vertikálně pohybovat (manuálně či automaticky) a tím určovat hloubku měření vlhkosti. Rychlé neutrony jsou poté zpomalovány a odráženy především atomy vodíku (hlavním zdrojem vodíku v půdě je voda, ale může se zde vyskytovat i v jiných látkách, proto je nutná kalibrace pro danou půdu). Detektor v sondě poté měří množství vyslaných rychlých neutronů a množství přijatých pomalých neutronů a z jejich

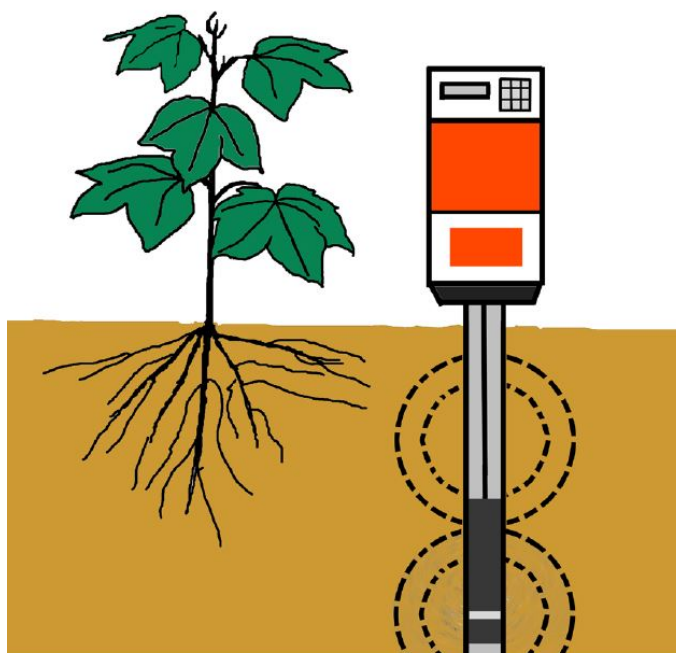
poměru se určuje výsledná vlhkost. Na obrázku 2.9 je znázorněn princip činnosti neutronové sondy.

Výhodami tohoto typu senzorů jsou například:

- stálost a přesnost,
- možnost měřit v různých hloubkách jedinou sondou,
- velký poloměr měřeného prostoru (až 40cm),
- měření není ovlivněno salinitou půdy.

Mezi nevýhody naopak patří:

- nutnost kalibrace pro danou zeminu,
- bezpečnostní riziko - zařízení mohou obsluhovat pouze zaškolení pracovníci,
- velikost a hmotnost zařízení,
- měření v blízkosti povrchu je zkreslené,
- vysoké pořizovací náklady.

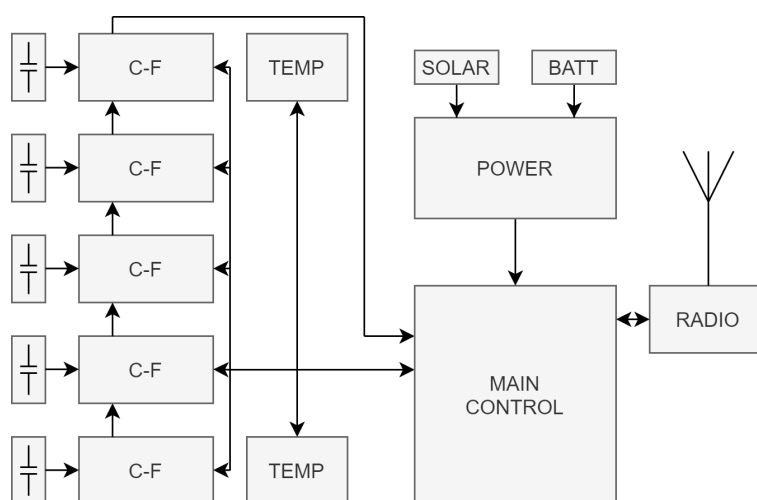


Obrázek 2.9: Princip činnosti neutronové sondy [8]

Kapitola 3

Měřicí jednotka

Po prostudování existujících řešení a možností měření půdní vlhkosti, případně nasycení půdy vodou, byl prvním krokem návrh měřicí jednotky systému. Po zvážení všech výhod a nevýhod jednotlivých možností (více v předchozí kapitole) jsme se rozhodli použít kapacitní senzory půdní vlhkosti společně s převodníky C-F (kapacita-frekvence) pro snažší a přesnější měření mikrokontrolérem. Již předem jsme se rozhodli, že chceme měřit půdní vlhkost v pěti různých hloubkách až do 1m. Vzhledem k mírné teplotní závislosti kapacity sond bylo dále potřeba snímat i teplotu půdy, jejíž vlhkost je měřena. K tomuto účelu jsme se rozhodli použít můstky s NTC termistory a vzhledem k nedostatku pinů mikrokontroléru měříme teplotu jen ve dvou místech a to v oblastech první a poslední kapacitní sondy. Dalším požadavkem byla energetická soběstačnost vzhledem k pravděpodobnému umístění mimo dosah rozvodů elektřiny. Měřicí jednotka je tedy napájena z Li-Ion akumulátoru, který je dobíjen fotovoltaickým článkem. Posledním požadavkem byla možnost naměřená data bezdrátově odesílat do centrální jednotky. Blokové schéma měřicí jednotky je na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Blokové schéma měřicí jednotky

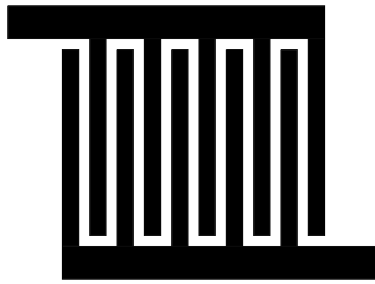
3.1 Kapacitní sonda

Prvním krokem při realizaci měřící jednotky byl návrh a realizace kapacitní sondy. Již na začátku jsem se rozhodl, že senzor bude válcovitého tvaru z důvodu požadavku na použití několika měřících sond v různých hloubkách. Tyto sondy tak mohou být umístěné na jedné tyči nad sebou. Dalším požadavkem také byla dostatečná pevnost a tuhost konstrukce, jelikož měření má být prováděno až do hloubky $1m$. Jednotlivé pokusy o konstrukci sondy splňující všechny požadavky jsou na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Vývoj konstrukce kapacitní sondy

1. Úplně první konstrukce sondy byla velmi jednoduchá. Jednalo se o dva měděné plechy o tloušťce $0.5mm$ a šířce $20mm$ obtočené kolem PVC trubky o průměru $32mm$. Plechy byly k trubce přilepeny dvousložkovým epoxidovým lepidlem a během vytvrzování lepidla byly plechy zajištěny kovovými šroubovacími stahovacími pásky. Krátce po uvolnění stahovacích pásek však došlo vlivem pnutí měděného plechu k povolení lepeného spoje. Tento problém se mi podařilo částečně vyřešit dodatečným oblepením elektrikářskou páskou. Během následného testování jsem zjistil, že sonda má moc nízkou kapacitu a také minimální rozdíl kapacity při umístění na vzduchu a ve vodě. Toto bylo způsobeno malou vzájemnou plochou elektrod. Ve výsledku jsem tedy tuto sondu schoval a už nepoužil.
2. Na druhou verzi sondy jsem pro eliminaci problémů s pnutím místo měděného plechu použil měděnou samolepící pásku o tloušťce $35\mu m$ a šířce $6mm$. Dále bylo jasné, že je potřeba mnohonásobně zvýšit vzájemnou plochu elektrod, tak jsem místo dvou pásek použil hřebenovou konstrukci o šířce $50mm$ podle obrázku 3.3.

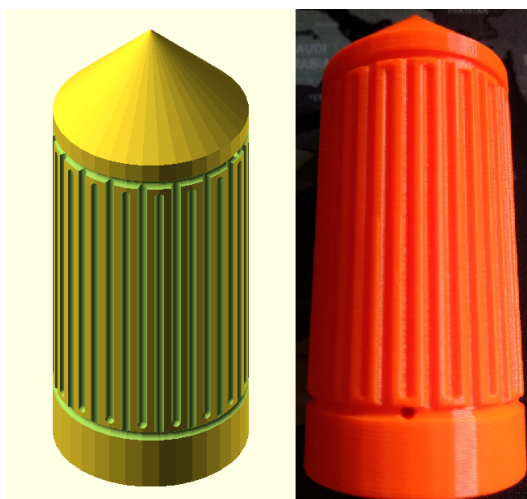


Obrázek 3.3: Hřebenová konstrukce kapacitní sondy

Spojné části hřebenů (na obrázku vodorovné vodiče nahoře a dole) jsou dělány z plné šíře pásky (6mm) a jsou nalepeny příčně po celém obvodu PVC trubky. V místě spojení dvou konců jsou tyto konce k sobě připájeny a dále je k nim připájen i vodič, který dále pokračuje otvorem ve stěně trubky dovnitř. Funkční části hřebenů (na obrázku svislé vodiče) jsou dělány z poloviční šíře pásky (3mm) a jsou nalepeny podélně po celém obvodu PVC trubky. Tyto části jsou lepeny střídavě k oběma spojným vodičům vždy s přesahem a následně připájeny ke spojným vodičům. Celá PVC trubka je následně obalena mikrotenovou fólií, která slouží jako izolace a na obou koncích je zajištěna elektrikařskou páskou. Během následného testování jsem ověřil, že sonda již má dostatečnou kapacitu zhruba 50pF na vzduchu a 300pF ve vodě.

Toto řešení ovšem nevyhovovalo konstrukčně. PVC trubka sice má dostatečnou pevnost, ale musela by být použita vcelku. Toto nebylo možné realizovat, protože uvnitř trubky bylo potřeba umístit převodník C-F (kapacita-frekvence) v blízkosti každé sondy. Pro měření vlhkosti půdy až do hloubky 1m by tedy výsledná délka PVC trubky byla zhruba 120cm včetně dostatečného odsazení elektroniky měřící jednotky od země. Po celé této délce by mělo být 5 kapacitních sond a tedy i 5 převodníků s co nejkratšími vodiči mezi sondou a převodníkem pro eliminaci parazitních kapacit. Další nevýhodou tohoto řešení byla pracná a zdlouhavá výroba - nastříhání pásky na přesné rozměry, podélné rozříznutí pásky pro funkční části hřebenové konstrukce, přesné lepení na trubku a následné pájení. Celá tato procedura trvala několik hodin na jednu sondu.

3. Třetí verze sondy měla vyřešit nedostatky předchozí verze. PVC trubka byla nahrazena 3D tištěným dílem z PLA. Toto řešení má tu výhodu, že lze jednotlivé díly navrhnout a vytisknout tak, aby se následně po kompletaci jednotlivých sond daly spojit v jeden celek, který bude dostatečně tuhý, aby nedošlo k jeho poškození při následné instalaci do země. Dále jsem se rozhodl, pro zredukování časové náročnosti, použít na elektrody místo měděných pásek vodivou barvu [21] na bázi uhlíku Bare Conductive (na obrázku 3.5). Již při návrhu 3D modelu jsem tedy s tímto řešením počítal a hřebenovou strukturu kondenzátoru jsem do něj zakomponoval ve formě drážek v samotném těle sondy (obrázek 3.4). Po vytisknutí těla sondy jsem nainstaloval přívodní vodiče, které jsem



Obrázek 3.4: Konstrukce třetí verze sondy (s drážkami)

nejprve odizoloval a tuto odizolovanou část vodiče jsem obmotal v drážce spojné části hřebenů a zajistil. Poté jsem se snažil vpravit vodivou barvu přímo z tuby do drážek. Bohužel to nešlo tak dobře, jak jsem předpokládal, ručně nebylo prakticky možné vpravit tuto barvu pouze do drážek tak, aby nedošlo ke spojení obou hřebenů. Nakonec jsem se rozhodl vyplnit hlavně všechny drážky i za cenu toho, že přebytečná barva bude všude kolem. Po zaschnutí jsem tedy přistoupil k odstraňování přebytečné barvy. Nejprve jsem přebytek oškrábal nožem a pak zbylou barvu obrousil brusným papírem. Pro odstranění přilepeného prachu jsem použil obyčejnou gumu a malý štětec s tvrdými štětinami. Po řádném očištění jsem chtěl změřit kapacitu takto vytvořené sondy, ovšem můj multimetr nebyl tuto kapacitu schopný změřit. Zkusil jsem tedy změřit odpor mezi elektrodami a po ustálení mi multimetr ukazoval hodnotu řádově ve stovkách Ohmů. Po řádné optické kontrole s pomocí lupy jsem zjistil, že stále nějaká přebytečná barva na sondě zůstala a spojuje obě elektrody. Celý proces broušení a čištění jsem opakoval ještě asi třikrát. Poté již odpor vzrostl zhruba na hodnotu $0.5M\Omega$. Barva pravděpodobně zatekla mezi jednotlivé vrstvy výtisku a tuto barvu se mi již nepodařilo odstranit. Následně jsem na celý povrch sondy nanesl dvě vrstvy epoxidové pryskyřice pro izolaci elektrod a mechanickou ochranu vodivé barvy. Během následného testování jsem zjistil, že kapacita sondy je velmi nestabilní, ikdyž je ve stálém prostředí. Kromě zbytků barvy mezi elektrodami je to pravděpodobně způsobeno také velkým měrným odporem barvy.

4. Čtvrtá verze sondy vychází z verze předchozí, ale místo barvy na bázi uhlíku je použita vodivá barva na bázi stříbra[22] (na obrázku 3.6), která má mnohem vyšší vodivost. Dále je také lépe aplikovatelná díky konstrukci pera s tenkou špičkou. Pro tuto verzi sondy jsem si na 3D tiskárně vytiskl hladký válec, bez drážek pro barvu. Na hotový výtisk jsem pak



Obrázek 3.5: Vodivá barva Bare Conductive

stříbrnou barvou ručně nakreslil již osvědčenou hřebenovou strukturu. Dříve zmíněná výhoda konstrukce pera však platí pouze pro hladké povrchy, na které se kreslí velmi dobře. U 3D výtisku byl opět problém s vroubkami tvořenými jednotlivými vrstvami PLA. Pro dokonalé vodivé propojení bylo potřeba aplikovat relativně velké množství barvy, která má velmi nízkou viskozitu a tak se občas stalo, že barva stekla spárou mezi jednotlivými vrstvami a zkratovala obě elektrody. Oproti předchozí verzi bylo odstraňování těchto zkratů dost náročné a vyžadovalo precizní práci se skalpelem, protože brusným papírem bych narušil i hřebenovou strukturu. Další problém se vyskytl při napojování hřebenové struktury na přívodní vodiče. Toto jsem řešil tak, že jsem po celém obvodu přilepil měděnou pásku v místě spojných částí hřebenové struktury. K té jsem připájel přívodní vodiče a následně aplikoval stříbrnou barvu na propojení měděné pásky s již nanesenou barvou. Následně jsem opět na celý povrch sondy nanesl dvě vrstvy epoxidové pryskyřice. Při následném testování byla kapacita sondy opět nestabilní, což bylo pravděpodobně způsobeno přechodovým odporem mezi měděnou páskou a vodivou barvou. Další nevýhodou bylo, že jsem na jednu sondu spotřeboval zhruba polovinu stříbrné barvy, takže i z ekonomického hlediska byla tato verze nevýhodná.



Obrázek 3.6: Vodivá barva Chemtronics CircuitWorks

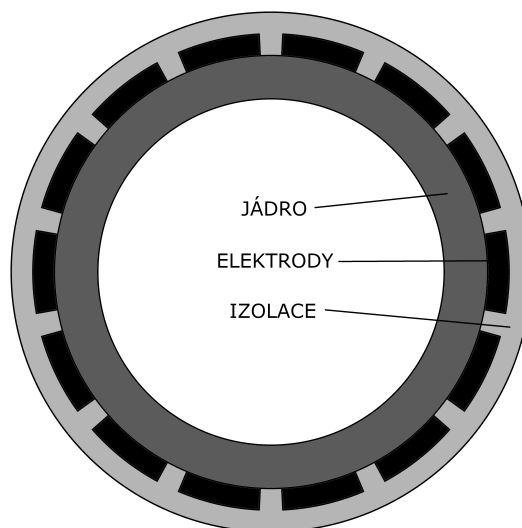
5. Finální verze spojuje výhody verzí 2 a 4 a eliminuje jejich problémy. Základní konstrukce je opět tvořena 3D tištěným hladkým válcem a hřebenová struktura je tvořena samolepicí měděnou páskou.

Při tvorbě prvního prototypu finální verze jsem nejprve na vytištěný válec nalepil měděnou pásku do hřebenové struktury úplně stejně jako u druhé verze sondy. Po ověření dostatečné kapacity a stability jsem měl v plánu na sondu opět aplikovat dvě vrstvy epoxidové pryskyřice. Avšak během vytvrzování první vrstvy se postupně všechny měděné

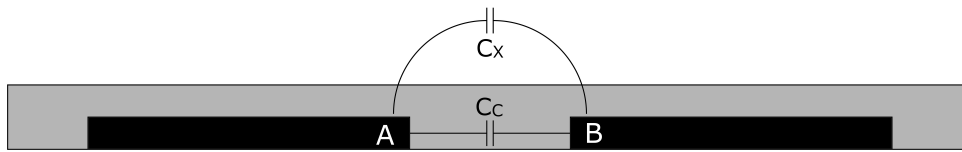
pásky odlepily od válce a držely už jen na koncích, kde byly připájeny ke spojným částem hřebenu. Pryskyřice pravděpodobně naleptala lepidlo, které je na samolepících měděných páskách, takže bylo potřeba tyto pásky nejprve nějak zajistit.

Při tvorbě druhého prototypu jsem tedy nejprve omotal celou hřebenovou stukturu elektrikařskou páskou a až poté aplikoval dvě vrstvy pryskyřice (na úvodním obrázku 3.2 je pro názornost podoba sondy bez elektrikařské pásky). Elektrikařská páska by jako izolace sice stačila, ale nemá dostatečnou mechanickou odolnost, která je potřeba při instalaci sondy metr pod povrch půdy. Mechanická odolnost je v tomto případě zajištěna právě dvěma vrstvami epoxidové pryskyřice, která je po dokonalém vytvrzení (zhruba 14 dní) dostatečně pevná a odolná. Zároveň také zajišťuje vodotěsnost výsledné konstrukce, protože zaplní i mezery, které mohly vzniknout nedokonalostí 3D tisku a také mezery mezi jednotlivými díly. Během následného testování jsem ověřil, že finální verze sondy má kapacity srovnatelné s druhou verzí, tedy zhruba $50pF$ na vzduchu a $300pF$ ve vodě.

