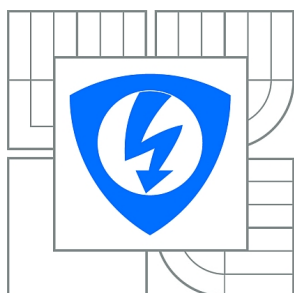


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

POKROČILÁ METEOSTANICE S PŘENOSEM OBRAZU

ADVANCED WEATHER STATION WITH IMAGE TRANSMISSION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. STANISLAV AUGUSTIN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ALEŠ POVALAČ, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Stanislav Augustin

ID: 88554

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Pokročilá meteostanice s přenosem obrazu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhnete blokovou koncepci meteostanice s přenosem obrazu, obsahující jednotku venkovní (zpracování údajů z čidel, kamera, komunikace, napájení) a vnitřní (webserver, grafický displej, ovládání, komunikace, napájení). Využijte mikrokontroléry ARM Cortex-M řady STM32. Pomocí vývojových desek demonstруйте základní bezdrátovou komunikaci mezi jednotkami.

Doplňte vhodná meteorologická čidla, kameru, vyřešte napájení obou jednotek a finalizujte hardwarový návrh včetně mechanického provedení. Vytvořte webové rozhraní pro vnitřní jednotku připojenou přes ethernet. Provedte otestování vyvinuté meteostanice a zdokumentujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] STMicroelectronics [online]. STM32F427xx, STM32F429xx, ARM Cortex-M4 32b MCU+FPU. Datasheet - production data [cit. 7.5.2014]. Dostupné na [www: http://goo.gl/7Zb9Xu](http://goo.gl/7Zb9Xu).

[2] MANN, B. C pro mikrokontroléry. Praha: BEN - technická literatura, 2003.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 13.8.2015

Vedoucí práce: Ing. Aleš Povalač, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Obsahem této diplomové práce je hardwarový a softwarový návrh pokročilé meteostanice s přenosem obrazu. Meteostanice je tvořena dvěma jednotkami - venkovní a vnitřní. Venkovní jednotka zajišťuje zpracování hodnot z meteorologických čidel teploty, tlaku, množství srážek, směru a rychlosti větru a zpracování obrazové informace z připojené kamery. Dále zajišťuje bezdrátový přenos naměřených hodnot a obrazu do vnitřní jednotky. Vnitřní jednotka musí zajistit komfortní ovládání stanice a zobrazení dat pomocí webového rozhraní.

KLÍČOVÁ SLOVA

meteostanice, počasí, bezdrátová komunikace, bezdrátový přenos obrazu, ethernet

ABSTRACT

The content of this diploma thesis is a hardware and software design of advanced weather station with image transmission. The meteostation consist of two units - outdoor and indoor unit. Outdoor unit provide processing measured values from temperature sensor, atmospheric pressure sensors, rain gauge and windmeter. It also provides processing of captured image and wireless transmission of measured values to indoor unit. Indoor unit should provide comfortable meteostation controlling and visualization of weather situation by web interface.

KEYWORDS

meteostation, weather, wireless communication, wireless image transmission, ethernet

AUGUSTIN, Stanislav *Pokročilá meteostanice s přenosem obrazu*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 72 s. Vedoucí práce byl Ing. Aleš Povalač, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Pokročilá meteostanice s přenosem obrazu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....
(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Alešovi Povalačovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	11
1 Počasí a meteorologie	12
1.1 Počasí	12
1.2 Meteorologie	12
1.3 Měření meteorologických prvků	12
1.3.1 Teplota vzduchu	13
1.3.2 Vlhkost vzduchu	13
1.3.3 Atmosférický tlak	14
1.3.4 Rychlost a směr větru	14
2 Návrh vnitřní jednotky	15
2.1 Blokové schéma	15
2.2 Vývojový kit STM32F429 Discovery	15
2.3 Modul s LAN8720	17
2.4 Modul s nRF24L01+	19
2.5 Základní deska	21
3 Návrh venkovní jednotky	23
3.1 Blokové schéma	23
3.2 Vývojový kit STM32F4 Discovery	24
3.3 Modul s nRF24L01+	25
3.4 Meteorologická čidla	25
3.4.1 Čidlo teploty a vlhkosti vzduchu	25
3.4.2 Čidlo atmosférického tlaku	26
3.4.3 Snímač rychlosti větru	27
3.4.4 Snímač směru větru	29
3.4.5 Snímač intenzity srážek	33
3.5 Barevná kamera	35
3.6 Napájecí zdroj	36
4 Firmware mikrokontrolérů	38
4.1 Vývojové prostředí a knihovny	38
4.2 Obsluha modulu LAN8720	39
4.3 Obsluha modulů nRF24L01+	40
4.4 Obsluha meteorologických čidel	42
4.4.1 Čidlo teploty a vlhkosti vzduchu DHT22	42
4.4.2 Čidlo atmosférického tlaku	43

4.4.3	Snímač rychlosti větru	45
4.4.4	Snímač směru větru	46
4.5	Obsluha barevné kamery MT9D111	47
5	Mechanické provedení jednotek	50
5.1	Vnitřní jednotka	50
5.2	Venkovní jednotka	51
6	Závěr	55
	Literatura	57
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	60
	Seznam příloh	62
A	Schémata zapojení	63
A.1	Schéma vnitřní jednotky	63
A.2	Schéma venkovní jednotky - část 1/2	64
A.3	Schéma venkovní jednotky - část 2/2	65
A.4	Schéma modulu s obvodem nRF24L01+	66
A.5	Schéma modulu s obvodem LAN8720	67
A.6	Schéma modulu s obvodem MT9D111	68
B	Osazovací výkresy	69
B.1	Osazovací výkres - vnitřní jednotka TOP	69
B.2	Osazovací výkres - vnitřní jednotka BOTTOM	70
B.3	Osazovací výkres - venkovní jednotka TOP	71
B.4	Osazovací výkres - venkovní jednotka BOT	72

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Meteorologická budka, převzato z [3]	13
1.2	Radiační kryt, převzato z [4]	13
1.3	Větrná růžice	14
2.1	Blokové schéma vnitřní jednotky	15
2.2	Vývojový modul STM32F429 Discovery, převzato z [7]	16
2.3	Modul s obvodem LAN8720, převzato z [9]	18
2.4	Rozhraní RMII, převzato z [10]	18
2.5	Blokové schéma obvodu nRF24L01+, převzato z [11]	19
2.6	Sběrnice SPI v topologii Master – Single slave	20
2.7	Bezdrátový modul s nRF24L01+ s anténou, převzato z [13]	21
2.8	Obvod úpravy napájecího napětí vnitřní jednotky	21
3.1	Blokové schéma venkovní jednotky	23
3.2	Vývojový modul STM32F4 Discovery, převzato z [14]	24
3.3	Čidlo teploty a vlhkosti vzduchu, převzato z [16]	25
3.4	Anemometr T114, převzato z [19]	27
3.5	Grafická závislost počtu otáček anemometru na rychlosti pohybu okolního vzduchu	28
3.6	Obvod ochrany vstupu	29
3.7	Konstrukce snímače směru větru s jazýčkovými kontakty	30
3.8	Snímač směru větru T115, převzato z [19]	30
3.9	Schéma zapojení snímače směru větru	31
3.10	Obvod pro měření směru větru	31
3.11	Nabíjení kondenzátoru C19 při měření	32
3.12	Konstrukce srážkoměru s překlopným člunkem	34
3.13	Srážkoměr T116, převzato z [19]	35
3.14	Kamera MT9D111, převzato z [22]	35
3.15	Připojení kamery MT9D111 k mikrokontroléru	36
3.16	Schéma napájecí části venkovní jednotky	37
3.17	Schéma obvodu měření napětí akumulátoru	37
4.1	Náhled webové stránky uložené ve webserveru	39
4.2	Časové průběhy operace zápisu, převzato z [11]	40
4.3	Časové průběhy operace čtení, převzato z [11]	41
4.4	Enhanced ShockBurst paket obvodu nRF24L01+, převzato z [11]	41
4.5	Časový průběh výstupu DHT22	42
4.6	Zápis a čtení dat z obvodu MS5611-01BA03	44
4.7	Základní princip režimu čítače Input capture	45
4.8	Výstupní obrazová data z kamery	48