Na obrázku 3.7 je příčný řez konstrukcí finální verze sondy. Jádro je vytištěné z PLA na 3D tiskárně, elektrody jsou ze samolepící měděné pásky o tloušťce $35\mu m$ a izolace je kombinací elektrikařské pásky a dvou vrstev epoxidové pryskyřice. Na obrázku 3.8 jsou vyznačeny jednotlivé dílčí kapacity mezi dvěma sousedními elektrodami A a B . Kapacita C_C je konstantní složkou kapacity a je tvořena hranami elektrod a dielektrikem s konstantní permitivitou. Kapacita C_X je proměnnou složkou kapacity a je tvořena plochami elektrod a dielektrikem s proměnnou permitivitou (vzduch, půda, voda). I v proměnné kapacitě C_X je konstantní offset daný fixní permitivitou části dielektrika - izolace překrývající plochy elektrod.



Obrázek 3.7: Řez finální verzí sondy



Obrázek 3.8: Měřené kapacity finální verze sondy

Další možností, o které jsem při návrhu sondy uvažoval, je použití Flex PCB (flexibilní plošný spoj, například se používá u propojování displejů ke klasické desce plošných spojů, nebo u připojení kapacitních dotykových panelů, u kterých je přímo na tomto Flex PCB připájen i vyhodnocovací integrovaný obvod a další nezbytné součástky). Velkou výhodou by byla rychlost a jednoduchost výroby sondy - stačilo by tuto Flex PCB přilepit k základní konstrukci - válci a připájet přívodní vodiče. Další výhodou by byla vyšší kapacita a vyšší rozsah, protože by u tohoto řešení mohla být použita mnohem hustší hřebenová konstrukce. Naopak zásadní nevýhodou je ekonomická náročnost tohoto řešení, protože by cena 5 sond (na 1 senzor) převyšovala cenu kompletní měřící jednotky se sondami z měděné pásky.

■ 3.2 Převodník C-F

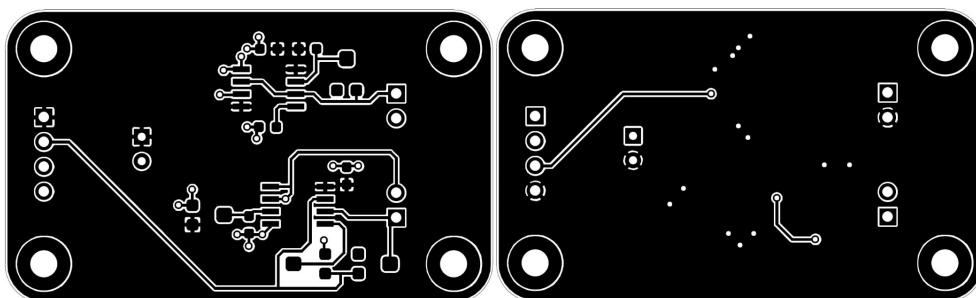
Dalším krokem při realizaci měřící jednotky byl návrh obvodu, který bude převádět signál ze sondy na signál, který by byl dobře zpracovatelný mikrokontrolérem. Vstupní veličinou do tohoto obvodu je tedy kapacita sondy. U výstupní veličiny jsem se rozhodl mezi dvěma možnostmi. První možností byla analogová hodnota výstupního napětí, která by se dala snadno měřit AD převodníkem. U této varianty by však nastaly dva problémy. Prvním problémem je nepřesnost měření napětí způsobená indukci šumu na dlouhých vodičích (zhruba 1m u nejvzdálenější sondy). Druhým problémem je nedostatek pinů mikrokontroléru. Druhou a použitou možností výstupní veličiny je frekvence, kterou lze snadno a přesně měřit pomocí časovače mikrokontroléru.

■ 3.2.1 Prototyp převodníku

Rozhodl jsem se otestovat dva převodníky C-F (kapacita-frekvence), jeden s časovačem TLC555 a jeden s operačním zesilovačem LMV358.

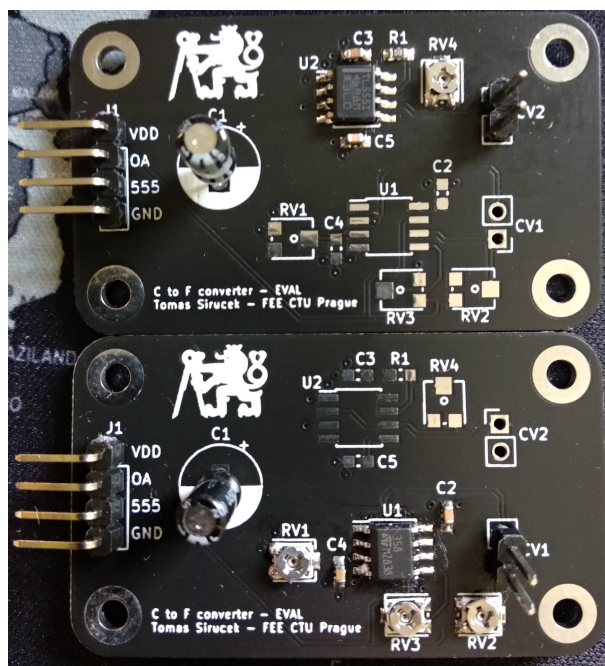
■ Návrh prototypu

Pro testovací účely jsem navrhl desku s oběma typy převodníku, kompletní schéma této desky je na obrázku 3.9. Časovač TLC555[23] od společnosti Texas Instruments je nízkopříkonovou verzí klasického integrovaného obvodu



Obrázek 3.10: Návrh dvouvrstvé DPS pro testování verzí převodníku C-F

Po dokončení návrhu DPS jsem objednal 5 kusů u společnosti JLCPCB a zhruba po třech týdnech desky dorazily. Pro testování jsem osadil jednu desku pouze součástkami k obvodu s časovačem TLC555 a druhou desku pouze součástkami k obvodu s operačním zesilovačem LMV358, osazené desky jsou na obrázku 3.11 (TLC555 nahoře, LMV358 dole).



Obrázek 3.11: Osazené desky pro testování verzí převodníku C-F

■ Testování prototypu

Při testování jsem se zaměřil především na 4 parametry: spotřeba, rozsah výstupní frekvence, napěťové úrovně a stabilita signálu v čase. Stabilita byla v obou případech stejná (vyhovující), ostatní parametry jsou shrnuty v tabulce 3.1. Z tabulky je patrné, že řešení s operačním zesilovačem LMV358 má sice zhruba poloviční spotřebu oproti řešení s časovačem TLC555, ale na druhou

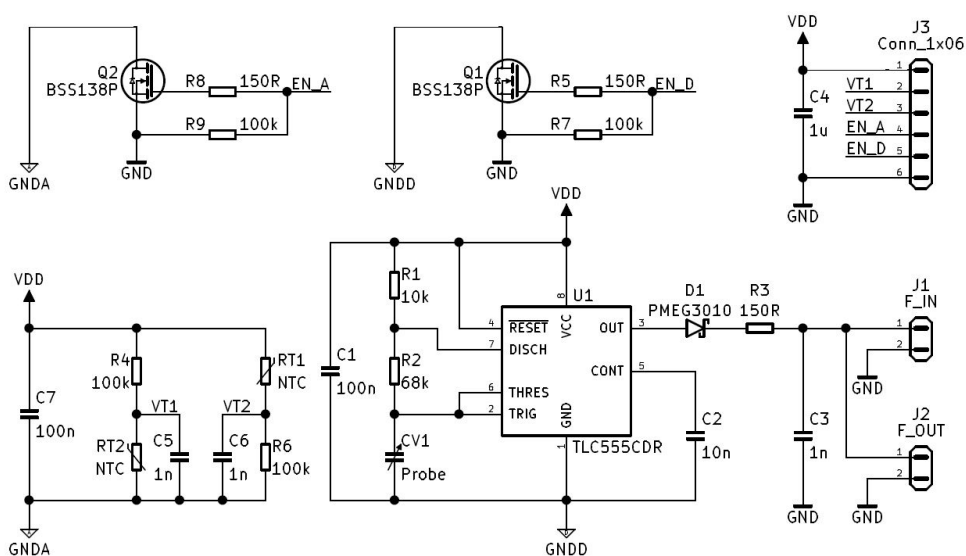
stranu má mnohem menší frekvenční rozsah, což by mohl být v budoucnu problém při případné změně konstrukce sondy. Dále také horní napěťová úroveň (logická úroveň 1) není dostatečná. Podle dokumentace[9] mikrokontroléru STM32WL55CC, který bude použit na vyhodnocování signálu, je minimální napětí pro logickou úroveň 1 $V_{IH} = 0.7 \cdot V_{DD} = 2.3V$ při napájecím napětí $V_{DD} = 3.3V$. Nedostatečné parametry zapojení s operačním zesilovačem byly dány především nízkou rychlostí přeběhu (SR - Slew Rate). Řešením by mohlo být použití analogového komparátoru místo operačního zesilovače, zde by ale byl problém s vytvořením umělé země, takže by bylo nutné použít operační zesilovač alespoň pro umělou zem, což by znamenalo nárůst spotřeby, takže by se eliminovala jediná výhoda tohoto zapojení. Po konzultaci výsledků testování s vedoucím práce jsme se rozhodli použít variantu s časovačem TLC555.

Parametr	TLC555	LMV358
Spotřeba [mA]	1.85	0.96
Maximální frekvence [kHz]	2000	175
Napěťové úrovně [V]	0 – 3	0.5 – 2

Tabulka 3.1: Srovnání C-F převodníků

3.2.2 Finální návrh převodníku

Dalším krokem tedy bylo navrhnout a realizovat finální verzi obvodu pro zpracování signálu ze sondy. Kromě samotného převodníku C-F jsem do této verze zakomponoval i jednoduché analogové měření teploty. Kompletní schéma je na obrázku 3.12.



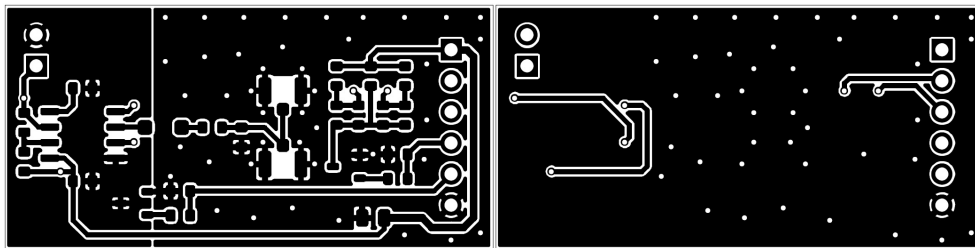
Obrázek 3.12: Schéma obvodu zpracování signálu sondy

Teplota je měřena pomocí dvou NTC termistorů společně se dvěma $100k\Omega$ rezistory zapojenými do modifikovaného Wheatstonova můstku pro zlepšení přesnosti měření teploty. Výstupy můstku jsou ještě filtrovány $1nF$ keramickými kondenzátory a celý můstek je filtrován dalším kondenzátorem s kapacitou $100nF$. Časovač TLC555 je zapojen podle již otestovaného obvodu, ale místo trimru je použit pevný rezistor. Hodnoty rezistorů $R1$ a $R2$ určují převodní konstantu a střihu výstupního signálu a jsou voleny tak, aby maximální výstupní frekvence byla kolem $200kHz$. Finální vzorce pro periodu a střihu výstupního signálu jsou:

$$T_{OUT} = 0.693 \cdot (R1 + 2 \cdot R2) \cdot CV1 = 101178 \cdot CV1,$$

$$DC_{OUT} = 100 \cdot \left(1 - \frac{R2}{R1 + 2 \cdot R2}\right) \approx 53\%.$$

Dále je na výstupu časovače zařazen RC dolnoproustný filtr pro potlačení vyšších harmonických, které by vyzařovaly zbytečné rušení. Dále je pro potlačení rušení signál veden koaxiálním kabelem s konektory U.FL. Vzhledem k tomu, že je prakticky nemožné najít takový kabel i s konektory v dostatečné délce, případně by toto řešení bylo finančně náročné, rozhodl jsem se na tuto desku osadit dva konektory, které budou propojené a koaxiální kabely použít vždy mezi dvěma sousedními deskami. Z důvodu propojení všech výstupů jsem na výstup z časovače zařadil ještě schottkyho diodu. Dále jsou na desce použity dva spínací tranzistory, aby bylo možné spínat jednotlivé sondy zvlášť (sondy není možné vyhodnotit najednou, protože jednotlivé výstupy jsou spojeny do jednoho) a také ke snížení spotřeby mimo dobu měření. Po dokončení a kontrole schématu jsem přistoupil k návrhu DPS (na obrázku 3.13), kterou jsem poté nechal vyrobit opět u společnosti JLCPCB. Výsledná deska má rozměry $40 \times 20mm$.

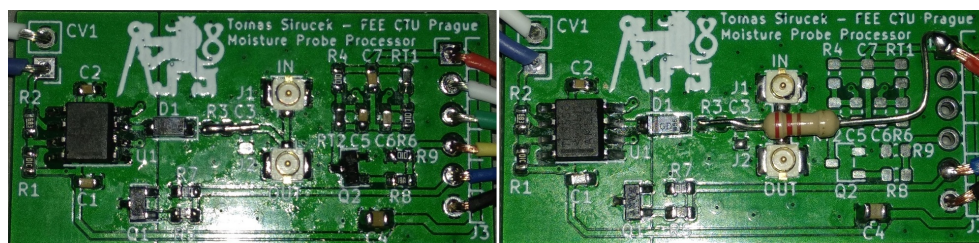


Obrázek 3.13: Návrh dvouvrstvé DPS pro zpracování signálu sondy

■ Testování převodníku

Po osazení první desky jsem připojil sondu, napájecí a kontrolní vodiče. Z důvodu testování v domácích podmínkách a absence osciloskopu jsem použil LEO[26] (Little Embedded Oscilloscope). LEO je platforma z katedry měření FEL ČVUT částečně nahrazující funkci osciloskopu a generátoru signálu, kterou je možné používat na kitu NUCLEO-F303RE s potřebným

firmwarem a softwarem, které jsou volně dostupné na webových stránkách této platformy. Po přivedení napětí jsem osciloskopem měřil výstupní signál desky a zjistil jsem, že výstupní signál je konstantní s napětím kolem 3V a ne obdélník s proměnnou frekvencí podle prostředí sondy. Začal jsem pátrat po možné příčině a po řádném proměření signálů na desce jsem zjistil, že na výstupu časovače TLC555 je signál správný, ale za schotky diodou už ne. Po opakovaném překontrolování schématu jsem zjistil, že kondenzátor dolnopropustného filtru C3 se nejprve nabije přes diodu D1, když je signál na výstupu časovače v logické úrovni 1, ale v druhé polovině periody signálu se již nemá kam vybit. Prvním řešením tedy bylo odstranit kondenzátor C3. Po této úpravě již výstupní signál nebyl konstantní, ale stále nebyl dostatečně kvalitní, frekvence i střída byly velmi proměnlivé. Dalším krokem tedy bylo přemostit diodu D1 obyčejným vodičem. Po této úpravě již byl výstupní signál v pořádku. Přešel jsem tedy k druhé fázi testování - použití více převodníků se spojenými výstupy. Zde nastal další problém odstraněním diody D1. Použité MOSFET tranzistory BSS138[27] mají pravděpodobně moc nízký odpor ve vypnutém stavu ($V_{GS} = 0V$). Tato informace sice není v dokumentaci uvedena, ale testováním jsem zjistil, že i při vypnutém stavu jsou dané převodníky funkční a mají na výstupu alespoň nějaký signál. Tudíž dochází ke kombinaci signálu všech připojených převodníků a není možno změřit frekvenci a tedy ani kapacitu jedné konkrétní sondy. Po několika různých experimentech jsem došel ke zdárnému řešení. Na výstup pouze jednoho převodníku jsem přidal silný pull-up rezistor (rezistor s odporem 220Ω mezi výstup a napájecí napětí), odebral jsem výstupní RC filtr a otočil diodu D1. Ve vypnutém stavu je tak odpor tranzistoru větší než odpor pull-up rezistoru a výstup se téměř nemění, naopak v sepnutém stavu je výstup časovače TLC555 schopný stáhnout napětí výstupu téměř do 0V přes schottkyho diodu D1. Po této úpravě již převodníky pracují korektně i při použití všech pěti sond najednou. Vzhledem k tomu, že se jednalo převážně o menší úpravy, nebylo nutné objednávat nové DPS a jen jsem upravil zapojení na stávajícím návrhu. Toto řešení je vidět na obrázku 3.14: vlevo je upravené zapojení bez pull-up rezistoru (dolní 4 sondy) i se zapojeným měřením teploty, vpravo je zapojení s pull-up rezistorem, který je použit pouze u horní sondy - nejbližší k řídicí desce. Finální schéma i s komentáři a výpočty je k nahlédnutí v příloze této práce.



Obrázek 3.14: Osazené finální verze desky pro zpracování signálu sondy

■ 3.3 Řídící deska

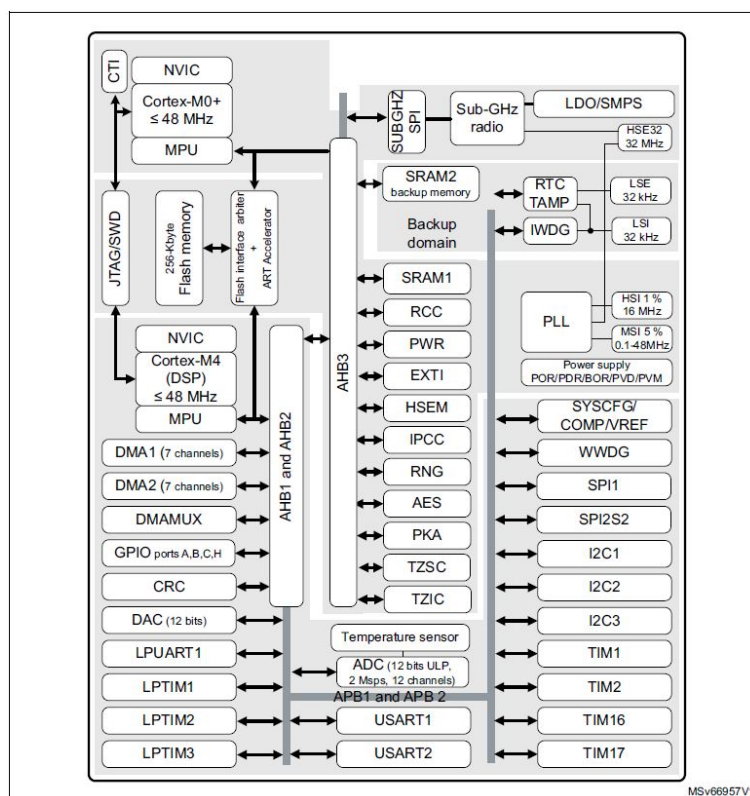
Po dokončení jednotlivých sond a příslušných převodníků byla na řadě realizace řídicí desky měřící jednotky. Úkolem této desky je podle potřeby vypínat a zapínat jednotlivé sondy, měřit teplotu (hodnotu napětí na výstupu měřících můstků s NTC termistory), měřit kapacitu sond (frekvenci na výstupu převodníků), naměřená data zpracovat a bezdrátově odeslat do centrální jednotky. Kromě těchto funkcí byl při výběru řídicího mikrokontroléru kladen důraz také na nízkou spotřebu, protože jde o zařízení s předpokládaným umístěním mimo dosah rozvodu elektřiny, takže je potřeba, aby si vystačilo s bateriovým napájením a dobíjením pomocí fotovoltaických článků. Ideálním kandidátem, který splňuje všechny požadavky je mikrokontrolér z řady STM32WL společnosti STMicroelectronics. Největší výhodou tohoto řešení je, že tyto mikroprocesory mají na čipu integrovanou i periférii pro nízkopříkonovou bezdrátovou komunikaci v ISM pásmech do 1GHz podporující i technologii LoRa.