4.9	Výstupní signály kamery MT9D111, převzato z [26]	48
4.10	Protokol pro přenos obrazových dat	49
5.1	Vnitřní uspořádání vnitřní jednotky	50
5.2	Mechanické provedení vnitřní jednotky	51
5.3	Vnitřní uspořádání venkovní jednotky	52
5.4	Plošný spoj s čidly	53
5.5	Plošný spoj s čidly vložený do krytu (před zalakováním)	53
5.6	Kompletní venkovní jednotka s čidly	54
A.1	Schéma vnitřní jednotky	63
A.2	Schéma venkovní jednotky - část 1/2	64
A.3	Schéma venkovní jednotky - část 2/2	65
A.4	Schéma zapojení modulu s obvodem nRF24L01+	66
A.5	Schéma zapojení modulu s obvodem LAN8720	67
A.6	Schéma zapojení modulu s obvodem MTD9D111, převzato z [22]	68
B.1	Osazovací výkres vnitřní jednotky, strana TOP	69
B.2	Osazovací výkres vnitřní jednotky, strana BOTTOM	70
B.3	Osazovací výkres venkovní jednotky, strana TOP	71
B.4	Osazovací výkres venkovní jednotky, strana BOTTOM	72

SEZNAM TABULEK

2.1	Hardwarové úpravy STM32F429 Discovery kitu	17
3.1	Parametry čidla teploty a vlhkosti vzduchu DHT-22	26
3.2	Parametry čidla atmosférického tlaku MSS5611-01BA03	27
3.3	Porovnání teoretických a skutečných výstupních hodnot anemometru	28
3.4	Teoretické výstupní napětí snímače směru větru	33
4.1	Paket pro přenos meteodat	42
4.2	Doby trvání signálů DHT22	43
4.3	Teoretické a reálné hodnoty převodu	46
4.4	Hlavička JPEG souboru	49

ÚVOD

Tato práce se věnuje návrhu a realizaci pokročilé meteostanice, která měří a zpracovává údaje získané v pravidelných intervalech z připojených meteorologických čidel a z barevné kamery a prezentuje je pomocí displeje a webového rozhraní. Meteostanici tvoří dvě samostatné jednotky – vnitřní a venkovní – propojené rádiovým spojem. Cílem diplomové práce je sestavit funkční celek, který bude informovat uživatele o stavu povětrnostní situace.

Práce je členěna na šest částí. První se krátce zabývá historií a významem meteorologie a definicí základních pojmů a postupů z oblasti meteorologie. V druhé a třetí části je navržena koncepce, blokové schéma a zapojení vnitřní a venkovní jednotky meteostanice a čtvrtá část pojednává o firmwaru mikrokontrolérů obou jednotek. Pátá část obsahuje popis mechanického řešení jednotek a šestou částí je závěr a zhodnocení dosažených výsledků.

1 POČASÍ A METEOROLOGIE

1.1 Počasí

Počasí je okamžitý stav zemské atmosféry, který je možné popsat tzv. meteorologickými prvky, mezi které patří např. teplota, tlak a vlhkost vzduchu, směr a rychlost větru, stav oblačnosti a výskyt hydrometeorů v atmosféře (déšť, sněžení, jinovatka, rosa apod.). Počasí ovlivňuje život člověka v mnoha tvůrčích oblastech po celou dobu jeho existence na Zemi. V počátcích lidského vývoje musel člověk přizpůsobovat svoji činnost aktuálnímu počasí, v dnešní době však lidé dokáží využít předpovědi počasí a uzpůsobit tak svoje chování a činnost na relativně dlouhou dobu dopředu.

1.2 Meteorologie

Meteorologie je věda, která se zabývá atmosférou a tedy i počasím. Počátky vývoje meteorologie sahají zhruba do 10. až 8. tisíciletí př. n. l., kdy v oblasti dnešní Sýrie, Íránu a Palestiny došlo k tzv. neolitické revoluci, tedy k rozvoji zemědělství. Člověk se tak stal závislý na počasí a začal si více všímat souvislostí, které vedou k jeho změně či naopak k jeho dlouhodobějšímu setrvání.

K velkému rozmachu meteorologie došlo v prvním tisíciletí př. n. l. v Řecku a Římě, dále pak během renesance v celé Evropě. V té době už jsou konstruovány meteorologické přístroje (např. Galileův teploměr, tlakoměry, anemometry). Od konce 18. století jsou prováděny nepřetržité pravidelné odečty meteorologických údajů na různých místech světa – na našem území např. nepřetržitá klementinská řada od roku 1775 [1].

V dnešní době jsou meteorologické veličiny měřeny především pomocí automatizovaných meteostanic s dálkovým odečtem a na profesionální úrovni jsou jejich hodnoty použity k výpočtu výsledků numerických modelů počasí. Český hydrometeorologický úřad v tomto ohledu aktivně spolupracuje na mezinárodním projektu ALADIN [2].

1.3 Měření meteorologických prvků

Meteorologie popisuje počasí pomocí souboru tzv. meteorologických prvků, tedy veličin, které se přímo vztahují k aktuálnímu stavu atmosféry. Za účelem vzájemného porovnání některých meteorologických prvků naměřených na různých místech je vhodné jejich hodnoty korigovat, např. přepočítat atmosférický tlak na výškovou úroveň hladiny moře. Za účelem dosažení reprezentativních výsledků pozorování byly

stanoveny podmínky, ve kterých jsou jednotlivé prvky určovány (denní doba odečtu, umístění přístrojů apod.). Tradičním prostředkem, který umožňuje vypovídající měření teploty a vlhkosti vzduchu, je tzv. meteorologická budka. Ta zajišťuje prostor chráněný před přímým slunečním svitem a zároveň umožňuje dostatečnou cirkulaci vzduchu kolem přístrojů, které jsou v budce umístěny. Pro elektronická čidla, u kterých není nutný optický odečet naměřených hodnot, je možné použít také tzv. radiační kryty, které díky své konstrukci plní podobnou funkci jako meteorologické budky.



Obr. 1.1: Meteorologická budka, převzato z [3]



Obr. 1.2: Radiační kryt, převzato z [4]

1.3.1 Teplota vzduchu

Teplota vzduchu se dle [5] měří v meteorologické budce nebo uvnitř radiačního krytu ve výšce 2 m nad zemí. Doplnkově je možné měřit teplotu také ve výšce 5 cm nad zemí a to během noci a před východem Slunce. Z tohoto důvodu není nutné teploměr nebo elektronické čidlo chránit před přímým slunečním zářením. V evropské meteorologii se teplota vzduchu měří pomocí Celsiovy teplotní stupnice.

1.3.2 Vlhkost vzduchu

Vlhkost vzduchu udává, kolik vodní páry vzduch obsahuje. Zřejmě nejčastěji užívanou charakteristikou vlhkosti vzduchu je relativní vlhkost vzduchu. Ta udává poměr mezi okamžitým množstvím vodních par ve vzduchu a množstvím par, které by měl vzduch o stejném tlaku a teplotě při plném nasycení. Množství vodních par,

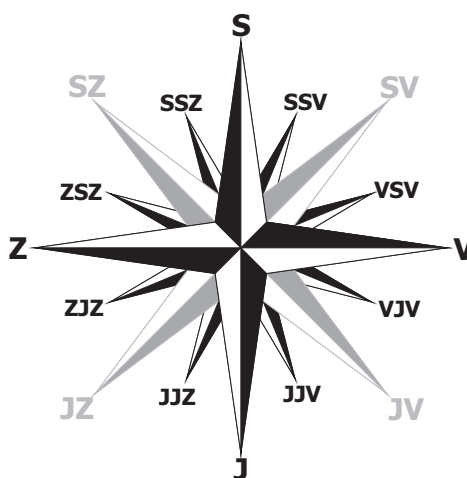
které plně nasytí vzduch, se mění s teplotou vzduchu a mírně i s atmosférickým tlakem. Relativní vlhkost vzduchu se tedy může se změnou teploty také měnit, ačkoli absolutní množství vodních par ve vzduchu zůstává stále stejné [6].

1.3.3 Atmosférický tlak

Atmosférický tlak je tíha, kterou působí sloupec vzduchu na jednotku plochy. Atmosférický tlak se měří v pascálech, vžil se udávání v násobcích stovek pascalů - hektopascálech (hPa). Atmosférický tlak je závislý na mocnosti atmosféry (tedy především na nadmořské výšce) a na objemové hustotě vzduchu. Ta se mění s teplotou vzduchu a jeho vlhkostí. Velikost tlaku se také mírně mění s tíhovým zrychlením a tím pádem také se zeměpisnou polohou. Aby bylo možné porovnávat atmosférický tlak na různých místech zemského povrchu, přepočítává se jeho hodnota na hladinu moře. Zároveň byl zaveden tzv. normální atmosférický tlak, který má hodnotu 1013,25 hPa. Hodnoty atmosférického tlaku nižší než 1000 hPa se označují jako nízký atmosférický tlak, hodnoty od 1000 hPa do 1030 hPa jako střední a hodnoty vyšší než 1030 hPa se označují jako vysoký atmosférický tlak.