■ 3.3.1 Mikrokontrolér STM32WL55CC

Řada nízkopříkonových mikrokontrolérů STM32WL od společnosti STMicroelectronics, uvedená na trh v roce 2020, integruje na jednom čipu mikrokontrolér s jádrem ARM Cortex-M4 a Cortex-M0+ (v případě jednojádrové verze jen ARM Cortex-M4) a periférii pro bezdrátovou komunikaci založenou na modulu SX126x společnosti Semtech. Jedná se tedy o první SoC (System on Chip - systém na čipu) na světě, který integruje fyzickou vrstvu LoRa. Kromě LoRa modulace jsou podporovány i další ((G)FSK, (G)MSK, BPSK) ve frekvenčním rozsahu $150 - 960\text{MHz}$. Díky tomu je možné na tomto mikrokontroléru flexibilně a otevřeně implementovat řadu různých protokolů: LoRaWAN, Sigfox, W-MBUS, mioty a další, které podporují zmíněné modulace a frekvenční rozsah. Řadu STM32WL lze tedy výhodně použít pro různé bezdrátové aplikace v rámci sítí LPWAN (Low-Power Wide Area Network - nízkopříkonové sítě s dlouhým dosahem) a IoT (Internet of Things - internet věcí). V rámci programového balíčku k této řadě (STM32CubeWL) jsou také dostupné knihovny k protokolům LoRaWAN a Sigfox[28]. Na obrázku 3.15 je blokový diagram použitého mikrokontroléru a na obrázku 3.16 blokový diagram periférie pro bezdrátovou komunikaci.

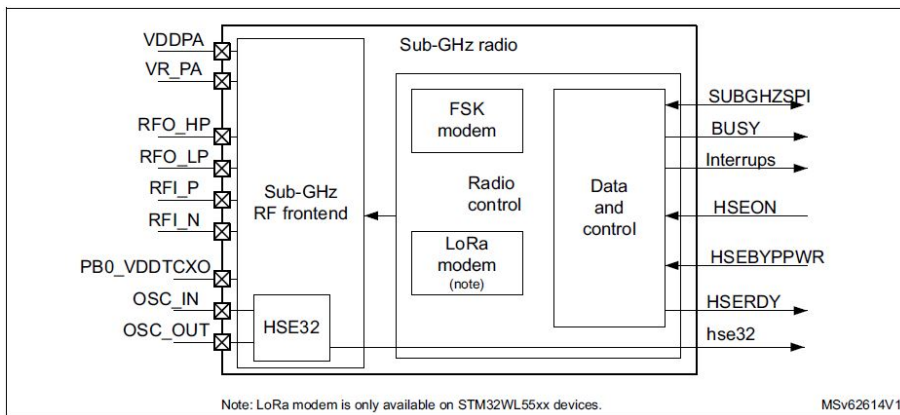
Technické parametry mikrokontroléru: [9] [10]

- Napájecí napětí 1.8 až 3.6V
- Teplotní rozsah -40 až 105°C
- Řada nízkopříkonových módů
- Nízká spotřeba: až 31nA v Shutdown módu



Obrázek 3.15: Blokové schéma mikrokontroléru STM32WL55[9]

- Jedno nebo dvě jádra (ARM Cortex-M4 a Cortex-M0+)
- Maximální frekvence jader 48MHz
- Řada bezpečnostních prvků a periférií (AES 256, RNG, CRC, UID, PKA, SFU, SFI)
- Interní SMPS a LDO regulátory
- Interní RC oscilátory (HSI 16MHz , LSI 32kHz , MSI $100\text{kHz} - 48\text{MHz}$)
- Externí krystaly nebo oscilátory (HSE 32MHz , LSE 32.768kHz)
- PLL pro variabilitu frekvencí interních hodin
- 256kB Flash, 64kB RAM, ochrana proti čtení a zápisu do paměti
- 12-bitový AD a DA převodník, nízkopříkonové komparátory
- DMA řadič pro přenos dat bez zásahu procesoru
- USART, LPUART, SPI, I2C, I2S
- Řada časovačů (16- a 32-bitových), RTC, SysTick, watchdog
- Až 43 vstupně/výstupních pinů, většina 5V tolerantních



Obrázek 3.16: Blokové schéma bezdrátové periferie mikrokontroléru STM32WL55[10]

Technické parametry bezdrátové periferie: [10]

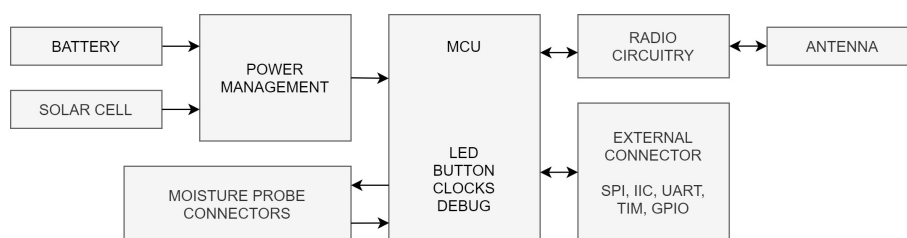
- Frekvenční rozsah 150 až 960MHz
- Modulace: LoRa, (G)FSK, (G)MSK, BPSK
- Citlivost přijímače až $-148dBm$ (LoRa)
- Programovatelný vysílací výkon až $+22dBm$ pro HP výstup, nebo $+15dBm$ pro LP výstup
- Rychlost přenosu až 17.4kbps pro LoRa a 300kbps pro (G)FSK a (G)MSK

Společnost STMicroelectronics dodává také programový balíček - STM32-CubeWL[29]. Součástí tohoto balíčku jsou knihovny pro práci s jednotlivými periferiemi mikrokontroléru (HAL, LL, CMSIS), knihovny třetích stran (FatFS, FreeRTOS, LoRaWAN, Sigfox) a také vzorové programy pro obsluhu jednotlivých periferií.

Existuje řada vývojových prostředí umožňujících programování mikroprocesorů řady STM32 (IAR Embedded Workbench for Arm, Keil uVision, Arm MBED a další) a v roce 2019 vydala společnost STMicroelectronics vlastní vývojové prostředí STM32CubeIDE[30], do kterého integrovali i do té doby samostatně fungující konfigurační nástroj STM32CubeMX pro založení a inicializaci projektu.

3.3.2 Obvodové řešení

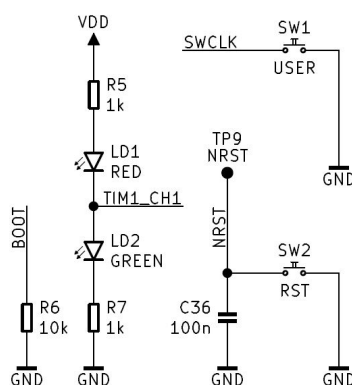
Na obrázku 3.17 je blokové schéma řídicí desky měřicí jednotky. Kompletní elektrické schéma desky je v příloze této práce (Sensor Main Unit).



Obrázek 3.17: Blokové schéma řídicí desky

Schéma

Při návrhu hlavní části řídicí desky jsem vycházel především z materiálů výrobce[9][10] a také z vlastních zkušeností s návrhem obvodů s mikrokontroléry řady STM32. Krystaly o frekvencích $32MHz$ a $32.768kHz$ jsou připojeny standardně se zatěžovacími keramickými kondenzátory. V případě $32MHz$ krystalu nebudou kondenzátory osazeny, protože použitý mikrokontrolér má interní kondenzátorové banky na vstupech pro přesné ladění frekvence, které je nutné pro správnou funkci periferie pro bezdrátovou komunikaci. Externí součástky potřebné pro funkci interního spínaného regulátoru jsou zapojeny přesně dle dokumentace bez jakýchkoli úprav. Na obrázku 3.18 je schéma části obvodu, která zajišťuje jednoduchou interakci uživatele s deskou (HMI - Human Machine Interface).



Obrázek 3.18: Schéma HMI části řídicí desky

K resetovacímu pinu mikrokontroléru (NRST) je dle doporučení výrobce připojen kondenzátor s kapacitou $100nF$ pro zvýšení odolnosti proti rušení a zároveň pro správné časování interního resetovacího obvodu. Dále je tento pin přes resetovací tlačítko připojen na zem, aby bylo v případě potřeby možné mikrokontrolér manuálně resetovat. Ačkoliv spousta návrhářů dává na resetovací pin i externí pull-up rezistor, není to potřeba, protože mikrokontrolér má na tomto pinu interní pull-up rezistor. Naopak použití externího pull-up rezistoru může způsobit problémy při startu mikrokontroléru, protože nemusí být dodržena časová konstanta RC článku a tudíž není dodržen minimální čas, kdy musí být tento pin v logické úrovni 0.

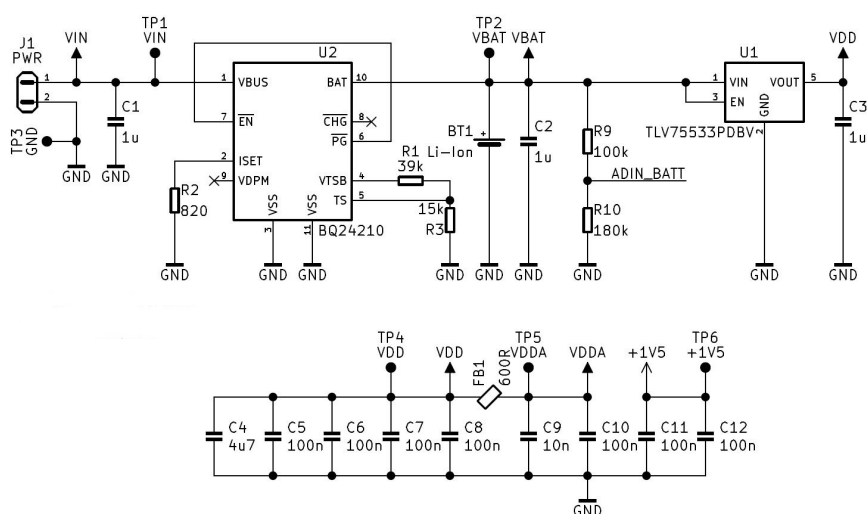
BOOT pin, který slouží k volbě adresy programu, který se po resetu spustí (interní bootloader nebo uživatelský program ve Flash paměti). Kromě hodnoty BOOT pinu občas záleží i na hodnotách dalších bitů v registrech OPTION BYTE, ale ve výchozím nastavení platí, že pokud je při resetu tento pin v logické úrovni 0, pak se spouští uživatelský program, v opačném případě se spouští interní bootloader, který umožňuje naprogramovat mikrokontrolér přes UART či SPI periferie. Tento pin jsem tedy připojil přes rezistor s odporem $10k\Omega$ na zem, abych zajistil, že se po resetu bude spouštět můj kód v paměti Flash. Zároveň jsem však tento pin vyvedl i na externí konektor, aby bylo v případě potřeby možné vynutit spuštění bootloaderu.

Pro jednoduchou indikaci při vývoji programu jsem se rozhodl přidat také dvě LED - zelenou a červenou. Z důvodu nedostatku volných pinů mikrokontroléru jsem se rozhodl připojit obě LED k jednomu pinu (PA8 - pin č. 16) a to tak, že červená LED s ochranným rezistorem je připojena mezi pin a napájení a zelená LED je s ochranným rezistorem připojena mezi pin a zem. Obě LED je tak možno nezávisle ovládat následujícím způsobem:

- **Obě LED zhasnuty:** pin je nastaven ve vstupním režimu. Do/z pinu tedy neteče žádný proud a úbytek napětí na obou LED je větší než napájecí napětí.
- **Svítlí jedna LED:** pin je nastaven ve výstupním režimu a výstupní hodnota se odvíjí od volby rozsvícené LED (logická úroveň 0 pro rozsvícení červené LED, logická úroveň 1 pro rozsvícení zelené LED).
- **Obě LED svítí:** tohoto stavu lze docílit tak, že pin bude přepínat mezi oběma logickými úrovněmi s vysokou frekvencí. Nejjednodušší řešení je tedy přivést na pin PWM signál se střídou 50% - ke zvolenému pinu je možno připojit kanál 1 časovače 1 (TIM1_CH1).

Dále jsem se rozhodl na desku přidat jedno uživatelské tlačítko pro případ potřeby jednoduchého vstupu. Z důvodu nedostatku volných pinů jsem musel toto tlačítko připojit ke stejnému pinu, který je používán debug periferií. Toto tlačítko tedy není možné použít při ladění programu, protože dochází k odpojení debuggeru.

Na obrázku 3.19 je schéma napájecí části řídicí desky. Celou měřicí jednotku napájí jeden jednočlánek Li-Ion akumulátor se jmenovitým napětím $3.6V$ (maximální napětí je $4.2V$). Pro dosažení energetické soběstačnosti celého zařízení je tento akumulátor dobíjen fotovoltaickým článkem s udávaným maximálním výstupním výkonem $49.5mW$. Pro dobíjení akumulátoru je použit integrovaný obvod společnosti Texas Instruments BQ24210[31]. BQ24210 je lineární nabíjecí obvod pro Li-Ion akumulátory přímo určený pro nabíjení pomocí fotovoltaických článků a schopný nabíjet proudem až $800mA$. Tento obvod je zapojen podle materiálu výrobce v režimu sledování akumulátoru, což je ideální režim pro nabíjení vysokoimpedančními zdroji jako jsou fotovoltaické články. Rezistory R1 a R3 zde slouží jako náhrada teplotního senzoru



Obrázek 3.19: Schéma napájecí části řídicí desky

akumulátoru, protože použitý akumulátor teplotní senzor nemá. Vzhledem k tomu, že akumulátor bude nabíjen fotovoltaickým článkem s velmi nízkým výkonem, není potřeba hlídat teplotu akumulátoru. Rezistor R2 určuje maximální nabíjecí proud I_{MAX} podle vzorce:

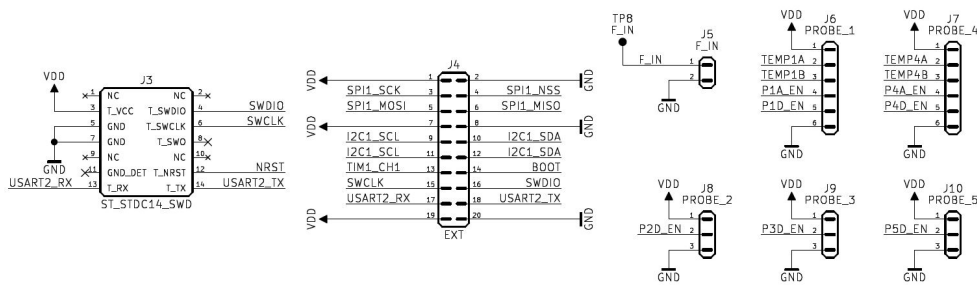
$$I_{MAX} = \frac{390}{R2} = \frac{390}{820} \approx 0.5A.$$

Rezistory R9 a R10 tvoří napěťový dělič, který umožňuje AD převodníkem mikrokontroléru měřit napětí baterie.

Pro regulaci napájecího napětí 3.3V je použit regulátor společnosti Texas Instruments TLV755P[32]. TLV755P je lineární regulátor s nízkým úbytkem napětí (LDO - Low Dropout Voltage) 238mV při maximálním proudu 500mA a nízkým klidovým proudem 25µA. Tento regulátor je také zapojen podle materiálu výrobce. Při vývoji jsem zvažoval použití spínaného regulátoru (SMPS - Switched Mode Power Supply) místo lineárního, ale v souvislosti s bezdrátovou komunikací jsem se chtěl vyhnout dalšímu zbytečnému rušení, takže jsem nakonec použil zmíněný lineární regulátor.

Dále jsou do napájecí části zahrnuty i všechny nezbytné blokovací kondenzátory: jeden keramický kondenzátor s kapacitou 4.7µF pro celý mikrokontrolér a jeden keramický kondenzátor s kapacitou 100nF u každého napájecího pinu (případně další keramický kondenzátor s kapacitou 33pF u některých napájecích pinů podle dokumentace výrobce). Napájení analogové části mikrokontroléru je přivedeno z digitálního napájení přes feritový korálek s impedancí 600Ω při frekvenci 100MHz a blokováno dvojicí keramických kondenzátorů s kapacitami 100nF a 10nF pro eliminaci rušení z digitální části.

Na obrázku 3.20 je schéma zapojení většiny konektorů na desce. Výjimkou jsou pouze konektory v napájecí části (J1 pro fotovoltaický článek a BT1 pro



Obrázek 3.20: Schéma konektorů řídicí desky

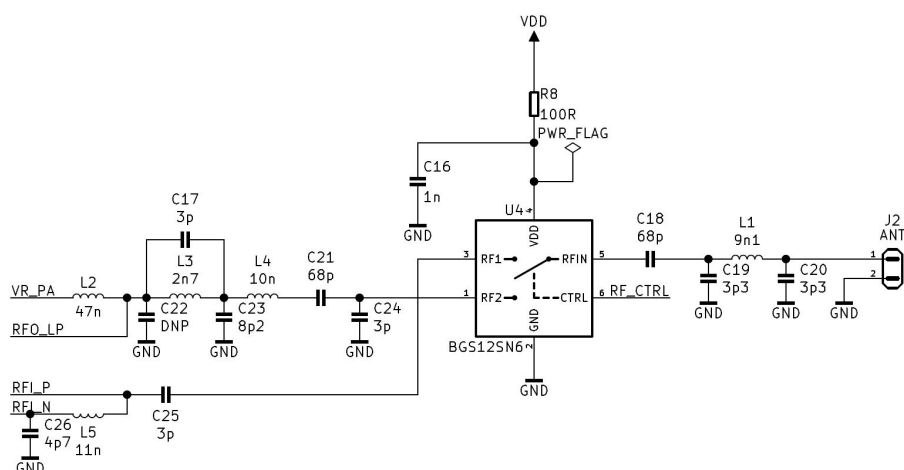
Li-Ion akumulátor) a anténní konektor, který je součástí následující RF části desky.