1.3.4 Rychlost a směr větru

Rychlost větru je rychlost proudění vzduchu vůči zemskému povrchu. Udává se v jednotce $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (metr za sekundu). Za směr větru je považován úhel, který svírá směr, odkud vane vítr, se severním směrem. Udává se v úhlových stupních (severnímu větru odpovídá úhel 0° , východnímu 90° atd.), ale pro běžné potřeby také slovně (např. směr severozápadní – SZ, západo-severozápadní – ZSZ). Jednotlivé směry je možné zobrazit na tzv. větrné růžici, viz obr. 1.3.

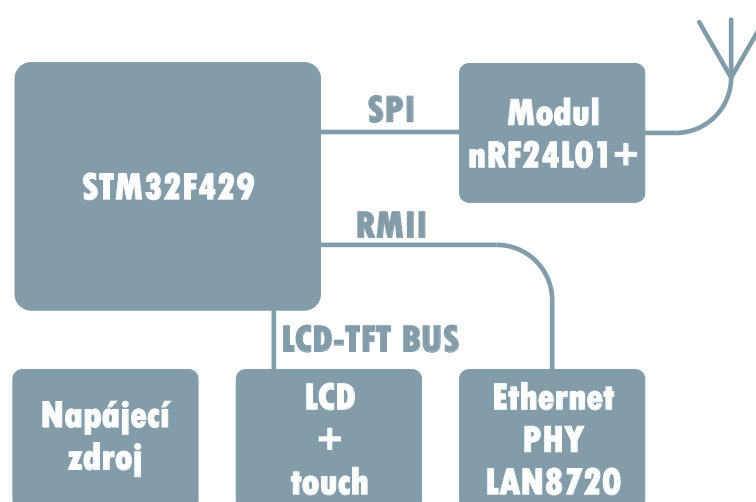


Obr. 1.3: Větrná růžice

2 NÁVRH VNITŘNÍ JEDNOTKY

2.1 Blokové schéma

Vnitřní jednotka meteostanice je umístěna uvnitř budovy a zajišťuje komunikaci uživatele s meteostanicí pomocí dotykového displeje a webového rozhraní, díky kterému je možné ve webové aplikaci zobrazit aktuální stav počasí. Základní blokové schéma této jednotky je na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Blokové schéma vnitřní jednotky

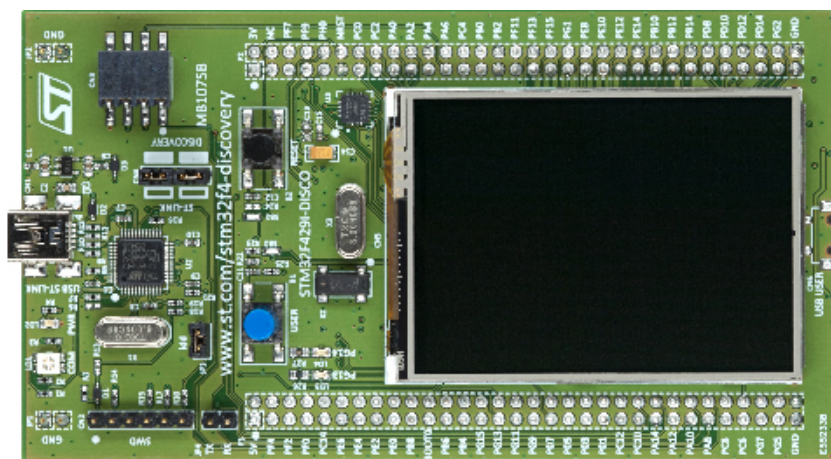
Hardwarově je vnitřní jednotka realizována pomocí několika bloků či modulů. Základní řídicí úlohu má mikrokontrolér STM32F429ZIT6 od firmy STMicroelectronics, resp. vývojový kit z oficiální produkce stejné společnosti STM32F429 Discovery kit, na kterém je tento mikrokontrolér spolu s několika dalšími obvody osazen. O konektivitu s okolím se stará dvojice modulů - ethernetový modul s obvodem LAN8720 a modul pro rádiovou komunikaci nRF24L01+. Tyto prvky jsou propojeny pomocí základní desky, která byla navržena a vyrobena.

2.2 Vývojový kit STM32F429 Discovery

Tento vývojový kit (obr.2.2) obsahuje některé komponenty potřebné pro realizaci funkcí meteostanice:

- Řídicí ARM mikrokontrolér STM32F429ZIT6 s jádrem Cortex-M4
- Barevný TFT displej s úhlopříčkou 2,4" s QVGA rozlišením (320 × 240 obrazových bodů)

- Dotykovou vrstvu a její řadič
- Externí SDRAM paměť o velikosti 64 Mb
- Dvě uživatelské LED a jedno tlačítko
- Programátor/debuger ST-LINK/V2
- Některé vývody mikrokontroléru volně dostupné na pinových lištách



Obr. 2.2: Vývojový modul STM32F429 Discovery, převzato z [7]

Přítomnost programátoru/debugeru přímo na modulu velmi zjednodušuje vývojové práce, protože k programování paměti mikrokontroléru není třeba žádný externí programátor. ST-LINK/V2 se připojuje do USB portu počítače a je možné ho pomocí propojovacích lišt uzpůsobit i k programování jiného kompatibilního mikrokontroléru mimo vývojový modul.

Hlavní výkonnou součástí kitu je mikrokontrolér STM32F429ZIT6 od výrobce STMicroelectronics, který patří do rodiny obvodů s jádrem ARM Cortex-M4. Obvod má následující parametry [8]:

- 32bitové jádro s jednotkou pro výpočet v pohyblivé řádové čárce (FPU) s maximálním taktem 180 MHz
- 2 MB paměti flash, 256 + 4 kB paměti SRAM
- LCD-TFT řadič pro rozlišení až XGA (1024 × 768 obrazových bodů)
- Napájecí napětí 1,7 V až 3,6 V
- Až 24 kanálů A/D převodníku
- Až 17 časovačů

- 3 × I²C sběrnice, 6 × sběrnice SPI
- 10/100 ethernet MAC
- Rozhraní pro kameru

Dále je Discovery kit osazen konektory – pinovými lištami – které umožňují přístup k několika desítkám vybraných vývodů mikrokontroléru. Kromě výše uvedených komponent je na vývojovém kitu také několik dalších obvodů, které nemají při konstrukci meteostanice přímé využití. Jedná se např. o 3-osý gyroskop nebo obvod pro USB komunikaci. Ačkoli nejsou tyto části při návrhu meteostanice využity, sdílejí některé z vývodů mikrokontroléru a ovlivňují tak výběr vhodných volných pinů pro uživatelskou aplikaci. V některých případech bylo nutné tyto obvody deaktivovat nebo rovnou odstranit z plošného spoje vývojového modulu. Naopak některé vhodné prvky kit neobsahuje a ani nemá vyvedeny na konektorech příslušné vývody mikrokontroléru, a tak musely být tyto prvky připájeny přímo na vývojový kit. Všechny hardwarové úpravy kitu shrnuje tabulka 2.1.