Konektor J3 je standardní STDC14 konektor pro ladící rozhraní, který je osazen například na programátoru a debuggeru STLINK-V3, který používám na programování a ladění mikrokontrolérů řady STM32. Jedná se o SMD kolíkovou lištu 2x7 s roztečí 1.27mm. Konektor je připojen na debug periferii pomocí rozhraní SWD (signály SWDIO a SWCLK, případně i SWO), k resetovacímu pinu a také k periférii USART2. Připojení na UART je zde výhodné použít, protože STLINK-V3 obsahuje kromě samotného programátoru a debuggeru také převodník UART-USB (VCP - Virtual COM Port) a je tak možné pomocí jednoho konektoru programovat a ladit mikrokontrolér a současně využívat sériovou komunikaci mezi mikrokontrolérem a počítačem (nejčastěji posílat z mikrokontroléru do počítače zprávy o běhu programu, případně o výskytu chyb a následně tuto komunikaci logovat pro pozdější zpracování).

Konektor J4 slouží především k připojení dodatečných komponent v případě potřeby. Je připojen ke všem komunikačním perifériím (UART, SPI, I2C), ke vstupu či výstupu časovače a také k BOOT pinu. Může být také použit pro naprogramování mikrokontroléru přes UART pomocí převodníku UART-USB v případě nedostupnosti klasického programátoru.

Zbylé konektory slouží k připojení jednotlivých sond. J5 je U.FL koaxiální konektor a slouží k připojení koaxiálního vedení frekvenčního signálu ze sond. Konektory J6 a J7 jsou kolíkové lišty 1x6 s roztečí 2.54mm a slouží k připojení převodníků, které jsou osazeny teplotním snímaním (NTC můstek). Piny TEMPxA a TEMPxB jsou výstupy NTC můstků, piny PxA_EN slouží k zapnutí či vypnutí měření teploty a piny PxD_EN slouží k zapnutí či vypnutí převodníků C-F. Konektory J8 až J10 jsou kolíkové lišty 1x3 s roztečí 2.54mm a slouží k připojení převodníků, které nejsou osazeny snímaním teploty.

Na obrázku 3.21 je schéma vysokofrekvenční části řídicí desky. Při návrhu jsem čerpal především z dokumentu AN5407[33] (Optimized RF board layout for STM32WL Series), což je dokument od výrobce mikrokontroléru popisující především návrh plošného spoje, ale jsou zde k dispozici i potřebná



Obrázek 3.21: Schéma RF části řídicí desky

vzorová zapojení. Případné změny jsem konzultoval s RF expertem společnosti STMicroelectronics.

J2 je koaxiální konektor U.FL, ke kterému je následně připojena redukce na klasický SMA konektor do panelu (někdy označována jako U.FL SMA pigtail), na něž je následně instalována anténa. Za tímto konektorem je obvod impedančního přizpůsobení antény (C19, L1, C20) a filtrace stejnosměrné složky signálu (C18). Následuje vysokofrekvenční přepínač BGS12SN6[34] v pouzdře TSNP-6 o rozměrech $1.1 \times 0.7\text{mm}$, který propojuje anténu buď s vysílačem nebo přijímačem. Před vstupními piny přijímače (RFI_P a RFI_N) je zařazen ještě symetrizační člen (angl. balun), který zajišťuje převod mezi nesymetrickým a symetrickým vedením. Za výstupem vysílače (RFO_LP) je zařazen filtrační obvod pro kondicionování signálu. Výstup je napájen přes cívku L2 pinem VR_PA.

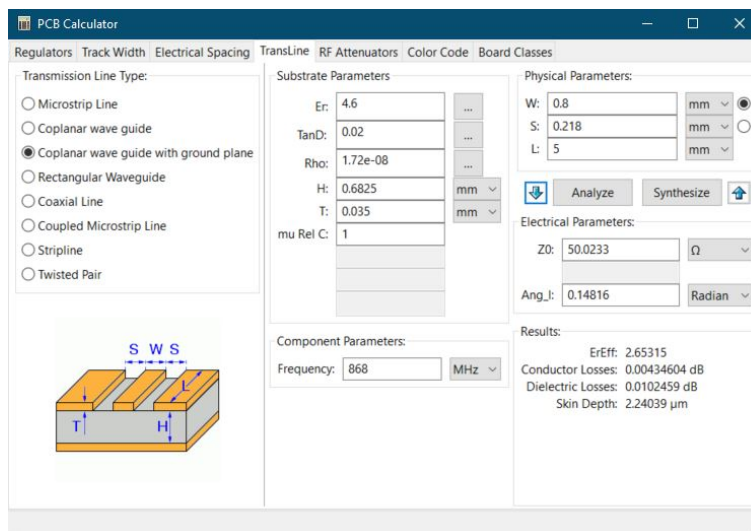
■ Návrh DPS

Po dokončení a kontrole schématu jsem se pustil do návrhu desky plošných spojů. Při návrhu této desky byla nejkritičtější vysokofrekvenční část, protože každá sebemenší chyba může ve výsledku velmi negativně ovlivnit kvalitu bezdrátové komunikace. I při návrhu DPS jsem opět čerpal především z dokumentu AN5407[33] (Optimized RF board layout for STM32WL Series). Veškeré RF vedení bylo potřeba navrhnout tak, aby splňovalo charakteristickou impedanci 50Ω pro nesymetrické vedení, případně 100Ω pro symetrické vedení na vstupu přijímače. Rozhodl jsem se, že budu desku opět objednávat u JLCPCB, tak jsem si dopředu zjistil všechny potřebné parametry udávané výrobcem. Především jde o skladbu jednotlivých vrstev desky, relativní permitivitu materiálu jádra desky a tloušťku měděné vrstvy. Zvolil jsem skladbu s označením JLC7628 a finální tloušťkou desky 1mm . Relativní permitivita jádra u této skladby je $\epsilon_r = 4.6$ a řez skladbou je na obrázku 3.22.

Layer	Material Type	Thickness	
Top Layer1	Copper	0.035 mm	
Prepreg	7628*1	0.2 mm	
Inner Layer2	Copper	0.0175 mm	0.5 mm (with copper core)
Core	Core	0.465 mm	
Inner Layer3	Copper	0.0175 mm	
Prepreg	7628*1	0.2 mm	
Bottom Layer4	Copper	0.035 mm	

Obrázek 3.22: Řez skladbou desky s označením JLC7628

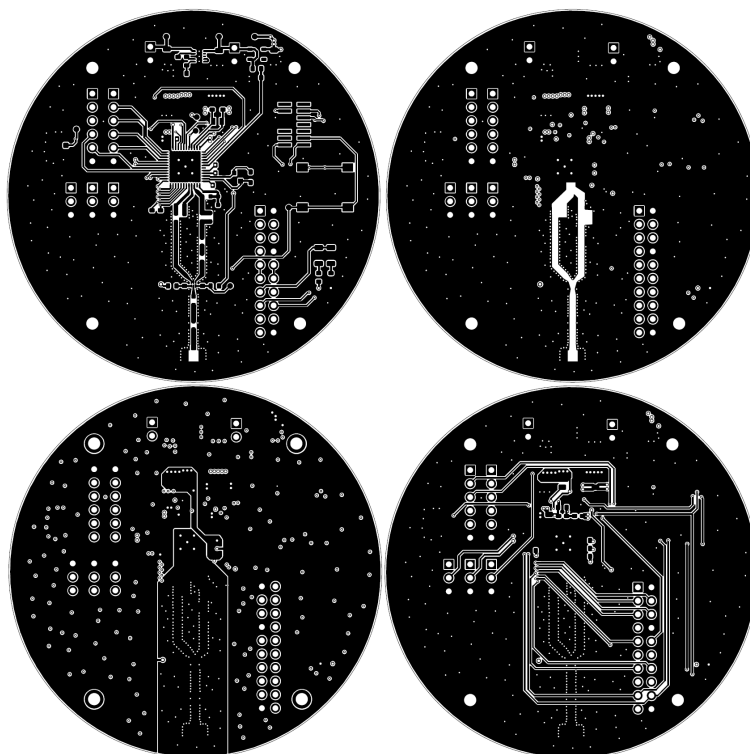
Se znalostí těchto parametrů jsem k výpočtu šířky vedení (W) a šířky mezery mezi vedením a zemí (S) využil program PCB Calculator, který je součástí programového balíčku KiCad. Šířka vedení byla předem dána rozměrem požitých pasivních součástek (kondenzátorů a cívek) v pouzdře 0603 ($1.6 \times 0.8\text{mm}$), takže zbývalo dopočítat šířku mezery. Pro docílení charakteristické impedance 50Ω s danými parametry desky vychází rozměry následovně: $W = 0.8\text{mm}$, $S \approx 0.22\text{mm}$. Jednotlivé nastavené parametry jsou patrné z náhledu programu PCB Calculator na obrázku 3.23. Pro dodržení specifikované vzdálenosti (H) je signálové vedení na vrchní vrstvě. V první vnitřní vrstvě je sice rozlitá měděná plocha připojená na zem, ale vzdálenost od signálového vedení by byla příliš malá (0.2mm), takže je v této vrstvě v místě vedení oblast bez mědi. Zemnicí plocha vedení je tak vytvořena až ve druhé vnitřní vrstvě, která je dedikována napájecímu napětí (je zde rozlitá měděná plocha připojená k VDD), ale v oblasti vedení je do této plochy vnořena druhá měděná plocha připojená na zem.



Obrázek 3.23: Výpočet potřebných rozměrů RF vedení

Při návrhu DPS byla dodržována příslušná návrhová pravidla[35]: dostatek prokovů (především v oblasti RF), žádné ostré spoje (změna směru vedení pod úhlem 90°), plošky součástek plně spojeny s rozlitými měděnými plochami (nejsou použity teplotní profily - thermal relief) především v oblasti

RF, plynulá změna šířky vedení nebo umístění blokovacích kondenzátorů co nejblíže příslušným napájecím pinům. Na obrázku 3.24 je výsledný návrh všech 4 vrstev řídicí desky. Vzhledem k předpokládané podobě měřicí jednotky je deska kruhového tvaru s průměrem 70mm a obsahuje 4 montážní otvory velikosti M2.

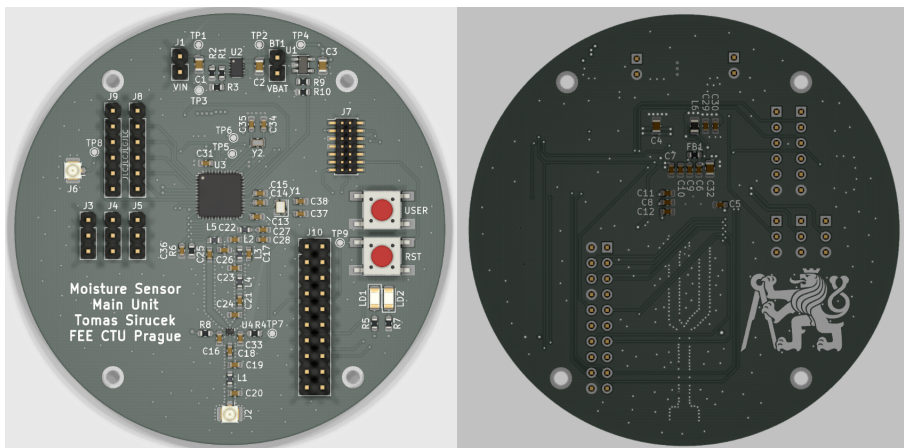


Obrázek 3.24: Kompletní návrh 4-vrstvé řídicí desky

■ Osazení

Při návrhu bylo použito několik součástek, které nejsou úplně vhodné pro domácí ruční pájení, jedná se především o vysokofrekvenční přepínač BGS12SN6 v 6-pinovém pouzdře TSNP-6 o rozměrech $1.1 \times 0.7\text{mm}$, což je v porovnání s pouzdry rezistorů velikost mezi 0603 a 0402. Kromě velikosti je další nevýhodou tohoto pouzdra, že má kontaktní plošky pouze ze spodní strany pouzdra, podobně jako pouzdro LGA (narozdíl od pouzdra QFN, u kterého plošky přesahují i na okrajích pouzdra). Mezi další součástky, které nejsou úplně vhodné pro ruční pájení patří i nabíjecí obvod BQ24210 v pouzdře WSON-10 a mikrokontrolér STM32WL55CC v pouzdře QFN-48. Obě pouzdra mají i středovou kontaktní plochu (anglicky označována jako exposed pad nebo thermal pad - jedná se o plochu uprostřed spodní strany pouzdra, která je spojená s čipem). V ideálním případě by se postupovalo tak, že by se nejprve přes šablonu nanasla pájecí pasta, poté by se osadily všechny součástky a celá deska by se umístila do pájecí pece s nahříváním z obou

stran s přednastaveným teplotním profilem. Kvůli absenci šablony i pájecí pece jsem však musel improvizovat. Nejprve jsem se rozhodl osadit zmíněné problematické součástky. Mikropájkou jsem pocínoval všechny příslušné plošky na desce i na samotných součástkách, poté jsem tyto plošky potřel dostatečným množstvím tavidla a součástky opatně osadil. Bylo potřeba dbát na korektní umístění součástek, aby nebyly posunuty třeba o jednu řadu pinů vedle. Poté jsem desku kvůli absenci pájecí stanice s podehřevem umístil na jednoplotýnkový elektrický vaříč a zapnul na nižší stupeň. Podehřev byl nutný z důvodu velkého odvodu tepla způsobeného rozlitými měděnými plochami ve všech vrstvách. Po dostatečném zahřátí jsem součástky zapájel pájecí stanicí s horkovzduchem. Po vychladnutí jsem desku řádně očistil izopropylalkoholem a zkontroloval kvalitu zapájení součástek. Kontrola byla nejprve optická (pomocí lupy jsem z boku součástek zkontroloval, zda jsou všechny piny zapájené) a poté elektrická (multimetrem jsem změřil substrátové diody). Po ověření správného osazení problematických součástek jsem osadil i zbylé součástky klasickou mikropájkou s tenkým hrotem. Na obrázku 3.25 je 3D náhled výsledné osazené desky.



Obrázek 3.25: 3D náhled řídicí desky

■ Oživení a testování

Po řádném očištění a optické kontrole všech pájených spojů jsem konektorem BT1 (sloužící pro připojení akumulátoru) přivedl napájení z laboratorního zdroje. Prvním krokem při oživení bylo změřit správnost všech napájecích napětí (napájení digitální části 3.3V - VDD z LDO, napájení analogové části - VDDA za filtrem UA1A1P7 a napájení periferie pro bezdrátovou komunikaci 1.5V z interního regulátoru). Jednotlivá napětí jsem měřil pomocí testovacích plošek na desce (testpoint, TP1 až TP6).

Po ověření napájecích napětí bylo dalším krokem testování samotného mikrokontroléru. K programovacímu konektoru J3 jsem připojil STLINK-V3 (programátor a debugger) a z vývojového prostředí Keil uVision jsem se úspěšně



Obrázek 3.26: 3D tištěné díly měřicí jednotky

délka a vzájemná vůle tištěných závitů) a také pro ověření dostatečné pevnosti a tuhosti finální konstrukce.

Dalším krokem při kompletaci měřicí jednotky byla realizace jednotlivých sond (více v podkapitole 3.1 - Kapacitní sonda). Poté bylo potřeba našroubovat na horní stranu všech dílů sond spojovací díl a protáhnout jím vodiče k sondě, protože deska převodníku je umístěna až v dalším průběžném dílu a otvor ve spojovacím dílu je moc malý na protažení této desky. Poté jsem vodiče k sondě zkrátil na potřebnou délku a připájel k osazené desce převodníku. Dále jsem k desce převodníku připájel kabel s napájecími a řídicími vodiči a u desek s NTC můstky jsem připájel i vodiče pro vedení analogového výstupu těchto můstků. Abych se po kompletaci měřicí tyče vyznal ve změti kabelů a vodičů (vizte obrázek 3.27) spojil jsem jednotlivé vodiče analogového vedení s příslušnými kabely smršťovacími bužírkami a všechny konce označil samolepicími štítky s příslušným číslem sondy.

Při kompletaci měřicí tyče jsem postupoval od spodního dílu nahoru. Nejprve jsem k desce převodníku připojil koaxiální kabel o délce 300mm (vzdálenost mezi spodními dvěma sondami) na výstupní konektor (J2) a následně společně s napájecím a řídicím kabelem a analogovými vodiči jsem jej protáhl průběžným dílem. Dále jsem do drážek v průběžném dílu opatrně vložil desku převodníku a následně jsem celý díl přišrouboval k dílu sondy pomocí již



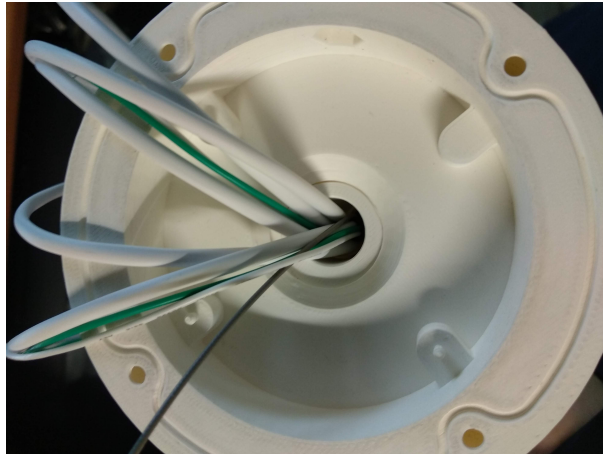
Obrázek 3.27: Jednotlivé sondy s převodníky a kabely

umístěného spojovacího dílu. Dále jsem podobným způsobem přidal ještě jeden průběžný díl a následně jeden díl se sondou. Poté jsem připojil druhý konec koaxiálního kabelu na vstupní konektor (J1) desky druhého převodníku a na výstupní konektor (J2) jsem připojil další koaxiální kabel. Opět jsem všechny kabely a vodiče provlékl dalším průběžným dílem a opatrně umístil desku převodníku do drážek tak, aby kabel a vodiče z předchozího převodníku vedly pod touto deskou, kde je dostatek místa. Stejným způsobem jsem pokračoval až k poslednímu (bílému) průběžnému dílu, na který jsem následně našrouboval ještě spodní díl krabičky, kterým jsem protáhl všechny kabely a vodiče (na obrázku 3.28). Na závěr byla měřící tyč opatřena dvěma vrstvami dvousložkové epoxidové pryskyřice pro zlepšení voděodolnosti a hladkosti povrchu.

Měřící tyč byla kompletována tak, že výsledné hloubky jednotlivých sond pod povrchem zeminy (rozhraní černého a bílého dílu) jsou následující: 0.1, 0.2, 0.4, 0.7 a 1m. Modularita celého systému však umožňuje použití i jiného počtu sond (maximálně 5) v jiných hloubkách (v násobcích 0.1m).

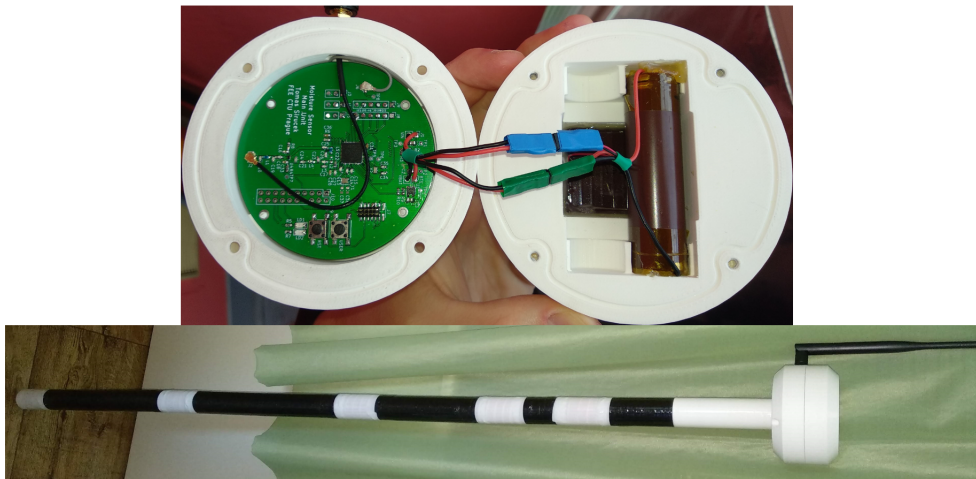
Dále jsem do otvoru ve spodním dílu krabičky nainstaloval SMA konektor pro anténu (konektor je součástí U.FL-SMA redukce). Poté bylo potřeba připájet kabely a vodiče od sond k řídicí desce. Nejprve jsem se tedy rozhodl si kabely označit štítky ještě jednou, tentokrát v místě průchodu do krabičky a zkrátil jsem kabely na vhodnou délku (moc dlouhé by se pod desku nevešly a moc krátké by naopak nešly pořádně připájet). Po připájení kabelů jsem desku nacvakl na trny v krabičce a koaxiální kabel od sond jsem vedl na přední stranu desky mezerou mezi deskou a krabičkou. Nakonec jsem připojil i koaxiální kabel od anténní redukce.

Následovala kompletace vrchního dílu krabičky. Nejprve jsem instaloval fotovoltaický článek do příslušného otvoru a zafixoval tavným lepidlem. Zvažo-



Obrázek 3.28: Průchod kabelů k řídicí desce

val jsem i použití epoxidového lepidla pro lepší trvanlivost spoje, ale případná výměna článku by byla mnohem složitější. Dále jsem k akumulátoru připájel vodiče a na druhý konec jsem nakrimpoval klasické dutinky, které jsou i na vodičích od fotovoltaického článku. Kontakty akumulátoru jsem pak zalepil kaptonovou páskou pro dodatečnou izolaci a akumulátor vložil do vytištěného slotu. Akumulátor nedržel úplně pevně, tak jsem jej ještě pro jistotu zafixoval tavným lepidlem po obou koncích. Na napájecí vodiče z desky jsem ještě nakrimpoval klasické kolíky tak, aby pasovaly do dutinek. Na závěr jsem spojil kolíky a dutinky a vrchní díl krabičky přišrouboval čtyřmi vruty.



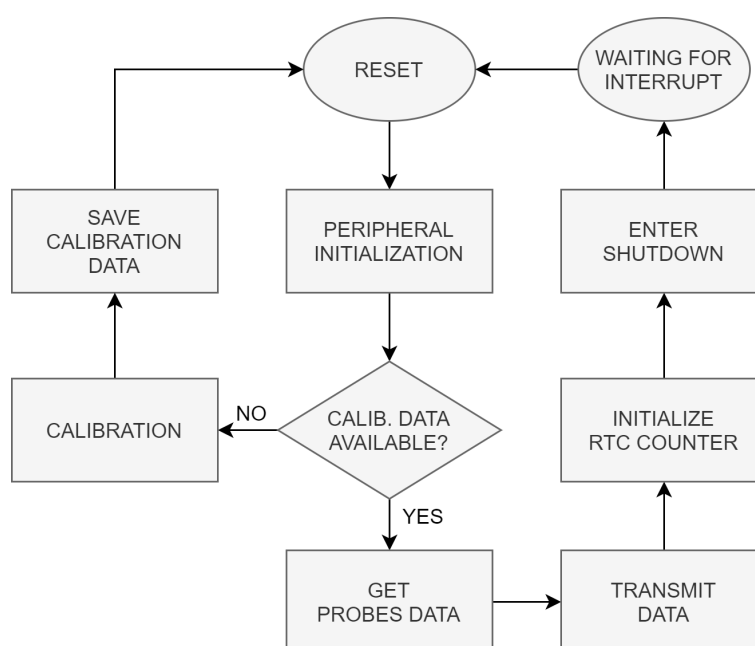
Obrázek 3.29: Hotová měřicí jednotka

3.5 Firmware

Na obrázku 3.30 je blokové schéma finálního programu běžícího v mikrokontroléru měřicí jednotky. Na příloženém CD jsou k dispozici dvě finální

verze programu v archivech: FW\SensorUnitWL_Final-Unidirectional.zip a FW\SensorUnitWL_Final-Bidirectional.zip. Tyto dvě verze se liší pouze průběhem komunikace s centrální jednotkou, více v kapitole 5.1 - Komunikace, ve které je popsána veškerá komunikace mezi měřicí a centrální jednotkou, proto se v této kapitole nebudu zabývat odesíláním dat.

Všechny programy jsou psány na úrovni přístupu k registrům, bez použití knihoven (HAL nebo LL), za využití dokumentace mikrokontroléru[10]. Jediné externí soubory, které jsem použil byly soubory CMSIS (hlavičkové soubory k jádrům Arm Cortex-M a samotnému mikrokontroléru obsahující adresy a datové typy registrů a základní makra) a standardní knihovny jazyka C (`stdio.h`, `stdint.h`, `stddef.h` a `stdarg.h`). Toto řešení jsem volil především pro dosažení maximální úspory času a tudíž i minimalizaci spotřeby.



Obrázek 3.30: Blokové schéma FW měřicí jednotky

3.5.1 Inicializace periferií

Nejprve se nakonfiguruje RTC periferie (Real Time Clock - hodiny reálného času). Tato periferie je použita pro časování intervalů mezi jednotlivými měřeními. Je to jediná periferie, která je zapnutá po celou dobu napájení (i v úsporném režimu). Na začátku konfigurace RTC se musí resetovat zálohovaná doména (Backup Domain) aby bylo možné posléze správně nastavit RTC. Dále se zapne nízkofrekvenční externí krystal (LSE - $32.768kHz$) a povolí se hodinové vstupy do RTC periferie. Následně je možné zahájit proces samotné inicializace RTC, nastavit správnou hodnotu do dekrementálního čítače pro časování intervalů mezi měřeními a tento čítač zapnout.

Dále se nakonfigurují interní hodinové signály. Nejprve se zapne vysokofrekvenční externí krystal (HSE - $32MHz$). Všechny hodinové děličky se nastaví na hodnotu 1, takže všechny interní hodinové signály budou mít stejnou frekvenci. Poté se nastaví latence paměti Flash, aby nedocházelo ke ztrátě dat kvůli nedostatečné rychlosti paměti. Jako zdroj hodinového signálu se následně zvolí externí krystal, takže všechny interní hodinové signály jsou o frekvenci $32MHz$. Na závěr se nakonfiguruje systémový časovač (SysTick) tak, aby generoval přerušeni každou milisekundu.

Pokud je zvolena kompilace v ladícím režimu (v souboru `main.h` je definováno makro `DEBUG_MODE`), nakonfiguruje se i periférie USART2. Tato konfigurace vyžaduje povolení hodinového signálu periférii USART2 a GPIOA. Dále se nastaví samotná periférie na jednosměrnou komunikaci (pouze vysílač) při rychlosti $9600baud$. Na závěr se nakonfigurují použité piny v módu alternativní funkce.

Pro měření teploty a napětí baterie se nakonfiguruje periférie AD převodníku. Nejprve se povolí hodinový signál pro periférie převodníku a použitých pinů a tyto piny se nastaví do analogového módu. Poté je potřeba zapnout interní regulátor AD převodníku a počkat $20\mu s$ na stabilizaci napětí. Dále se nastaví zdroj hodinového signálu SAR AD převodníku a spustí se automatická kalibrace převodníku. Po dokončení kalibrace se převodník zapne a následně se nastaví nejdelší možný vzorkovací čas. Toto nastavení je potřeba, protože NTC můstky mají velkou výstupní impedanci a při krátkém vzorkovacím čase by se interní vzorkovací kondenzátor nenabil na vstupní napětí. Dále se zapne interní napěťová reference pro korekci naměřených hodnot, zvolí se kanály, na kterých se bude měřit a povolí se přerušeni na dokončení převodu.

Pro měření frekvence na výstupu C-F převodníku je potřeba nakonfigurovat časovač TIM2. Nejprve se povolí hodinový signál pro časovač a použité piny. Následně se nakonfiguruje kanál 1 časovače jako vstup, uložení aktuální hodnoty čítače a jeho vynulování na náběžnou hranu vstupního signálu. Na závěr se povolí přerušeni při nulování čítače.

■ 3.5.2 Měření

Na začátku měření se nejprve nakonfigurují řídicí piny sond jako výstupy a všechny piny se nastaví do logické úrovně 0 (všechny sondy jsou vypnuty).

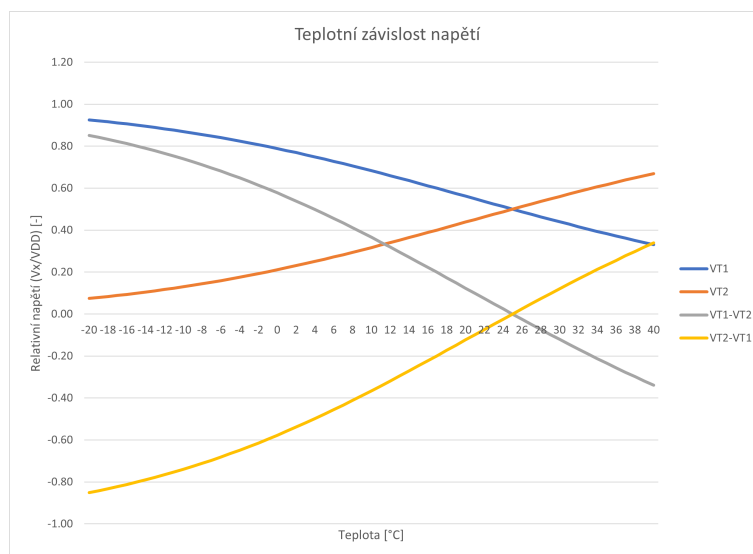
Pro analogové hodnoty (teploty a napětí akumulátoru) se měření provádí čtyřikrát a výsledky se pro lepší přesnost zprůměrují. Nejprve se nainicializuje pole, které uchovává neupravené výsledky AD převodníku tak, že se všechny hodnoty v poli vynulují. Převod AD převodníkem lze z programu spustit nastavením bitu `ADSTART` v registru `ADC_CR` na hodnotu 1. Po dokončení převodu jednoho kanálu je vygenerováno přerušeni, na které reaguje obslužná funkce tak, že přičte hodnotu do odpovídající buňky pole. Po dokončení

převodu na všech kanálech se stejný postup opakuje ještě třikrát. Po čtvrtém měření se obsah pole vydělí 4 a tím se získá průměr hodnot.

Pomocí známé hodnoty napětí interní reference a naměřených hodnot lze spočítat napětí akumulátoru následujícím způsobem:

$$V_{ACU} = \frac{R_9 + R_{10}}{R_{10}} \cdot \frac{V_{REF} \cdot V_ACU_DATA}{V_REF_DATA},$$

kde R_9 a R_{10} jsou hodnoty rezistorů odporového děliče u akumulátoru, V_{REF} je napětí interní reference, V_ACU_DATA je digitální hodnota naměřeného napětí akumulátoru a V_REF_DATA je digitální hodnota naměřeného napětí interní reference. Dále je potřeba spočítat teplotu z naměřených hodnot. Na obrázku 3.31 je graf závislosti jednotlivých napětí na teplotě. Jednou z možností výpočtu teploty bylo proložit body grafu polynomem a počítat teplotu pomocí jeho koeficientů. Pro přesnost výpočtu lepší než $1^\circ C$ by však byl potřeba polynom alespoň třetího stupně s velmi malými koeficienty, což by způsobilo problematický výpočet na mikrokontroléru. Nakonec jsem se rozhodl použít přepočtení pomocí tabulky, kdy index tabulky odpovídá teplotě v rozmezí -20 až $40^\circ C$ a hodnota v tabulce odpovídá digitální hodnotě napětí $VT2 - VT1$. Jednotlivé části mezi hodnotami tabulky jsou poté aproximovány přímkou pro dosažení lepšího rozlišení.



Obrázek 3.31: Závislost výstupního napětí NTC můstku na teplotě

Pro měření frekvencí na výstupech převodníků C-F se postupně zapíná vždy jen jeden převodník pomocí řídicích pinů. Samotné měření probíhá tak, že se nejprve čeká 32 period vstupního signálu na ustálení a poté se změří čas 32 period vstupního signálu. Poté se podle kalibračních dat pro vzduch a vodu (tato data jsou pro každou sondu jiná - eliminují se tím rozdíly v kapacitě sond dané konstrukcí) naškáluje naměřená hodnota do stupnice, kde 0 odpovídá sondě umístěné ve vzduchu (0% objemové vlhkosti) a 10000 odpovídá sondě umístěné ve vodě (100% objemové vlhkosti).

Naměřená data jsou následně bezdrátově odeslána do centrální jednotky (kapitola 5.1 - Komunikace).

■ 3.5.3 Kalibrace sond

Po úvodní inicializaci periférií program zkontroluje, zda jsou v paměti Flash uložené kalibrační konstanty (na adrese `CALIB_DATA_ADDRESS`). Pokud jsou data k dispozici, uloží se do paměti RAM (pole `PROBE_CALIB_AIR` a pole `PROBE_CALIB_WATER`). Pokud je paměť na daném místě prázdná (obsah paměti je `0xFFFFFFFF`), provede se kalibrace sond.

Nejprve se nakonfigurují piny, podobně jako při měření a poté program běží ve smyčce, která bliká LED (jednou zelená a jednou červená). Tento typ blikání značí připravenost na kalibraci sond ve vzduchu (0% objemové vlhkosti). Kalibrace je zahájena stiskem uživatelského tlačítka SW1. Proběhne klasické měření frekvencí podle předchozí podkapitoly, ale místo přepočtu na vlhkost se doba 32 period vstupního signálu uloží do RAM (pole `PROBE_CALIB_AIR`). Následně se program dostane do smyčky, která bliká LED způsobem dvakrát zelená a jednou červená. Tento způsob blikání značí připravenost na kalibraci sond v čisté vodě (100% objemové vlhkosti). Kalibrace je opět zahájena stiskem uživatelského tlačítka a data jsou uložena do pole `PROBE_CALIB_WATER`.

Následuje uložení kalibračních konstant do paměti Flash k čemuž je potřeba nejprve odemknout tuto paměť sérií zápisů správných hodnot do registru `FLASH_KEYR`. Následně je nutné počkat, až se vynuluje příznak zamčení Flash a zkontrolovat, zda nedošlo k chybě. Pokud je vše v pořádku, je možné data zapsat do paměti. Po úspěšném zapsání dat se paměť opět zamkne, aby nedošlo k neúmyslnému zápisu a rozsvítí se zelená LED, která značí, že kalibrace proběhla úspěšně.

■ 3.5.4 Úsporný režim

Po dokončení měření a odeslání dat, se mikrokontrolér uspí na definovanou dobu určenou hodnotou v dekrementálním čítači RTC periferie, která byla zapsána během inicializace. Před samotným usmáním je nejprve potřeba zakázat všechna přerušení, kromě přerušení od RTC, které slouží k probuzení mikrokontroléru a dále také vynulovat všechny vygenerované příznaky přerušení. Dále je potřeba nastavit typ úsporného režimu. Vzhledem k předpokládaným velkým rozdílům mezi časy běhu a spánku (čas vykonání celého programu je kolem 1s, čas spánku pravděpodobně několik hodin, což lze nastavit pomocí centrální jednotky) jsem se rozhodl využít režim *Shutdown*, při kterém jsou vypnuty všechny periferie a hodinové signály kromě RTC a nízkofrekvenčního externího krystalu. Jádro je v režimu *Deep-Sleep* a tento režim umožňuje spotřebu v řádu desítek nA. Do úsporného režimu mikrokontrolér přejde zavoláním funkce `__WFI()` (Wait For Interrupt - čekat na přerušení).

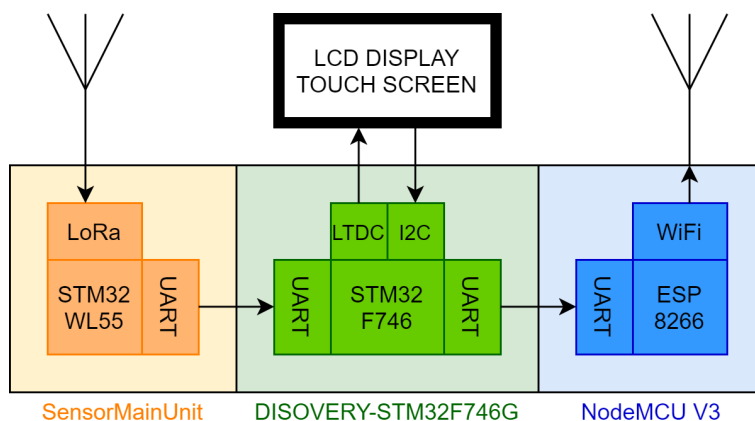
Kapitola 4

Centrální jednotka

Po dokončení měřící jednotky bylo potřeba navrhnout a realizovat centrální jednotku. Nejprve jsme si stanovili požadavky na centrální jednotku: podpora fyzické vrstvy LoRa pro příjem dat z měřících jednotek, displej pro zobrazení naměřených dat a možnost odesílání dat na externí server (cloudovou službu). Dále bylo cílem integrovat centrální jednotku do jedné kompaktní krabičky a napájet pomocí USB (například USB síťovým adaptérem).

4.1 Konstrukční řešení

Blokové schéma centrální jednotky je na obrázku 4.1. Centrální jednotka se skládá ze tří propojených desek: LoRa-UART převodník, řídicí deska s displejem a UART-WiFi převodník.