Tab. 2.1: Hardwarové úpravy STM32F429 Discovery kitu

Část	Řešení	Důvod
U3	Odstraněn	Kolize s RMII
R26, R27, R69, R72	Odstraněn	Kolize s RMII
R52	Odstraněn	Záložní baterie RTC
Baterie RTC	Připájena na vývody C28	Záloha RTC
X2	Osazen krystal RTC	Nepřesný int. oscilátor
SB16, SB17	Odstraněny	Odpojení X2 od pinové lišty
R53, R54	Osazeny 0R	Připojení krystalu k RTC
C23, C24	Osazeny 6p8	Krystal RTC
P1, P2	Zkráceny	Mech. kolize s krabičkou
Tlačítka	Zkráceny hmatníky	Mech. kolize s krabičkou
CN3	Odstraněn	Mech. kolize s krabičkou
CN4	Ohnut	Mech. kolize s krabičkou
JP3	Propojen pájkou	Mech. kolize s krabičkou

2.3 Modul s LAN8720

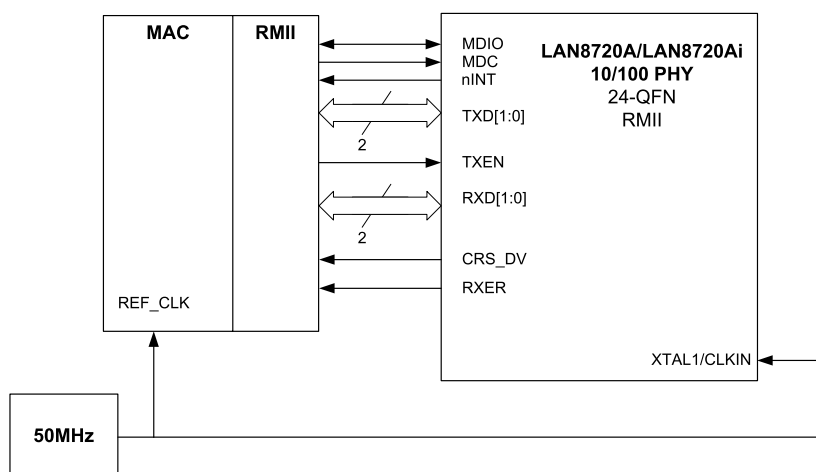
K plnohodnotné komunikaci pomocí rozhraní ethernet je třeba k mikrokontroléru STM32F429ZIT6 připojit obvod, který vytvoří fyzickou vrstvu tohoto rozhraní (mikrokontrolér obsahuje pouze linkovou vrstvu). V obecném případě se tyto obvody běžně nazývají zkratkou PHY. V tomto případě se tedy jedná o ethernet(ové) PHY.

Ačkoli je počet a význam ovládacích signálů těchto obvodů standardizován, jsou v těchto obvodech drobné rozdíly. Byl vybrán obvod LAN8720 od firmy Microchip, který je podporován také výrobcem mikrokontrolérů STMicroelectronics a jsou pro něj dostupné různé vývojové nástroje. Z důvodu složitého osazení tohoto obvodu na plošný spoj v domácích podmínkách (pouzdro QFP s malou roztečí) byl pro připojení tohoto obvodu k základové desce využit hotový modul (schéma modulu je v příloze A.5) s vývody v podobě pinové lišty s odpovídajícím počtem vývodů (viz obr.2.3).



Obr. 2.3: Modul s obvodem LAN8720, převzato z [9]

Kromě samotného integrovaného obvodu je na modulu také osazen konektor typu RJ-45 s interními oddělovacími transformátory, který slouží pro připojení do sítě ethernet a vývody rozhraní RMII, pomocí kterého mikrokontrolér s obvodem LAN8720 komunikuje (viz obr.2.4).



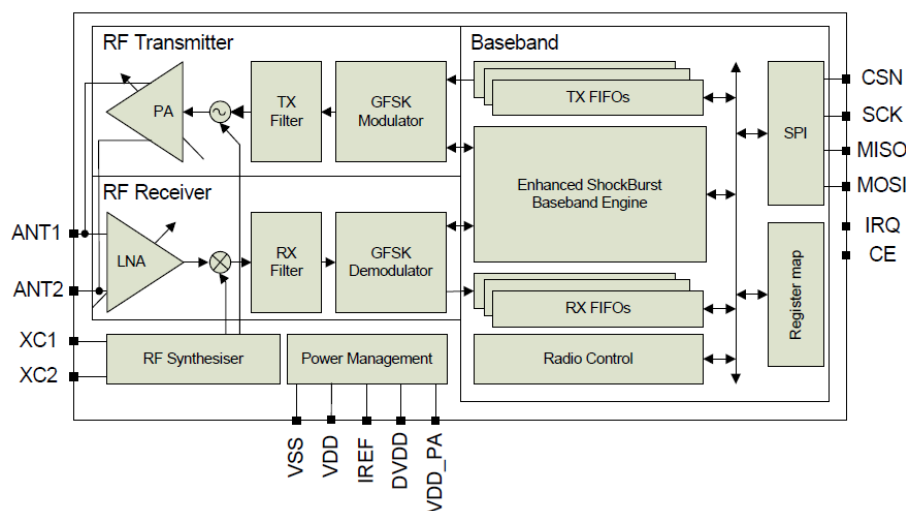
Obr. 2.4: Rozhraní RMII, převzato z [10]

Rozhraní RMII je variantou rozhraní MII, ovšem s redukováným (polovičním) počtem přenosových signálů. Datovou sběrnici pro každý směr tvoří dva datové vodiče (TXD1 a TXD0 resp. RXD1 a RXD0) a jeden vodič, který indikuje využívání datového páru (TXEN a RXEN). Dále je sběrnice doplněna o hodinový signál REFCLKO, jehož kmitočet je 50 MHz a signály pro management přenosu (MDIO, MDC, CRS_DV a RX_ER). Pomocí těchto signálů je indikována chyba anebo naopak správnost přenosu.

2.4 Modul s nRF24L01+

Rádiovou komunikaci mezi oběma jednotkami zajišťuje obvod nRF24L01+ od výrobce Nordic Semiconductors v základním katalogovém zapojení (viz příloha A.4).

Modul využívá GFSK modulaci a jeho blokové schéma je na obr. 2.5. Obvod obsahuje přijímací část s maximální citlivostí -94 dBm (pro využití maximální komunikační rychlosti je udávána citlivost -82 dBm), vysílací část s výstupním výkonem nastavitelným až na 0 dBm a řídicí část, která zajišťuje komunikaci s nadřazeným mikrokontrolérem po sběrnici SPI, sestavování přenosové dávky a výpočet CRC. Obvod přijímače je možné kromě jiných možností nastavit i tak, aby v případě, že nesouhlasí vypočtený a přijatý součet CRC, vyžádal od vysílače opakované vyslání dat a to zcela automaticky bez zásahu obsluhy [11].



Obr. 2.5: Blokové schéma obvodu nRF24L01+, převzato z [11]

Integrovaný obvod pracuje v bezlicenčním pásmu ISM na frekvenci 2,4 GHz. Na této frekvenci je dle [12] možné provozovat zařízení krátkého dosahu s maximálním výstupním výkonem 25 mW EIRP, ale zároveň je zakázáno přenášet obrazová data na

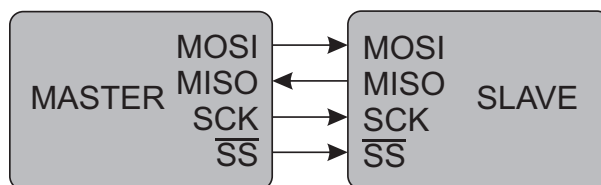
frekvenci nižší než 2,4 GHz. Z tohoto důvodu není k realizaci rádiového spojení mezi jednotkami možné využít bezlicenční pásma na nižších frekvencích (např. 433 MHz nebo 868 MHz)

Výstupní výkon obvodu je nastavitelný a jeho maximální hodnota je 0 dBm, tedy 1 mW. Aby nebyl překročen maximální povolený výkon 25 mW EIRP, je nutné použít anténu s maximálním ziskem

$$G_{\max[\text{dBi}]} = 10 \log \frac{P_{\max}}{P_{\text{RFout}}} = 10 \log \frac{25 \text{ mW}}{1 \text{ mW}} \doteq 14 \text{ dBi}, \quad (2.1)$$

kde $G_{\max[\text{dBi}]}$ je maximální zisk antény v dB míře, $P_{\max}$ je maximální povolený vysílací EIRP výkon a P_{RFout} je maximální výkon na anténních svorkách rádiového modulu. Vzhledem k použití jednoduché prutové všesměrové antény je takto vysoký zisk nedosažitelný.

Obvod komunikuje pomocí sběrnice SPI. Jedná se o čtyřvodičovou sériovou sběrnici, která byla navržena právě pro připojení periferií k řídicím mikrokontrolérům a na kterou je připojen jeden obvod v roli Master a jeden či více obvodů v roli Slave. Pro řízení modulů na obou jednotkách meteostanice jsou obvody zapojeny v topologii Master – Single slave, jejíž základní uspořádání je na obr.2.6.



Obr. 2.6: Sběrnice SPI v topologii Master – Single slave

Jeden vodič přenáší hodinový signál SCK, za jehož generování je zodpovědný výhradně Master a určuje rychlost komunikace, výběr Slave obvodu je realizován nízkou úrovní na vodiči SS (Slave Select, někdy označován jako CS – Chip Select) a zbylé dva vodiče jsou datové. Pro každý směr komunikace je určený jeden vodič, pro komunikaci ve směru Master→Slave je to vodič MOSI (Master Out Slave In) a pro směr Slave→Master je to vodič MISO (Master In Slave Out).