Obrázek 4.1: Blokové schéma centrální jednotky

4.1.1 LoRa-UART převodník

Pro potřeby LoRa přijímače byla použita řídicí deska z měřicí jednotky. Původně bylo v plánu navrhnout samostatnou desku pro LoRa přijímač a případně i WiFi modul, ale z důvodu možných problémů s frekvenční synchronizací vysílače a přijímače bylo nakonec zvoleno toto řešení. Jak bylo zmíněno u návrhu schématu řídicí desky měřicí jednotky, mikrokontrolér STM32WL55 má na pinech krystalu kondenzátorové banky pro přesné doladění frekvence krystalu, protože je nutné, aby vysílač i přijímač měli stejnou frekvenci. V domácích podmínkách jsem však nebyl schopen tuto frekvenci změřit s dostatečnou přesností, proto jsem i pro přijímač použil stejnou desku jako pro vysílač. Odchylka frekvence totiž záleží především na konkrétním krystalu, návrhu desky a zatěžovacích kapacitách. Pokud jsou všechny tyto parametry stejné, je výsledný rozdíl frekvencí zanedbatelný.

Pro tuto desku jsem poté napsal program, který funguje jako LoRa-UART převodník. Kompletní projekt je k dispozici na přiloženém CD v archivu FW\CentralUnitWL_Final.zip. Po resetu jsou nejprve inicializovány potřebné periferie. Nejprve se nakonfigurují interní hodinové signály stejně jako u měřicí jednotky (všechny hodinové signály s frekvencí $32MHz$, externí krystal jako zdroj frekvence). Dále se nakonfigurují dvě periferie pro sériovou komunikaci - USART2 pro výstup informací o běhu programu do STLINKu a USART1 pro odesílání přijatých dat do řídicí desky. Následně se nakonfiguruje periferie pro bezdrátovou komunikaci (více v kapitole 5.1 - Komunikace). Po úvodní inicializaci běží program ve smyčce, kde čeká na příchozí paket, který hned odesílá přes UART do řídicí desky ve stejném formátu, v jakém byl přijat. Dále pro potřeby ladění odešle tyto informace i přes druhý UART do terminálu na PC, blikne zelenou LED a čeká na další paket.

4.1.2 Řídicí deska

Jako řídicí desku jsem použil vývojový kit STM32F746G-DISCO[36] od společnosti STMicroelectronics. Tento kit je osazen výkonným 32-bitovým mikrokontrolérem STM32F746NG a zvolil jsem jej především pro přítomnost velkého displeje s kapacitní dotykovou plochou. Dále je na desce přítomen rozšiřující konektor kompatibilní s rozšiřovacími deskami pro Arduino, který je použit pro připojení zbylých dvou desek. Deska vývojového kitu obsahuje také programátor a debugger STLINK-V2.1 a řadu dalších, nepoužitých komponent (Ethernet, audiokodek, mikrofony).

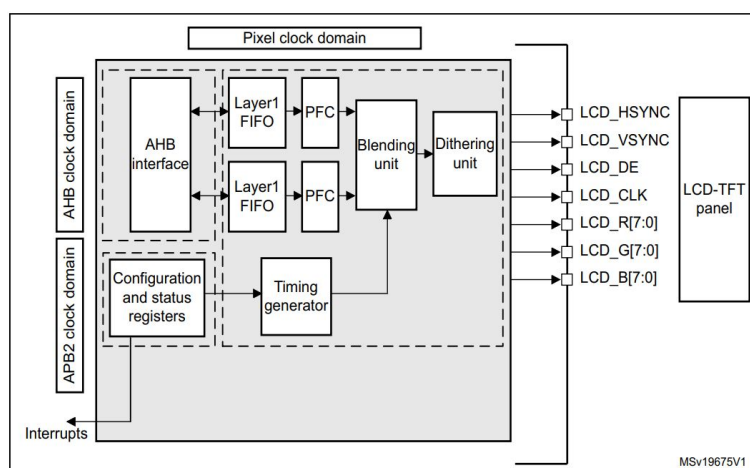
Technické parametry mikrokontroléru: [37] [38]

- 32-bitové jádro ARM Cortex-M7 s hardwarovou podporou výpočtů s číslý s plovoucí řadovou čárkou (FPU - Floating Point Unit) a maximální frekvencí $216MHz$



Obrázek 4.2: Vývojový kit STM32F746G-DISCO[11]

- Paměti: 1MB Flash, 320kB SRAM, periferie pro připojení externích pamětí (FMC - Flexible Memory Controller, Quad-SPI)
- Paralelní rozhraní pro displej (LTDC - LCD-TFT Display Controller, blokové schéma na obrázku 4.3)
- Napájecí napětí 1.7 až 3.6V
- Řada úsporných režimů
- Interní RC oscilátory (HSI 16MHz a LSI 32kHz)
- Externí krystaly nebo oscilátory (HSE 4 až 26MHz a LSE 32.768kHz)
- 12-bitové AD a DA převodníky
- Řada časovačů (16- a 32-bitových), RTC, SysTick, watchdog
- DMA řadič pro přenos dat bez zásahu procesoru
- Až 168 vstupně/výstupních pinů, většina 5V tolerantních s rychlostí až 108MHz
- Řada komunikačních periférií: I2C, USART, SPI, I2S, SAI, CAN, USB, Ethernet
- Paralelní rozhraní pro připojení kamery (až 14 bitů)
- Bezpečnost: TrueRNG, CRC, UID



Obrázek 4.3: Blokové schéma LTDC periferie

4.1.3 UART-WiFi převodník

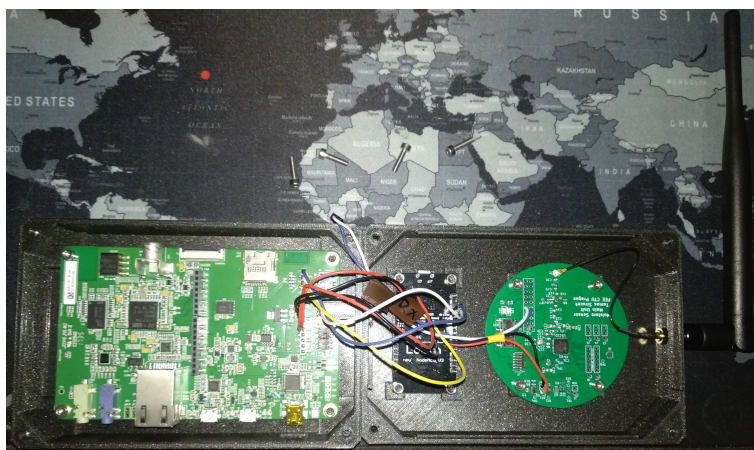
Pro účely odesílání dat do cloudové služby Thingspeak[39] byla použita vývojová deska NodeMCU V3 od společnosti Ai-Thinker s integrovaným obvodem ESP8266 společnosti Espressif Systems. ESP8266 je mikrokontrolér s integrovanou periferií pro komunikaci přes Wi-Fi. Jedná se o předchůdce dnes velmi rozšířeného 32-bitového mikrokontroléru ESP32 s podporou Wi-Fi a Bluetooth. Na této desce je nahrán oficiální firmware od společnosti Espressif Systems ESP-AT[40]. ESP-AT je balík pro komplexní řešení přidání Wi-Fi konektivity k jakémukoliv řídicímu systému. Z desky NodeMCU se tak stává slave zařízení, které přijímá AT příkazy z řídicí desky.

4.1.4 Kompletace

K desce LoRa přijímače byly připájeny napájecí a komunikační vodiče, napájení je přivedeno na konektor pro akumulátor (BT1) a komunikace je řešena přes USART1 vyvedený na rozšiřující konektor J4. Na opačné konce vodičů jsem nakrimpoval kolíky pro připojení do dutinkových lišt na řídicí desce. Pro propojení řídicí desky a WiFi modulu bylo potřeba připravit dalších 5 vodičů (2 napájecí, 2 komunikační a 1 resetovací). Na jeden konec těchto vodičů jsem nakrimpoval kolíky pro připojení k řídicí desce a na druhý konec dutinky pro připojení ke kolíkovým lištám WiFi modulu.

Nejprve jsem všechny desky propojil a otestoval vzájemnou komunikaci "na stole". Po ověření jsem navrhl a na 3D tiskárně vytiskl krabičku na všechny tři desky. V čelní stěně krabičky je otvor pro displej, v pravé stěně otvor pro anténní konektor a na spodní stěně je otvor pro napájecí kabel. Dále jsem k této krabičce vytiskl i stojánek, aby krabička mohla být umístěna na sotle či jiné podložce pod úhlem 45°. 3D modely všech dílů krabičky včetně

stojanu jsou k dispozici na přiloženém CD v archivu 3DM\CentralUnit.zip. Všechny desky jsem následně instaloval do krabičky a propojil vodiči. Desky jsou připevněny pomocí šroubů a matek velikosti M3. Na obrázku 4.4 je vnitřní uspořádání centrální jednotky.



Obrázek 4.4: Kompletace centrální jednotky

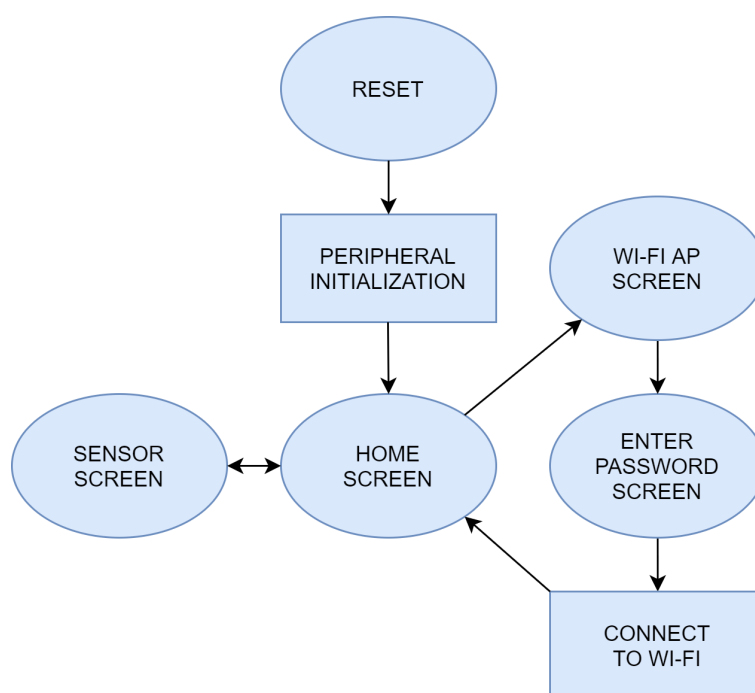
Napájení centrální jednotky je přes Mini-USB konektor na řídicí desce, který je připojen k programátoru a debuggeru STLINK. Napájení 5V k dalším dvěma deskám je přivedeno z rozšiřujícího konektoru CN6. Z levé strany krabičky je dále tlačítko pro resetování centrální jednotky. Oba díly krabičky jsou k sobě připevněny také šrouby a matkami M3. Na obrázku 4.5 je finální vzhled centrální jednotky i se stojánkem.



Obrázek 4.5: Finální vzhled centrální jednotky

4.2 Firmware

Na obrázku 4.6 je blokové schéma finálního programu běžícího na řídicí desce centrální jednotky. Na přiloženém CD je k dispozici i kompletní projekt v archivu `FW\CentralUnitF7_Final.zip`. Program je opět psán na úrovni registrů bez externích knihoven (včetně veškeré grafiky a obsluhy dotykové klávesnice). Jedinou výjimkou je knihovna fontů, kterou jsem převzal z programového balíčku STM32CubeF7. Licenční sdělení je součástí příslušných souborů.



Obrázek 4.6: Blokové schéma programu centrální jednotky

4.2.1 Inicializace periferií

Po resetu mikrokontroléru probíhá nejprve konfigurace všech použitých periferií. Nejprve se zvýší latence paměti Flash a nastaví se interní hodinové signály na maximální možné frekvence (216MHz pro systémové hodiny). Zdrojem hodinového signálu je externí oscilátor, který je v tomto případě nahrazen hodinovým signálem 8MHz z programátoru STLINK. Pro získání maximální frekvence je použita PLL (fázový závěs) a všechny předděličky hodin zbylých sběrnic jsou nastaveny tak, aby na nich byla maximální povolená frekvence. Dále je nakonfigurován systémový časovač SysTick tak, aby generoval přerušování s frekvencí 1kHz .

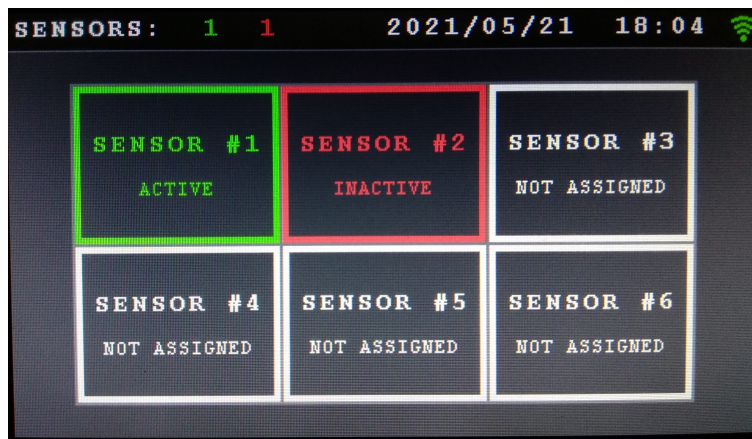
Následně jsou nakonfigurovány tři periferie UART podobně jako u měřicí

jednotky: USART1 na rychlost 115200baud jako hlavní UART pro komunikaci s PC, USART6 na rychlost 9600baud pro komunikaci s LoRa modulem a UART7 na rychlost 115200baud pro komunikaci s Wi-Fi modulem, který je v rámci inicializace nastaven do módu stanice (STA) aby se mohl připojit k existující Wi-Fi síti.

Pro řízení displeje a komunikaci s dotykovou plochou jsou nakonfigurovány periferie LTDC (LCD-TFT Display Controller) a I2C3. Nejprve jsou všechny použité piny nastaveny do módu alternativní funkce a poté jsou nastaveny parametry LTDC periferie: polarita signálů, velikost displeje a šířky okolních oblastí (back porch, front porch, sync). Dále je nastaveno výchozí pozadí, adresa paměti pro frame buffer, barevné schéma a je naplněna barevná tabulka (CLUT - Color Look-Up Table). Následně je celá periferie zapnuta a dále je nakonfigurována periferie I2C3 a nastaven obvod zpracování signálu z dotykové plochy.

4.2.2 Domovská obrazovka

Na domovské obrazovce se nachází 6 karet k jednotlivým měřicím jednotkám. Každá z karet obsahuje unikátní číslo konkrétní jednotky (toto číslo odpovídá její adrese) a informaci o stavu měřicí jednotky: **ACTIVE** - pokud je měřicí jednotka aktivní (průběžně posílá data ve stanovených intervalech), **INACTIVE** - pokud jednotka není aktivní (několik posledních předpokládaných dat nebylo přijato) a **NOT ASSIGNED** - označuje volný slot pro připojení další jednotky. Kromě textové informace je stav jednotky také znázorněn barvou textu a rámečku kolem karty (bílá pro volný slot, zelená pro aktivní jednotku a červená pro neaktivní). Při stisku jedné z karet se zobrazí sensorová obrazovka příslušné měřicí jednotky. Náhled této obrazovky je na obrázku 4.7.



Obrázek 4.7: Náhled domovské obrazovky

Součástí každé obrazovky je také stavový řádek v horní části displeje. Na levé straně tohoto řádku je informace o počtu připojených měřicích

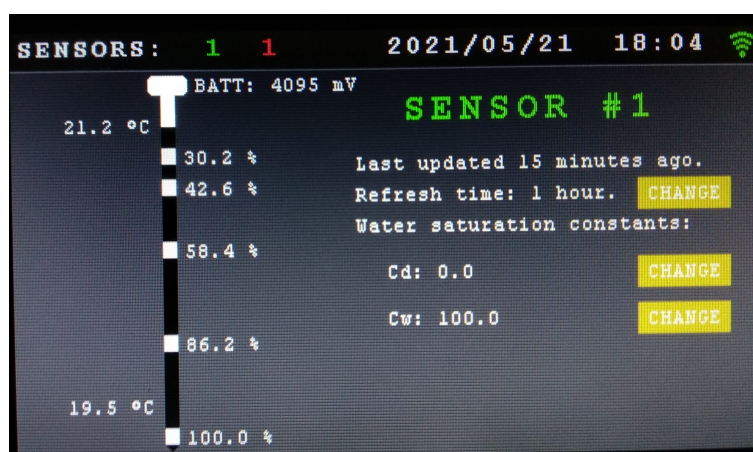
jednotek (zelené číslo značí počet aktivních a červené neaktivních jednotek). Při stisku této oblasti se vyvolá domovská obrazovka. V prostřední části řádku je informace o aktuálním datu a času. Pro získání této informace je potřeba internetové připojení, takže po resetu centrální jednotky je nastaven výchozí čas (půlnoc 1.1.1970) a aktualizuje se hned po připojení k Wi-Fi síti s přístupem k internetu. Na pravé straně řádku je ikona reprezentující stav Wi-Fi. Červená ikona znamená, že zařízení není připojeno k síti, po připojení změní ikona barvu na zelenou. Při stisku této ikony se vyvolá obrazovka Wi-Fi.

4.2.3 Senzorová obrazovka

Senzorová obrazovka je rozdělena na dvě části (vizte obrázek 4.8). V levé části je graficky znázorněna podoba měřící jednotky i s vyznačenými jednotlivými sondami. Na levé straně od jednotky jsou vypsány teploty v odpovídajících hloubkách. Na pravé straně, vedle horní krabičky je informace o napětí akumulátoru a níže, vždy nalevo od příslušné sondy je hodnota vlhkosti (příp. nasycení) pro danou sondu. V pravé části obrazovky je nejprve číslo senzoru. Barvou tohoto textu je také znázorněno, zda je sonda aktivní nebo ne. Dále je informace o čase, který uplynul od poslední aktualizace hodnot a frekvence měření. Nakonec jsou zde uvedeny dvě konstanty sloužící k přepočtu naměřených hodnot. Jedná se v zásadě o kalibraci jednotky pro daný typ půdy a určují dolní a horní hranici stupnice. Výsledná hodnota, která se zobrazí u příslušných sond se spočítá jako:

$$X = \frac{\theta - C_d}{C_w - C_d},$$

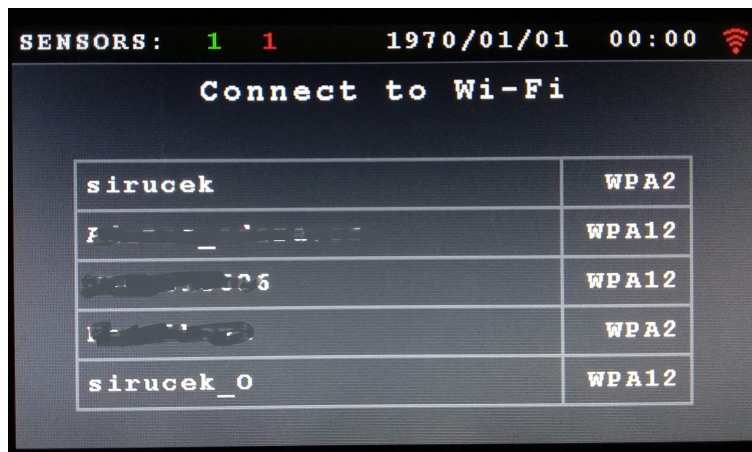
kde θ je objemová vlhkost půdy a odpovídá hodnotě přijaté z měřící jednotky. Všechny uvedené hodnoty lze změnit stisknutím tlačítka CHANGE u příslušné hodnoty.



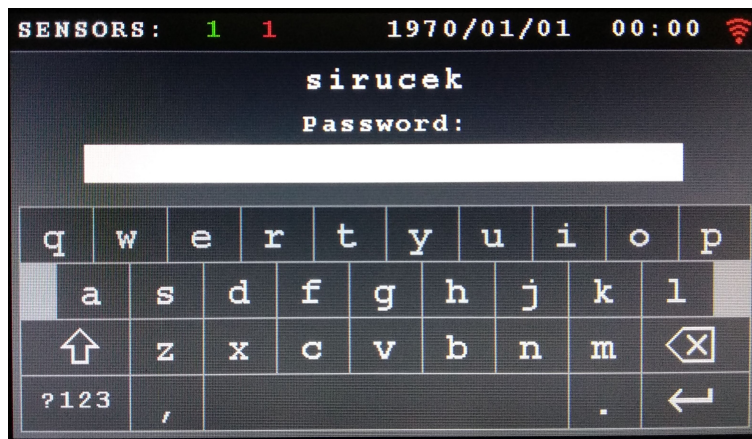
Obrázek 4.8: Náhled sensorové obrazovky

4.2.4 Wi-Fi obrazovka

Při vyvolání této obrazovky se nejprve odešle do Wi-Fi modulu dotaz na dostupné Wi-Fi sítě a z odpovědi modulu se vybere 5 sítí s nejsilnějším signálem a tyto se vypíší do tabulky společně s typem zabezpečení (obrázek 4.9). Po stisku některé z nabízených sítí se vyvolá obrazovka s klávesnicí a zažádá se o zadání hesla k síti (obrázek 4.10). Po potvrzení hesla klávesou enter se modul pokusí připojit k dané síti a vyvolá se domovská obrazovka. Po úspěšném připojení se změní barva Wi-Fi ikony na zelenou a aktualizuje se čas a datum.



Obrázek 4.9: Náhled Wi-Fi obrazovky



Obrázek 4.10: Náhled klávesnice při zadávání hesla k Wi-Fi

Kapitola 5

Měřicí systém

Po oživení dílčích částí (měřicí a centrální jednotka) bylo na řadě zprovoznit měřicí systém jako celek. Měřicí systém se tedy skládá z jedné centrální jednotky a z jedné nebo více měřících jednotek. V rámci této diplomové práce je centrální jednotka pro přehlednost nastavena tak, že umožňuje obsluhu až šesti měřících jednotek, ale v případě potřeby lze tento počet navýšit.

5.1 Komunikace

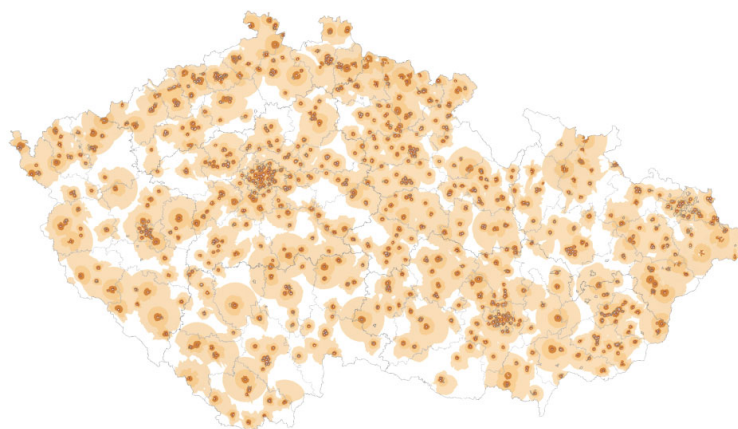
Jenotlivé jednotky spolu komunikují bezdrátově za použití fyzické vrstvy LoRa. Bezdrátová komunikace mezi jednotkami je realizována mikrokontrolérem z řady STM32WL55, který má na čipu integrovanou periférii kompatibilní s LoRa modulem SX126x společnosti Semtech.

5.1.1 LoRa

LoRa[41] (Long Range) je proprietární modulační technika pro nízkopříkonové sítě velkého dosahu (LPWAN - Low-Power Wide-Area Network). Tento typ modulace je založen na metodě rozprostřeného spektra (CSS - Chirp Spread Spectrum), což znamená, že nosná frekvence není konstantní, ale v čase proměnná. Tato technologie byla původně vyvinuta francouzskou společností Cycleo, ale později byla odkoupena společností Semtech (zakládající společnost LoRa Alliance). Díky nízké nosné frekvenci (tedy relativně dlouhým vlnám) a rozprostřenému spektru může mít vysílač využívající tuto technologii dosah i přes 10km při zachování velmi nízké spotřeby.

LoRa využívá především bezlicenční pásma do 1GHz (169MHz, 433MHz, 868MHz a 915MHz), ale v současné době už existují i LoRa moduly na 2.4GHz. Rychlosti přenosu se většinou pohybují do 50kbps v závislosti na

nastavení parametrů. V České Republice spravují síť LoRa České Radiokomunikace, které využily již existujících vysílačů a doplnily je příslušnými komunikačními moduly (LoRa Gateway - brány). Komunikace probíhá tak, že zařízení odešle data na příslušnou bránu, odkud jsou pak data odesílána na server příslušného provozovatele a zde jsou data dostupná uživateli pro další zpracování. Tyto brány využívají protokol LoRaWAN. Na obrázku 5.1 je aktuální stav pokrytí touto technologií na území ČR.

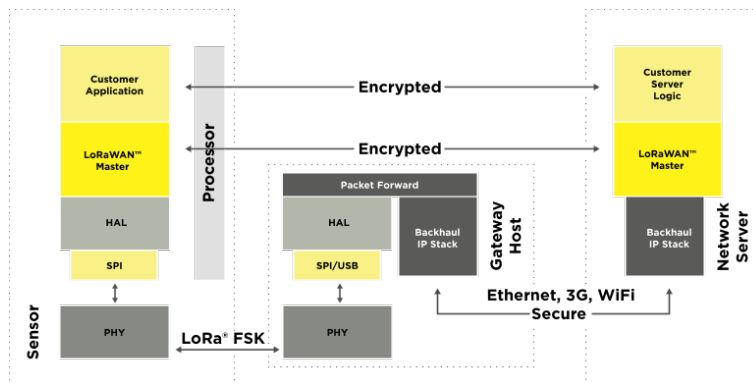


Obrázek 5.1: Pokrytí LoRaWAN na území ČR[12]

5.1.2 LoRaWAN

LoRa reprezentuje pouze fyzickou vrstvu, pro vyšší vrstvy (vyjma aplikační) ISO/OSI modelu byl vytvořen protokol LoRaWAN. Jedná se o nejpoužívanější protokol v souvislosti s použitím LoRa technologie a umožňuje obousměrnou komunikaci, koncové zabezpečení a lokalizační služby. LoRaWAN je používán ve dvojité hvězdicové topologii (star-of-stars), kdy první hvězdu představuje centrální server a k němu připojené jednotlivé brány (gateway) a každá z těchto bran je pak přípojným uzlem hvězdy koncových zařízení (vysílačů). Brány zde fungují jako "převodníky" LoRa-Internet (převádí RF pakety na IP pakety). Koncová zařízení jsou rozdělena do třech tříd, které se liší ve spotřebě a latenci (nižší spotřeba znamená vyšší latenci). Přenášená data jsou zabezpečena dvěma unikátními 128-bitovými klíči (síťový a aplikační klíč).[13]

Specifikace přesně definují parametry fyzické vrstvy (LoRa) i vrstev vyšších (LoRaWAN) a umožňují tak kompatibilitu mezi různými zařízeními od různých výrobců (existuje certifikační program pro zajištění této kompatibility). Naopak ale již nedefinují konkrétní model nebo oblast použití, takže uživatelé mají poměrně velkou svobodu při výběru. LoRaWAN specifikace je vyvíjena a udržována členy LoRa Alliance. Na obrázku 5.2 je standardní architektura sítě LoRaWAN.



Obrázek 5.2: LoRaWAN systém[13]

5.1.3 Inicializace bezdrátové periferie STM32WL55

Při inicializaci bezdrátové komunikace se nejprve nakonfiguruje pin, který ovládá vysokofrekvenční přepínač sloužící k výběru mezi vysíláním a přijímáním. Dále se povolí externí krystal 32MHz a nakonfiguruje se periferie SUBGHZSPI, která slouží jako rozhraní mezi mikrokontrolérem a bezdrátovou periferií.

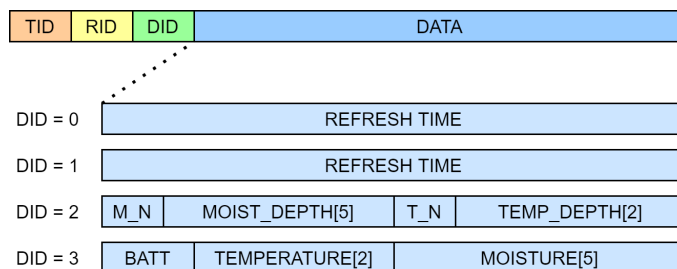
Následně se tato periferie probudí a provede se série příkazů, které slouží k nastavení jednotlivých parametrů periferie. Nejprve se nastaví adresy přijímacího a vysílacího bufferu. Dále se nastaví typ paketu na LoRa paket a nakonfigurují se jeho parametry: délka preamble, délka dat, typ hlavičky, CRC a IQ. Poté se nakonfiguruje synchronizační slovo a nastaví se frekvence komunikace na 868MHz . Dále se nastaví parametry vysílače, především jeho výkon. Na závěr se nastaví parametry LoRa modulace (SF a šířka pásma).

5.1.4 Komunikační protokol měřicího systému

V rámci tohoto měřicího systému existují dva typy komunikace: jednosměrná a obousměrná. V prvním případě probíhá komunikace pouze směrem od měřicí jednotky k centrální jednotce. Toto řešení má výhodu v nižší spotřebě, protože měřicí jednotka data odešle ihned po naměření a okamžitě se uspí, bez čekání na odpověď. Nevýhodou tohoto řešení však je, že měřicí jednotka nečeká na potvrzení přijetí centrální jednotkou a také, že není možno nastavit frekvenci měření z centrální jednotky. Toto řešení je tedy vhodné spíše pro časté měření, kde je kvůli spotřebě nutný co nejkratší možný čas mimo spánek a nevádí, když se občas nějaký odměr nedoručí.

Obousměrná komunikace se pak hodí především pro případy, kdy je pauza mezi odběry velká a je nutné přijímat všechna data. Po odeslání naměřených dat čeká měřicí jednotka na potvrzení od centrální jednotky a zároveň přijímá další konfiguraci (frekvence měření), kterou pošle centrální jednotce potvrdí.

Pokud jeden z účastníků nepotvrdí příjem, komunikace se po zpoždění opakuje.



Obrázek 5.3: Skladba paketu

Na obrázku 5.3 je názorná ukázka, z čeho se skládá odesílaný paket. Pole TID značí ID (adresu) vysílače, pole RID značí ID (adresu) cílového příjemce a pole DID značí ID (typ) odesílaných dat:

- DID = 0: Centrální jednotka posílá příkaz ke spárování s měřicí jednotkou. Zároveň nastavuje frekvenci měření.
- DID = 1: Centrální jednotka odpovídá měřicí jednotce nastavením frekvence měření.
- DID = 2: Měřicí jednotka reaguje na příkaz ke spárování a centrální jednotce posílá informaci o počtu a hloubkách čidel vlhkosti a teploty. Tato informace je centrální jednotkou použita k realistickému vykreslení měřicí jednotky na displeji.
- DID = 3: Měřicí jednotka posílá naměřená data.

5.2 Testování

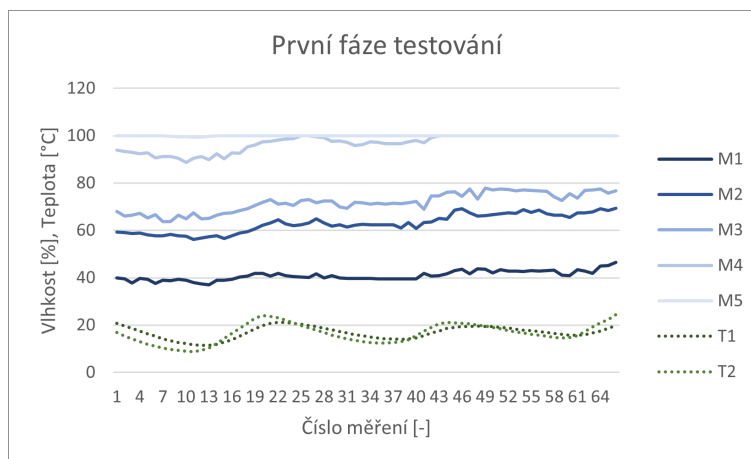
Po zprovoznění systému bylo na řadě testování funkčnosti. Testování probíhalo ve třech fázích a grafy vývoje objemových vlhkostí (M1 až M5) a teplot (T1 a T2) jsou na obrázcích 5.5 až 5.7. Všechna testování probíhala tak, že měřicí jednotka byla umístěna v KG rouře (oranžová odpadní roura z PVC) o průměru 160mm naplněné zeminou - obrázek 5.4. Ve spodní části byla roura zajištěna zátkou s vyvrtanými otvory a na dně roury byla asi 5-centimetrová vrstva hrubého štěrku pro drenáž.

V první fázi byla frekvence měření nastavena na 1 odměr za hodinu. Jak je patrné z příslušného grafu, hodnoty vlhkostí neklesaly, spíše trochu rostly. Měření probíhalo zhruba tři dny, které nebyly moc slunečné a napětí akumulátoru klesalo zhruba rychlostí 100mV za den.

V druhé fázi testování jsem se snažil alespoň částečně eliminovat předchozí problémy. Rostoucí vlhkost jsem se pokusil vyřešit tak, že jsem do odpadní



Obrázek 5.4: Testování měřicího systému

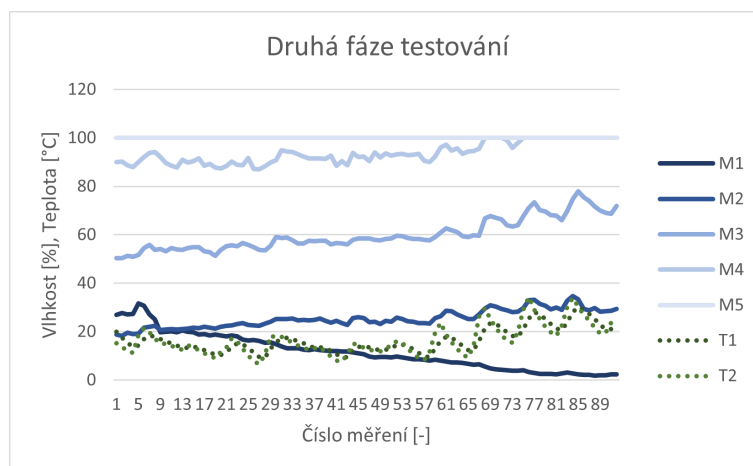


Obrázek 5.5: Graf z první fáze testování

roury v dolní části vyvrtal mnohem více otvorů (do dna i stěny roury) aby přebytečná voda snáze odtékala a zlepšil se přísun vzduchu. Příliš rychlé vybíjení baterie jsem se pokusil vyřešit snížením frekvence měření na odměr každé tři hodiny. Tato fáze testování trvala přibližně 12 slunečných dní a napětí akumulátoru klesalo průměrně o $60mV$ každý den. Zjevným problémem tedy je klidová spotřeba, která je zhruba $6mA$. Jelikož mikrokontrolér v shutdown módu má spotřebu v řádu desítek nA , problémem je zbylá elektronika. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3 - Měřící jednotka, tranzistory použité pro vypínání sond mají moc nízký odpor ve vypnutém stavu. Většina tohoto klidového proudu je spotřebována právě převodníky u sond. Pro budoucí revize by tedy bylo vhodné například použít pro tyto převodníky samostatný regulátor s možností vypnutí.

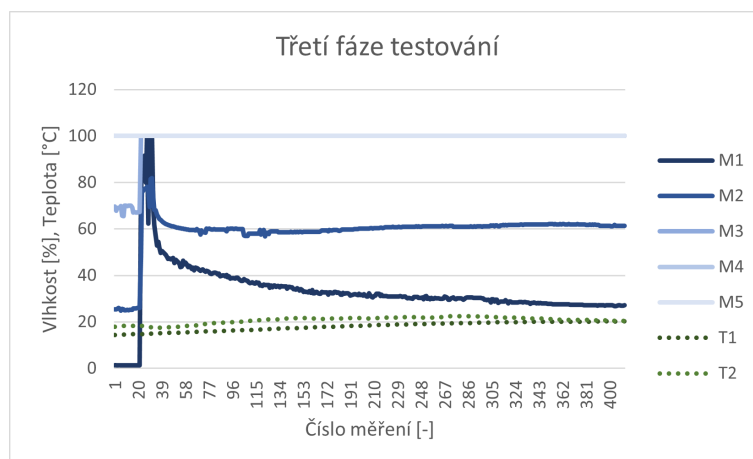
Dále je z grafu na obrázku 5.6 patrné mírné klesání vlhkosti půdy v horní části roury (M1). Zbylé vlhkosti však stále rostly, jak se voda pod vlivem gravitační síly pomalu přesouvala do nižších vrstev. Dále je také (obzvláště

u vyšších hodnot vlhkosti) patrná značná závislost naměřené vlhkosti na teplotě, zde je další možnost vylepšení do budoucí revize.



Obrázek 5.6: Graf z druhé fáze testování

Poslední fáze testování byla určena především k vizualizaci vývoje vlhkosti těsně po zalití. Frekvence měření zde byla nastavena na jeden odměr každou minutu a měření probíhalo sedm hodin.



Obrázek 5.7: Graf z třetí fáze testování

Během testování jsem si všiml nepřiměřeně vysokých hodnot vlhkosti u spodních sond. Tato nepřesnost je pravděpodobně způsobena chybou při kalibraci sond, kdy při kalibraci na prostředí čisté vody byla měřící jednotka v rouři nakřivo a kromě vody bylo v elektrickém poli sondy také PVC a vzduch. Pro kalibraci by bylo vhodnější použít větší nádobu, aby se tento problém eliminoval.

Kapitola 6

Závěr

Zadáním této diplomové práce bylo navrhnout architekturu bezdrátového systému pro měření vlhkosti půdy, provést rešerši vhodných senzorů a na jejím základě vybrat řešení pro měření vlhkosti půdy až do metrové hloubky, navrhnout a implementovat měřící jednotku a implementovat síť měřící(ch) a centrální jednotky komunikující za použití fyzické vrstvy LoRa. Všechny body zadání jsem splnil a dále shrnuji dosažené výsledky.