Obvod nRF24L01+ je pouzdřen v pouzdru typu QFN, jehož pájení je v amatérských podmínkách podobně nesnadné jako v případě obvodu ethernet PHY. Z tohoto důvodu byl opět použit hotový osazený modul, který kromě obvodu nRF24L01+ obsahuje také vývody pro SPI komunikaci s mikrokontrolérem, přizpůsobovací obvody RF části a konektor pro externí anténu. Verze s konektorem pro externí anténu

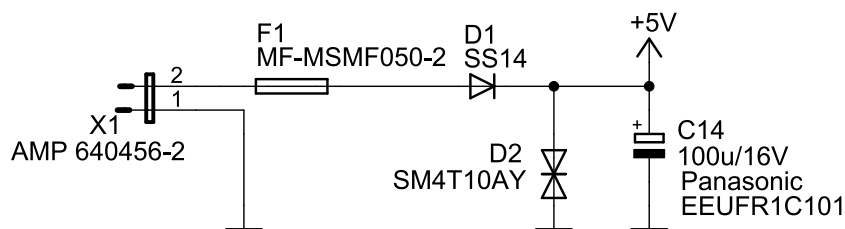
byla zvolena kvůli větší flexibilitě umístění antény v porovnání s anténou tvořenou plošným spojem.



Obr. 2.7: Bezdrátový modul s nRF24L01+ s anténou, převzato z [13]

2.5 Základní deska

Aby bylo možné připojit k vývojovému kitu komunikační moduly a externí napájecí napětí, byla navržena a vyrobena základní deska, která umožňuje zasunutí pinových lišt Discovery kitu a obou komunikačních modulů do konektorů, které jsou na této základové desce osazeny a zajišťuje tak jejich elektrické propojení s řídicím mikrokontrolérem. Kromě tohoto propojení také základní deska přivádí napětí na napájecí vstup Discovery kitu. Ten je možné napájet externím napětím o velikosti 3 V – v tomto případě je toto napětí přivedeno přímo na napájecí vývody mikrokontroléru a dalších periférií na Discovery kitu – nebo 5 V. Toto vyšší napětí je přístupné na několika vývodech kitu a je dále přivedeno na LDO regulátor, z jehož výstupu je napájen mikrokontrolér. Napájecí napětí vnitřní jednotky meteostanice je zajištěno běžným externím spínaným síťovým adaptérem, jehož výstupní napětí je 5 V a na základní desce jsou osazeny komponenty, které tvoří obvod úpravy vstupního napájecího napětí základní jednotky. Schéma této části desky je na následujícím obr.2.8.



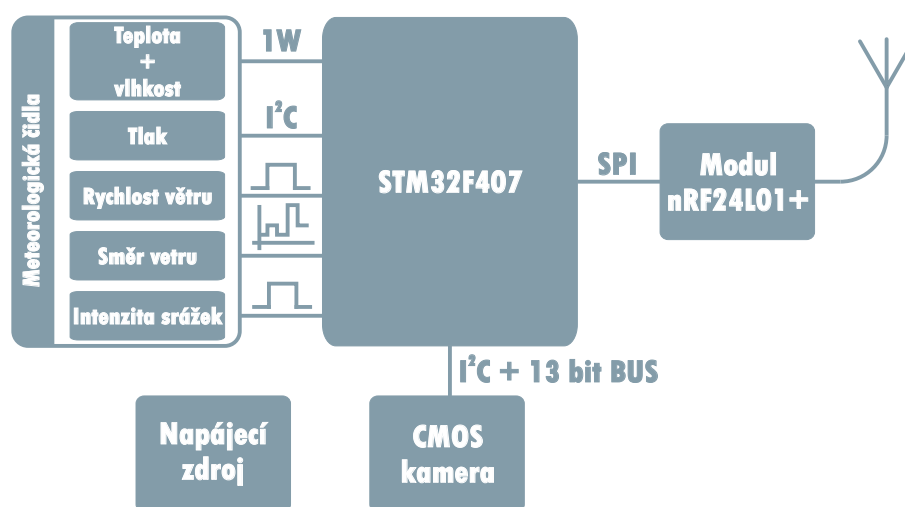
Obr. 2.8: Obvod úpravy napájecího napětí vnitřní jednotky

Napájecí napětí je na základovou desku přivedeno konektorem X1. Před nadproudy v případě zkratu jsou obvody chráněny vratnou tepelnou pojistkou F1 typu PTC, ochranu při připojení napětí opačné polarity zajišťuje dioda D1. Jedná se o Schottkyho usměrňovací diodu, která má narozdíl od běžné usměrňovací diody nízký úbytek napětí v propustném směru. Ochrana před přepětím je zajištěna TVS prvkem D2. Dále je přivedené napětí ještě vyhlazeno kvalitním elektrolytickým kondenzátorem C7. Obvod úpravy napájecího napětí je umístěn v těsné blízkosti přívodu napájecího napětí na desku plošného spoje. Součástí napájecí větve jsou také trojice keramických kondenzátorů C1 až C3 a C4 až C6, které díky svému umístění a postupně se snižujícím hodnotám zajišťují blokování napájecího napětí modulů na širokém rozsahu frekvencí. Celkové schéma zapojení základní desky vnitřní jednotky je v příloze A.1.

3 NÁVRH VENKOVNÍ JEDNOTKY

3.1 Blokové schéma

Venkovní jednotka meteostanice je umístěna na volném prostranství uvnitř vodotěsné instalační krabice tak, aby byla chráněna před nepříznivými vlivy počasí. Do této jednotky jsou svedeny vodiče připojující jednotlivá meteorologická čidla a v otvoru ve stěně krabice je osazena CMOS kamera, která snímá okolí jednotky. Signály z čidel a kamery jsou zpracovány a odesílány do vnitřní jednotky. Základní blokové schéma venkovní jednotky je na obr. 3.1

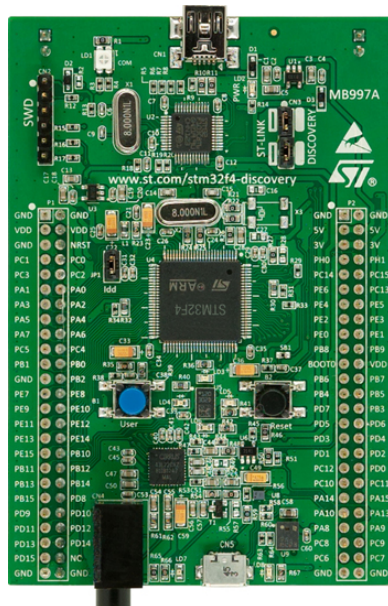


Obr. 3.1: Blokové schéma venkovní jednotky

Hardwarově je venkovní jednotka realizována také na základě vývojového kitu od výrobce STMicroelectronics. Byl zvolen kit STM32F4 Discovery (viz obr.3.2) s procesorem STM32F407VGT6. K vývojovému modulu jsou připojeny další komponenty nezbytné pro zajištění všech funkcí venkovní jednotky meteostanice. Jsou to především radiový modul s čipem nRF24L01+ (tedy stejný jako v případě vnitřní jednotky), modul s malou CMOS kamerou MT9D111, meteorologická čidla pro teplotu vzduchu, vlhkost vzduchu, atmosférický tlak, rychlost a směr větru a množství srážek. Vzájemné propojení jednotlivých čidel a vývojového kitu opět zajišťuje navržený a vyrobený plošný spoj základní desky.

3.2 Vývojový kit STM32F4 Discovery

Stejně jako kit, který je použitý pro realizaci vnitřní jednotky, obsahuje STM32F4 Discovery mikrokontrolér s jádrem Cortex-M4, avšak tento kit je vybaven menším počtem osazených periférních obvodů. Díky tomu je však dostupný větší počet volně využitelných vývodů, které je možné použít pro různé typy meteorologických čidel.



Obr. 3.2: Vývojový modul STM32F4 Discovery, převzato z [14]

Hlavní částí kitu STM32F4 Discovery je mikrokontrolér STM32F407VGT6 opět od výrobce STMicroelectronics. Obvod má kromě jiného následující důležité parametry[15]:

- 32bitové jádro s jednotkou pro výpočet v pohyblivé řádové čárce (FPU) s maximálním taktem 168 MHz
- 1 MB paměti flash, 192+4 kB paměti SRAM
- Napájecí napětí 1,7 V až 3,6 V
- Až 24 kanálů A/D převodníku
- Až 17 časovačů
- 3 $\times$ I²C sběrnice, 3 $\times$ sběrnice SPI
- Rozhraní DCMi pro kameru

I tento vývojový kit je osazen dvojími pinovými lištami, které umožňují přístup k několika desítkám vývodů mikrokontroléru. Jedinou hardwarovou úpravou, kterou bylo na kitu nutné provést, bylo odstranění rezistoru R36 z důvodu připojení

záchytného signálu časovače TIM4 k výstupu mikrokontroléru, který byl připojením tohoto rezistoru (resp. LED D3) ovlivňován.