Nejprve jsem v rámci teoretické části vypracoval studii zabývající se problematikou půdní vlhkosti, různými interpretacemi této veličiny (hmotnostní či objemová vlhkost, vodní potenciál, nasycení půdy) a možnostmi jejího měření: gravimetrická metoda, odporové či kapacitní senzory, časová reflektometrie, frekvenční reflektometrie, neutronová sonda.

Po bližším seznámení se s danou problematikou jsem k realizaci zvolil kapacitní senzor vlhkosti půdy. V rámci měřící jednotky jsem vyzkoušel několik různých variant kapacitních senzorů, než jsem zvolil finální podobu. Dále jsem v rámci měřící jednotky navrhl a realizoval převodník C-F (kapacita-frekvence) a NTC můstek pro měření teploty. Před samotným návrhem řídicí desky měřící jednotky jsem si nejprve prostudoval dokumentaci použitého mikrokontroléru STM32WL55CC a dalších komponent a následně řídicí desku navrhl a realizoval. Na závěr jsem navrhl a na 3D tiskárně vytiskl všechny potřebné díly a celou měřící jednotku zkompletoval. Měřící jednotka monitoruje půdní vlhkost v 5 místech až do hloubky jednoho metru a teplotu ve dvou místech: oblast první a poslední kapacitní sondy. Celá jednotka je napájena Li-Ion akumulátorem a dobíjena fotovoltaickým článkem a s centrální jednotkou komunikuje prostřednictvím LoRa periferie, která je integrována na čipu mikrokontroléru. Veškeré programy pro mikrokontrolér jsou psány na úrovni registrů, bez použití externích knihoven (kromě CMSIS a standartních knihoven jazyka C).

Dále jsem realizoval centrální jednotku. Základem je kit STM32F746G-DISCO s velkým displejem s kapacitní dotykovou plochou. Bezdrátovou komunikaci s měřícími jednotkami zajišťuje mikrokontrolér STM32WL55CC

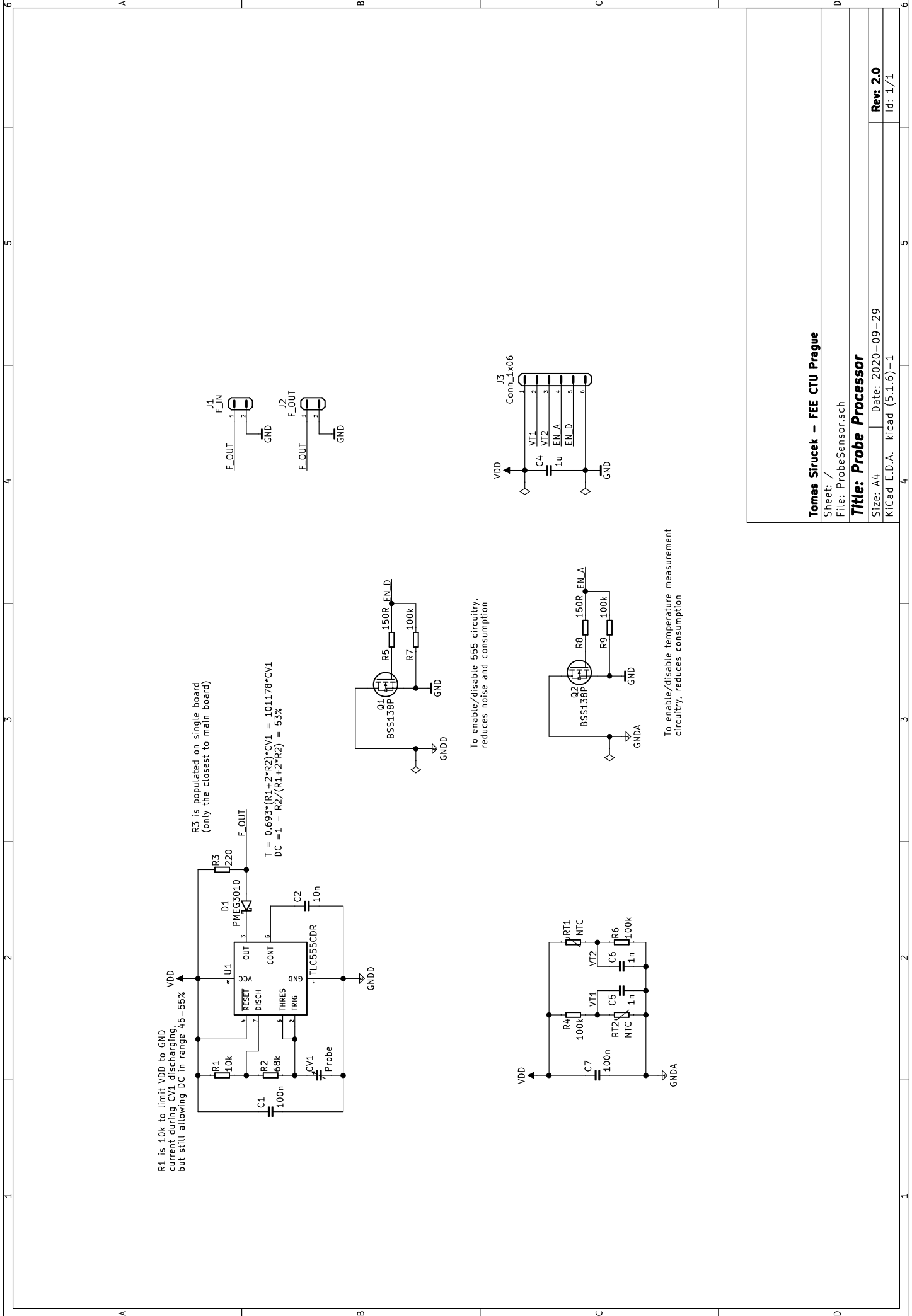
na řídicí desce z měřicí jednotky, která je použita pro eliminaci frekvenční nekompatibility. Odesílání dat na server zajišťuje Wi-Fi modul NodeMCU na bázi ESP8266. Jednotlivé desky spolu komunikují přes UART a přijatá data jsou přehledně zobrazena na displeji. I u centrální jednotky jsou veškeré programy psané na úrovni registrů. Na závěr jsem zprovoznil celý systém komunikující za použití fyzické vrstvy LoRa.

Ačkoliv je zadání splněno, stále je zde dost prostoru pro vylepšení či rozšíření stávajícího systému. Místo vlastního komunikačního protokolu je možné realizovat komunikaci prostřednictvím sítě LoRaWAN, zde by pak byla možnost odesílat data z měřících jednotek přímo na server přes existující LoRa bránu (gateway) bez použití centrální jednotky. Dále by bylo možné vylepšit zabezpečení komunikace, ať již proti odposlechu nebo proti ztrátě dat. Pro reálné nasazení by určitě bylo potřeba snížit spotřebu měřicí jednotky nebo použít výkonnější fotovoltaický článek. Také by bylo možné rozšířit systém o řízení umělého zavlažování podle aktuálního stavu a předpovědi počasí.



Příloha A

Schémata

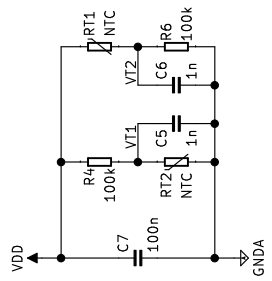


R1 is 10k to limit VDD to GND current during CV1 discharging, but still allowing DC in range 45-55%

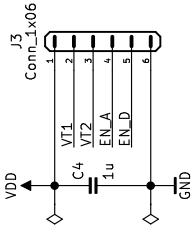
R3 is populated on single board (only the closest to main board)

$$T = 0.693 \cdot (R1 + 2 \cdot R2) \cdot CV1 = 1011.78 \cdot CV1$$

$$DC = 1 - R2 / (R1 + 2 \cdot R2) = 53\%$$



To enable/disable temperature measurement circuitry, reduces consumption



To enable/disable 555 circuitry, reduces noise and consumption

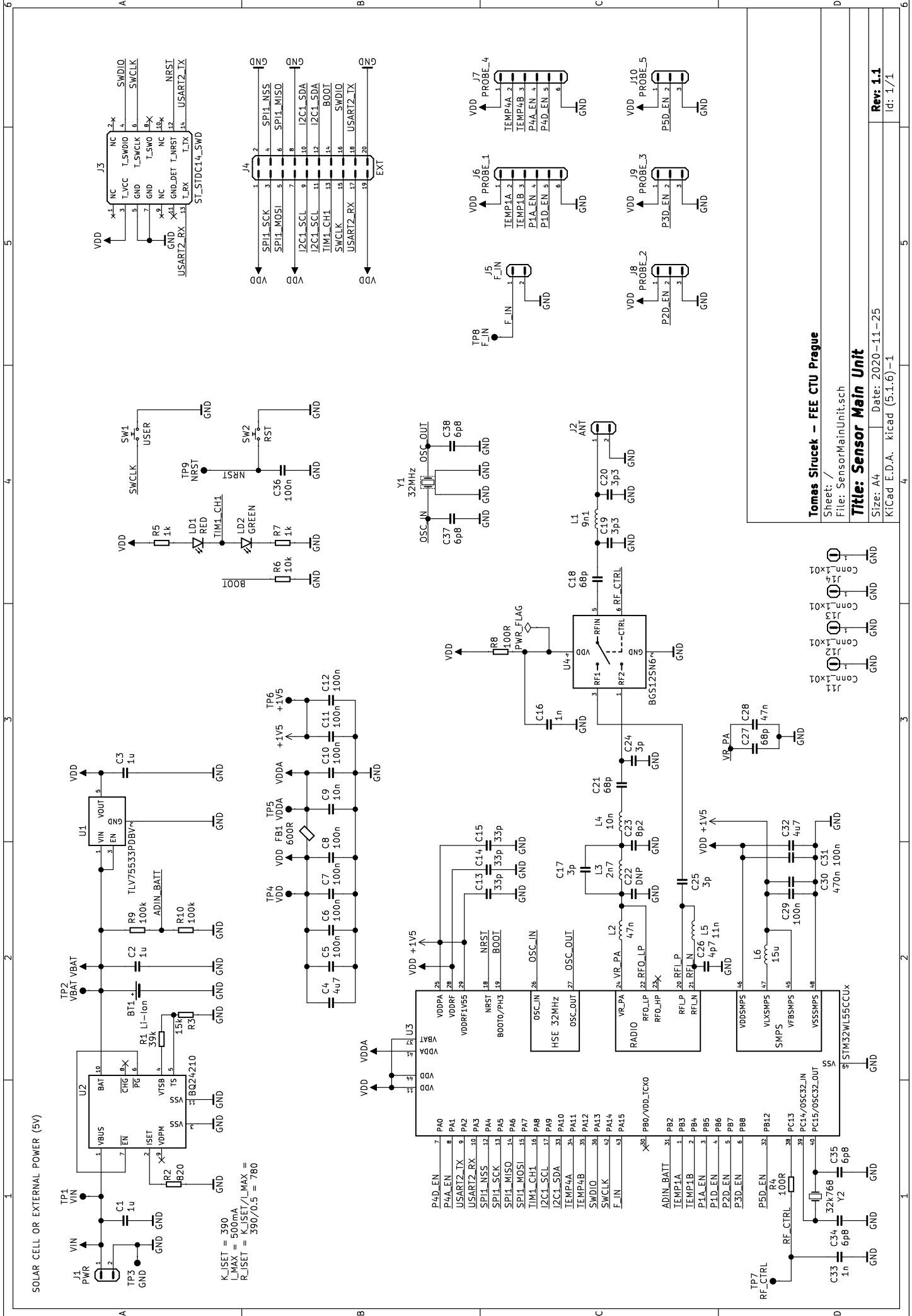
Tomas Strucek - FEE CTU Prague

Sheet: /
File: ProbeSensor.sch

Title: Probe Processor

Size: A4 | Date: 2020-09-29
KiCad E.D.A. kicad (5.1.6)-1

Rev: 2.0
Id: 1/1



Příloha B

Literatura

- [1] METER Environment. Defining water potential—what it is. how to use it. *METER Environment*. <https://www.metergroup.com/environment/articles/defining-water-potential/>.
- [2] METER Environment. TEROS 21 - Soil Water Potential Sensor. https://www.metergroup.com/app/uploads/2017/02/MPS6_Productshot_3-1600x900.jpg.
- [3] RobotDyn. Soil Moisture Sensor. <https://robotdyn.com/pub/media/catalog/product/cache/315e241f4b557a5ee603ef5441085eeb/h/t/httprobotdyn.compubmedia0g-00004610sens-soilmoisturephotophotoangle0g-00004610sens-soilmoisture.jpg>.
- [4] METER Environment. Soil moisture sensors — How they work. Why some are not research-grade. *METER Environment*. <https://www.metergroup.com/environment/articles/tdr-fdr-capacitance-compared>.
- [5] METER Environment. TEROS 12 - Capacitive Soil Moisture Sensor. https://www.metergroup.com/app/uploads/2016/10/Teros_12_Productshot-1600x900.jpg.
- [6] CAMPBELL SCIENTIFIC. CS616 - Water Content Reflectometer. <https://www.campbellsci.com/cs616-reflectometer>.
- [7] CM Manufacturing. RK510-01 - FDR Soil Moisture Sensor. <https://www.cmmfg.com.au/sensors/soil-quality/rk510-01/>.
- [8] E. C. Martin. Methods of Measuring for Irrigation Scheduling. *ResearchGate*, 2014. https://www.researchgate.net/publication/237280989_Methods_of_Measuring_for_Irrigation_Scheduling_WHEN.

- [9] STMicroelectronics. STM32WL55 Datasheet. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32wl55cc.pdf>.
- [10] STMicroelectronics. STM32WL55 Reference Manual. https://www.st.com/resource/en/reference_manual/dm00451556-stm32wl5x-advanced-armbased-32bit-mcus-with-subghz-radio-solutions.pdf.
- [11] elty.eu. STM32F746G-DISCO. <https://elty.eu/userdata/public/gfx/8086a0e2a63a78949e65f1e47241b904.jpg>.
- [12] České Radiokomunikace. Pokrytí LoRaWAN. <https://www.cra.cz/sluzby-iot>.
- [13] LoRa Alliance. What is LoRaWAN Specification. <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>.
- [14] METER Environment. The researcher's complete guide to soil moisture. *METER Environment*. <https://www.metergroup.com/environment/articles/the-researchers-complete-guide-to-soil-moisture/>.
- [15] Wikipedia. Water content, 2021. https://en.wikipedia.org/wiki/Water_content.
- [16] RNDr. Tomáš Litschmann. Měření půdní vlhkosti.
- [17] Subir Das, Tuhin Subhra Sarkar, and Badal Chakraborty. A semi-cylindrical capacitive sensor used for soil moisture measurement. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2014. <https://panel.waset.org/publications/9997586/pdf>.
- [18] Alan Kardek Rêgo Segundo, José Helvecio Martins, Paulo Marcos de Barros Monteiro, Rrubens A. de Oliveira, and Delly Oliveira Filho. Development of capacitive sensor for measuring soil water content. *ResearchGate*, 2011. https://www.researchgate.net/publication/262752466_Development_of_capacitive_sensor_for_measuring_soil_water_content.
- [19] METER Environment. Why tdr vs. capacitance may be missing the point. *METER Environment*. <https://www.metergroup.com/environment/articles/tdr-capacitance-missing-point/>.
- [20] Alpana Shukla, Harsh Panchal, Mayank Mishra, Parul Patel, Hari Shanker Srivastava, Parul Patel, and A.K.Shukla. Soil moisture estimation using gravimetric technique and fdr probe technique: A comparative analysis. *ResearchGate*, 2014. https://www.researchgate.net/publication/279848435_Soil_Moisture_Estimation_using_Gravimetric_Technique_and_FDR_Probe_Technique_A_Comparative_Analysis.

- [21] Bare Conductive. Bare Conductive Electric Paint. <https://www.bareconductive.com/products/electric-paint>.
- [22] Chemtronics. Chemtronics CircuitWorks Conductive Pen. <https://www.chemtronics.com/circuitworks-conductive-pen>.
- [23] Texas Instruments. TLC555 LinCMOS™ Timer Datasheet. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc555.pdf>.
- [24] STMicroelectronics. LMV358 Low power, rail-to-rail OpAmp Datasheet. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lmv358.pdf>.
- [25] Analog Devices. LTspice Simulator. <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>.
- [26] FEL ČVUT Praha. LEO - Little Embedded Oscilloscope. <https://embedded.fel.cvut.cz/platformy/leo>.
- [27] Nexperia. BSS138P Datasheet. <https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/BSS138P.pdf>.
- [28] STMicroelectronics. STM32WL Series. <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32wl-series.html>.
- [29] STMicroelectronics. STM32CubeWL. https://www.st.com/content/st_com/en/products/embedded-software/mcu-mpu-embedded-software/stm32-embedded-software/stm32cube-mcu-mpu-packages/stm32cubewl.html.
- [30] STMicroelectronics. STM32CubeIDE. https://www.st.com/content/st_com/en/products/development-tools/software-development-tools/stm32-software-development-tools/stm32-ides/stm32cubeide.html.
- [31] Texas Instruments. BQ24210 Datasheet. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24210.pdf>.
- [32] Texas Instruments. TLV755P Datasheet. <https://www.ti.com/lit/gpn/TLV755P>.
- [33] STMicroelectronics. Optimized RF board layout for STM32WL Series. https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00660594-optimized-rf-board-layout-for-stm32wl-series-stmicroelectronics.pdf.
- [34] Infineon. BGS12SN6 Datasheet. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BGS12SN6-DS-v02_03-EN.pdf?fileId=db3a30433f1b26e8013f2db58bc03856.
- [35] Vít Záhlava. Návrh a konstrukce DPS. BEN 2010.

- [36] STMicroelectronics. Discovery kit with STM32F746NG MCU. https://www.st.com/content/st_com/en/products/evaluation-tools/product-evaluation-tools/mcu-mpu-eval-tools/stm32-mcu-mpu-eval-tools/stm32-discovery-kits/32f746gdiscovery.html.
- [37] STMicroelectronics. STM32F746NG Datasheet. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f746ng.pdf>.
- [38] STMicroelectronics. STM32F746NG Reference Manual. https://www.st.com/resource/en/reference_manual/dm00124865-stm32f75xxx-and-stm32f74xxx-advanced-armed-32bit-mcus-stmicro.pdf.
- [39] MathWorks. ThingSpeak for IoT Projects. <https://thingspeak.com/>.
- [40] Espressif Systems. ESP-AT User Guide. <https://docs.espressif.com/projects/esp-at/en/latest/index.html>.
- [41] Wikipedia. LoRa, 2021. <https://en.wikipedia.org/wiki/LoRa>.