3.3 Modul s nRF24L01+

Pro venkovní jednotku byl zvolen stejný rádiový modul jako pro vnitřní jednotku, jeho popis je uveden v kapitole 2.4 na straně 19.

3.4 Meteorologická čidla

3.4.1 Čidlo teploty a vlhkosti vzduchu

Teplotních čidel, která jsou vhodná pro měření teploty či vlhkosti vzduchu, je na trhu velké množství. Pro použití v meteostanici je vhodné použít kombinované čidlo, které měří zároveň teplotu a vlhkost okolního vzduchu a naměřené hodnoty převede do digitální formy. Základní požadavek pro výběr vhodného čidla je dostačující rozsah měřených veličin a dostatečná přesnost čidla. Vzhledem k předpokladu použití meteostanice na území pásu mírných šířek (mírný podnebný pás) je dostačující rozsah měřených teplot mezi -30°C a $+40^{\circ}\text{C}$ a rozsah měřené vzdušné vlhkosti mezi 20 % a 100 %. Rozlišení a přesnost čidel je požadována co nejvyšší.

Jako vhodné čidlo pro použití v meteostanici bylo vybráno čidlo řady DHT, konkrétně nejpresnější zástupce této řady - čidlo DHT-22 (obr. 3.3).



Obr. 3.3: Čidlo teploty a vlhkosti vzduchu, převzato z [16]

Čidlo kombinuje kapacitní senzor vlhkosti vzduchu a termistor, který slouží k měření teploty okolního vzduchu. Čidlo je dostupné v několika mechanických variantách (bez krytu, s jednoduchým anebo s dvojitým krytem), technické parametry všech variant jsou však shodné a jsou shrnuty v následující tabulce [16].

Tab. 3.1: Parametry čidla teploty a vlhkosti vzduchu DHT-22

Parametr	Hodnota	Jednotka
Rozsah měření teploty	-40 – +125	°C
Rozlišení měření teploty	0,1	°C
Přesnost měření teploty	±0,5	°C
Rozsah měření vlhkosti	0 – 100	%
Rozlišení měření vlhkosti	0,1	%
Přesnost měření vlhkosti	±2	%

V čidle je vestavěn jednoduchý mikrokontrolér, který obstarává převod analogových hodnot do digitální podoby a komunikaci s nadřazeným mikrokontrolérem po jednovodičové sběrnici pomocí jednoduchého, avšak nestandardizovaného protokolu.

3.4.2 Čidlo atmosférického tlaku

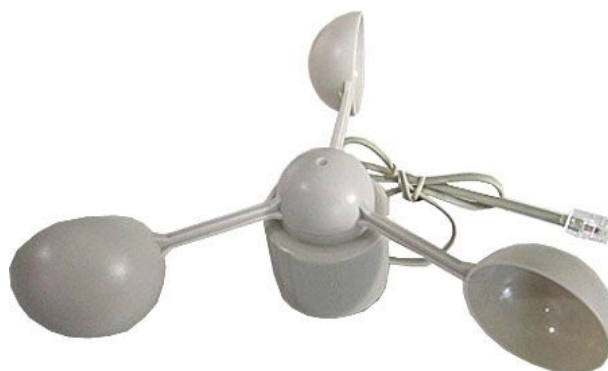
Požadavky na čidlo atmosférického tlaku se týkají především měřicího rozsahu. Vzhledem k hodnotám nejvyššího a nejnižšího naměřeného atmosférického tlaku na Zemi 850 hPa až 1083 hPa (viz [17]) postačuje s rezervou měřicí rozsah 800 hPa až 1100 hPa. Po porovnání parametrů různých čidel byla vybrána řada čidel MS56XX od výrobce Measurement Specialties, konkrétně modely MS5611-01BA03, MS5607-02BA03 a model MS5637-02BA03. První dva modely se liší pouze rokem uvedení na trh, posledně jmenovaný obvod má jednodušší pouzdro bez možnosti volby použité sběrnice a nastavení adresy. Byl navržen společný plošný spoj pro všechny tři varianty, které byly následně osazeny a otestovány. V návrhových datech se jedná o část plošného spoje venkovní jednotky, která je oddělena drážkováním. Naměřené hodnoty všech čidel nevykazovaly významné rozdíly, nakonec bylo vybráno čidlo tlaku MS5611-01BA03 (poslední z testovaných). Katalogový list tohoto čidla je dostupný na internetových stránkách výrobce [18]. Jedná se o kombinované čidlo tlaku vzduchu a teploty s digitálním výstupem, ovšem teplota je měřena s vyšší chybou, než je tomu u čidla DHT-22. Obvod je schopen komunikovat pomocí sběrnice SPI či I²C. V zapojení je využita varianta se sběrnicí I²C. Parametry obvodu jsou shrnuty v následující tabulce 3.2:

Tab. 3.2: Parametry čidla atmosférického tlaku MSS5611-01BA03

Parametr	Hodnota	Jednotka
Rozsah měření tlaku	10 – 1200	hPa
Rozlišení měření tlaku	0,012	hPa
Přesnost měření tlaku (při +25 °C)	±1,5	hPa
Přesnost měření tlaku (od -20 °C do +85 °C)	±2,5	hPa

3.4.3 Snímač rychlosti větru

Rychlost větru je možné měřit několika principiálně odlišnými způsoby. Obecně je možné měřiče rychlosti větru, tzv. anemometry, rozdělit na dvě skupiny. Na nemechanické a mechanické. Do první skupiny patří např. akustické anemometry, které vyhodnocují směr a rychlost větru podle vlivu pohybu vzduchu na akustický signál, nebo zchlazovací anemometry, ve kterých je proudem vzduchu ochlazován vodič protékaný proudem. Z velikosti proudu potřebného pro udržení konstantní teploty vodiče je odvozena rychlost větru. Oproti tomu mechanické anemometry obsahují pohyblivé prvky, nejčastěji různý počet malých vypouklých lopatek (misek) na křížové konstrukci, která se otáčí kolem svislé osy. Proud vzduchu tento kříž roztáčí a rychlost větru je odvozena z počtu otáček kříže za jednotku času. Tato konstrukce byla zvolena i pro konstruovanou meteostanici. Vzhledem k mechanické náročnosti výroby takového anemometru v domácích podmínkách byl zvolen hotový výrobek s označením T114 (viz obr. 3.4), který se běžně dodává ke komerčním meteostanicím s označením WH1080 a WH1090.



Obr. 3.4: Anemometr T114, převzato z [19]

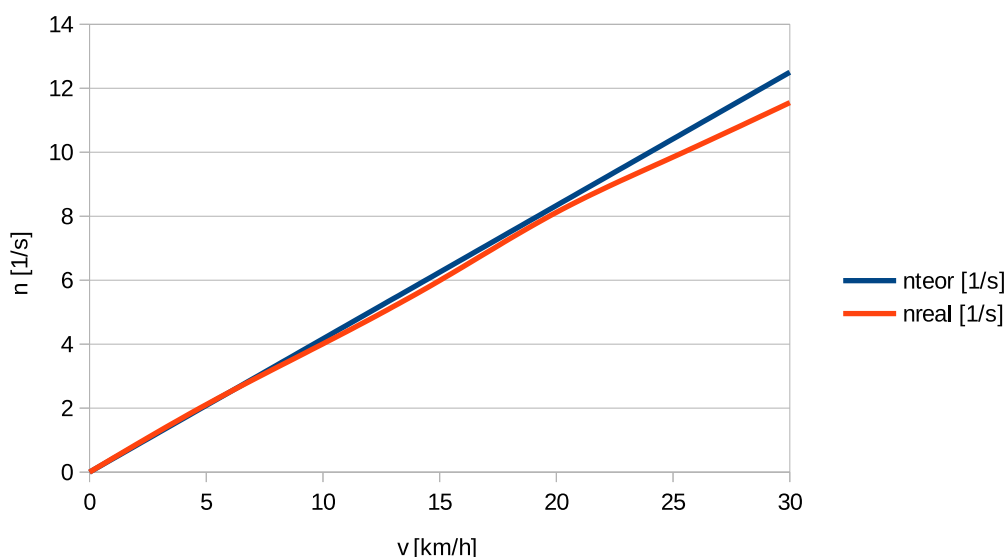
Anemometr má rotor tvořený třemi polokulovitými miskami o průměru 40 mm vzdálenými 70 mm od středu otáčení a při otáčení kříže kolem svislé osy je pomocí

dvou protilehlých magnetů umístěných v rotoru spínán nepohyblivý jazýčkový kontakt, který je umístěn ve statoru. Podle dostupných údajů (viz [20]) odpovídá jedna otočka rotoru za sekundu rychlosti větru 2,4 km/h, neboli 0,667 m/s. Tyto hodnoty byly alespoň hrubě ověřeny měřením při jízdě na kole v prázdné výrobní hale, ve které nedocházelo k parazitním pohybům vzduchu. Rychlost pohybu byla měřena běžným cyklistickým tachometrem a pro každou rychlost byla provedena čtyři měření počtu otáček za sekundu n_{real} a ta byla následně zprůměrována a porovnána s teoretickou hodnotou n_{teor} . Menší rychlost větru než asi 1 km/h (0,28 m/s) nedokáže anemometr změřit kvůli tření v uložení rotoru. Vyšší rychlosti než 30 km/h se nepodařilo na kole dosáhnout. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 3.3, resp. v grafu 3.5.

Tab. 3.3: Porovnání teoretických a skutečných výstupních hodnot anemometru

Rychlost pohybu [km/h]	0	5	10	15	20	25	30
n_{teor} [1/s]	0,00	2,08	4,17	6,25	8,33	10,42	12,50
n_{real} [1/s]	0,00	2,11	4,01	5,99	8,12	9,85	11,55

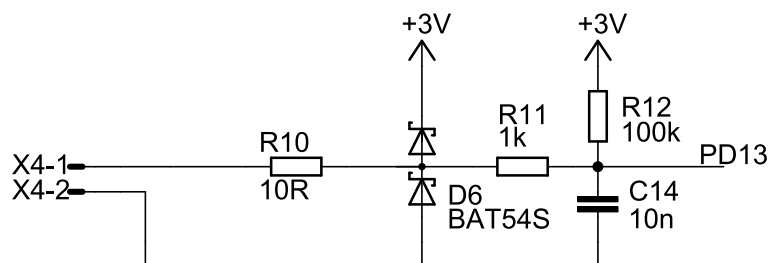
Pro nižší rychlosti odpovídaly naměřené hodnoty (červená křivka) teoretickému předpokladu (modrá křivka), při vyšších rychlostech byla naměřená hodnota mírně nižší než očekávaná.



Obr. 3.5: Grafická závislost počtu otáček anemometru na rychlosti pohybu okolního vzduchu

Takto hrubým měřením však nelze vyloučit také chybu měřící metody a v budoucnu by bylo vhodné porovnat naměřené hodnoty s profesionálním anemometrem. Prozatím probíhal přepočet podle výše uvedeného lineárního vztahu.

Mezi spínací kontakty anemometru a vývod mikrokontroléru je zařazen ochranný obvod, jehož schéma je na obr.3.6.

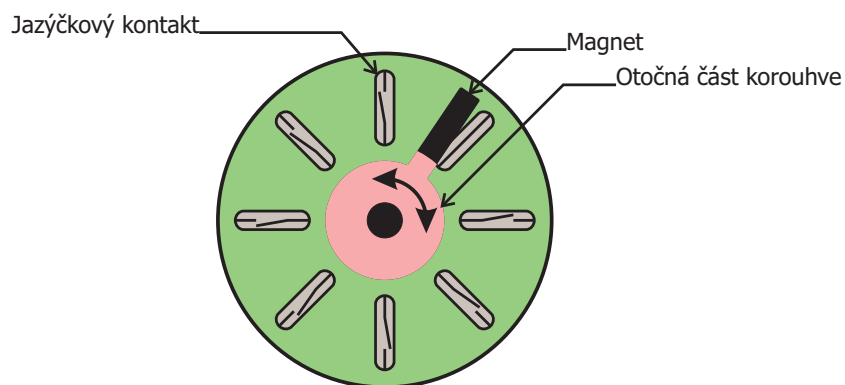


Obr. 3.6: Obvod ochrany vstupu

Dvojitá dioda D6 chrání vstup mikrokontroléru před napětovými špičkami nebo naopak před poklesy pod úroveň společného vodiče (přivedení záporného napětí na vstup). Maximální proud těmito diodami omezuje sériový rezistor R10. Rezistor R11 pak omezuje maximální proud do vstupu mikrokontroléru a společně s kondenzátorem C14 tvoří dolní propust, která potlačí případné zákmity jazýčkového kontaktu. Rezistor R12 pak plní funkci tzv. pull-up rezistoru, který definuje klidovou napětovou úroveň na vstupu mikrokontroléru. Stejný obvod je použit i pro ostatní vstupy, které zpracovávají mechanické kontakty.

3.4.4 Snímač směru větru

Podobně jako snímače rychlosti větru, i snímače směru větru je možné rozdělit na nemechanické a mechanické. Nemechanické jsou založeny na podobných principech jako nemechanické anemometry. Další z principů je využití otočného magnetu, jehož magnetické pole je snímáno speciálním obvodem, např. [21]. Mechanické snímače směru větru jsou nejčastěji konstruovány jako větrná korouhev, která se volně otáčí na svislé ose podle směru větru. Poloha této korouhve je poté zjišťována různým způsobem, např. pomocí polohy jezdce potenciometru na odporové dráze. Toto řešení má nevýhodu ve značně omezené životnosti odporové dráhy. Dalším ze způsobů snímání polohy korouhve je snímání pomocí několika jazýčkových kontaktů na pevné části snímače a magnetu na otáčivé korouhvi (viz obr. 3.7).



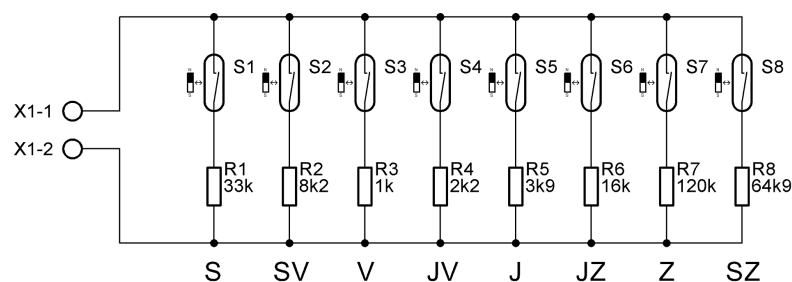
Obr. 3.7: Konstrukce snímače směru větru s jazýčkovými kontakty

Na plošném spoji je po obvodu kružnice umístěno několik jazýčkových kontaktů, které jsou navzájem propojeny přes rezistorovou síť. V případě, že se nad některým z kontaktů pro příslušný směr pohybuje magnet, který je připevněn na otočné korouhvi, je tento kontakt sepnutý a k výstupnímu konektoru je tak připojen příslušný rezistor.

Tento princip snímání polohy korouhve je principiálně velmi jednoduchý, avšak přesnost snímání není příliš vysoká. Jazýčkové kontakty jsou sepnuty i v případě, že magnetické pole magnetu již stačí na jejich sepnutí, tedy v poloze korouhve mimo jazýčkový kontakt – tak jak je naznačeno na obr. 3.7. Stejně jako v případě snímače rychlosti větru byl i pro snímání směru větru zvolen hotový výrobek s označením T115 (obr. 3.8) a zapojením dle obr.3.9.



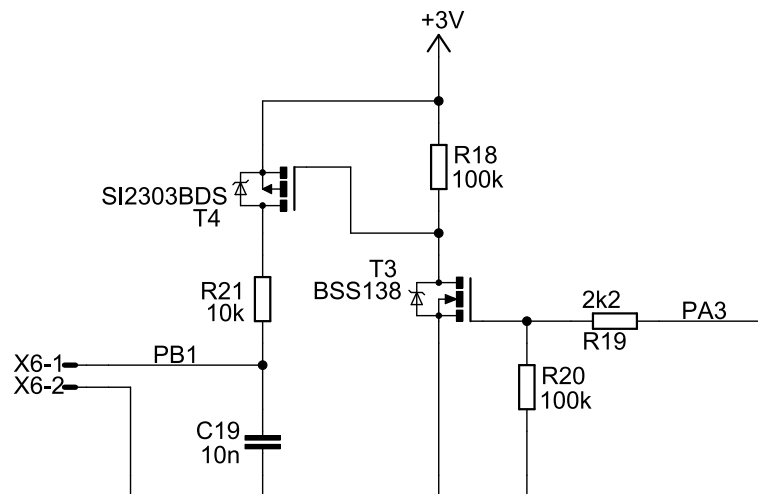
Obr. 3.8: Snímač směru větru T115, převzato z [19]



Obr. 3.9: Schéma zapojení snímače směru větru

Vhodnou konstrukcí tohoto snímače bylo možné dosáhnout sepnutí dvou sousedních kontaktů v případě, že je magnet v mezipoloze a tím naopak měření mírně zpřesnit a zvýšit rozlišení měření.

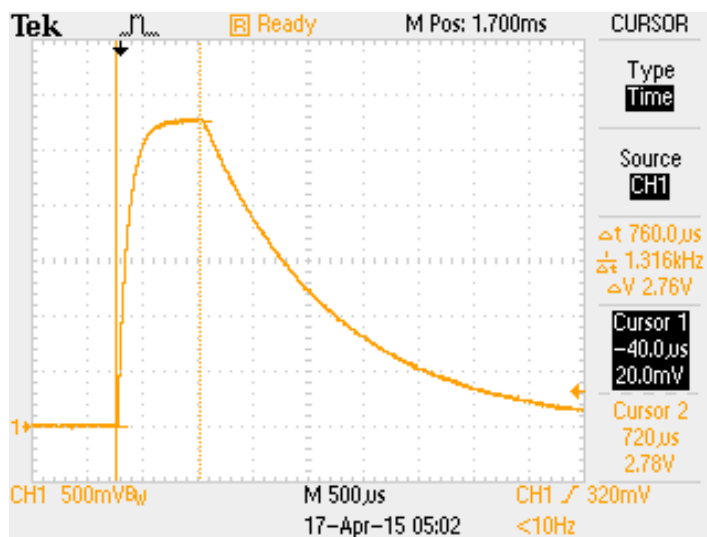
Snímač je zapojen jako část odporového děliče, který je napájen referenčním napětím A/D převodníku mikrokontroléru (toto napětí je na Discovery kitu shodné s napájecím napětím, tedy 3 V) a v závislosti na napětí na tomto děliči obslužný program určuje směr větru. Aby nebyl napěťový dělič napájen i v době, kdy neprobíhá měření, je zapojen do obvodu na obr. 3.10



Obr. 3.10: Obvod pro měření směru větru

Měření je možné ve chvíli, kdy je na vývodu mikrokontroléru PA3 vysoká napěťová úroveň. V tu chvíli je sepnut tranzistor T3 a tím pádem je přizemněno hradlo tranzistoru T4 a ten je tedy také sepnut a na rezistor R21 je přivedeno napájecí napětí mikrokontroléru (resp. zároveň referenční napětí A/D převodníku). Rezistor R21 tvoří jednu část napěťového děliče, jeho druhou polovinu tvoří snímač směru

větru připojený na vývod mikrokontroléru PB1 a k němu paralelní vstupní odpor A/D převodníku. Mírnou nevýhodou je nutnost čekání na nabití kondenzátoru C19 z nulové hodnoty na hodnotu měřeného napětí. Příklad časového průběhu napětí na kondenzátoru C19 těsně po sepnutí tranzistoru T4 je na obr.3.11.



Obr. 3.11: Nabíjení kondenzátoru C19 při měření

Maximální doba tohoto nabíjení je řádově ve stovkách mikrosekund, což však v dané aplikaci není na závadu. Při tomto měření bylo na vstupu převodníku nejvyšší možné měřené napětí (západní směr).

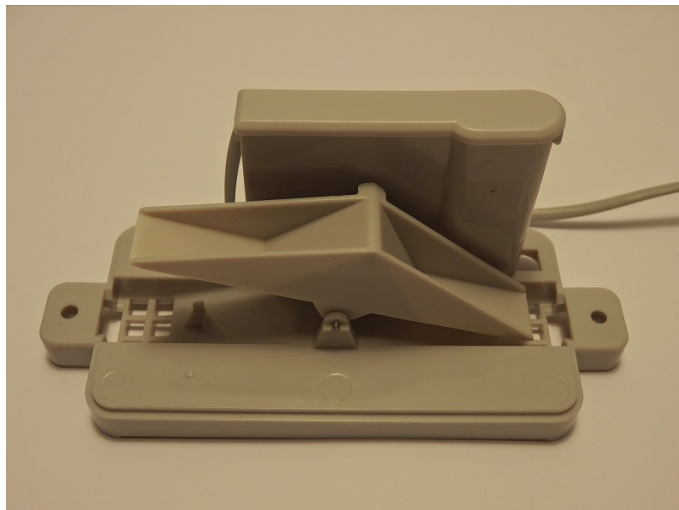
Výsledky výpočtů očekávaného teoretického odporu snímače R_S a výstupního napětí děliče U_{OUT} pro každý směr a pro referenční napětí 3V jsou shrnuty v tabulce 3.4. Skutečné hodnoty se mírně liší z důvodu nepřesnosti použitých rezistorů a neideálního (konečně velkého) vstupního odporu A/D převodníku.

Tab. 3.4: Teoretické výstupní napětí snímače směru větru

Směr	R_s [k Ω]	U_{OUT} [V]
S	33,00	2,30
SSV	6,57	1,19
SV	8,20	1,35
VSV	0,89	0,25
V	1,00	0,27
VJV	0,69	0,19
JV	2,20	0,54
JJV	1,41	0,37
J	3,90	0,84
JJZ	3,14	0,72
JZ	16,00	1,85
ZJZ	14,12	1,76
Z	120,00	2,77
ZSZ	42,12	2,42
SZ	64,90	2,60
SSZ	21,88	2,06

3.4.5 Snímač intenzity srážek

Pro automatizované měření intenzity srážek se kromě vážení nashromážděné vody využívá především systém s překlápěním člunkem a impulzním zpracováním. Princip tohoto mechanismu je znázorněn na obr. 3.12. Kryt srážkoměru (na obrázku je sejmuto) je vytvářen do tvaru nálevky s úzkým hrdlem, které usměrňuje nashromážděnou vodu do jedné z polovin překlápěcího člunku. Člunek má tvar mělké misky rozdělené na dvě poloviny a je otáčivý kolem vodorovné osy. Ve vrcholu člunku je umístěn magnet, který při průchodu přes střední polohu spíná jazýčkový kontakt umístěný v oddělené části snímače. Miska člunku, která je zrovna výše, se postupně plní vodou a při určitém množství nashromážděné vody se člunek působením gravitace překlápí. Nashromážděná voda oteče perforovaným dnem snímače, sepne jazýčkový kontakt a začne se plnit druhá miska člunku.



Obr. 3.12: Konstrukce srážkoměru s překlopným člunkem

Přesnost tohoto systému závisí na mechanické preciznosti výroby mechanismu člunku, jeho mechanické odolnosti a na přesném vodorovném ustavení srážkoměru. Aby tento systém mohl měřit i sněhové srážky, je třeba jej dovybavit vyhříváním s regulací, což ovšem zvyšuje energetickou náročnost srážkoměru. Pro konstrukci meteostanice je opět použit tovární výrobek – srážkoměr s označením T116. Tento model není vybaven elektrickým vyhřívacím systémem a je tedy schopný měřit pouze dešťové srážky. Měření rozlišení snímače bylo provedeno pomocí 2ml injekční stříkačky, kterou byly obě poloviny člunku postupně plněny vodou až do okamžiku jeho překlopení. Jedna polovina člunku se překlopila při nashromáždění 1,35 ml vody, druhá polovina při 1,4 ml vody. Uvažováním středního objemu jedné poloviny člunku $V = 1,375$ ml tedy nevznikne zásadní odchylka ani při srážkové činnosti, při které dojde pouze k jednomu překlopení člunku.

Půdorysné rozměry nálevky jsou $a \times b = 110 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ se zakulacenými rohy s rádiusem $r = 5 \text{ mm}$. Plošný obsah S tohoto tvaru je tedy

$$S = ab - 4 \left(r^2 - \frac{\pi r^2}{4} \right) = ab - (4 - \pi)r^2 = 110 \cdot 50 - (4 - \pi) \cdot 5^2 \doteq 5480 \text{ mm}^2. \quad (3.1)$$

Jednomu litru vodních srážek na ploše 1 metru čtverečního odpovídá výška vodního sloupce 1 mm, množství srážek h přepočtené na výšku souvislého vodního sloupce, které způsobí překlopení člunku je tedy

$$h = \frac{V}{S} = \frac{1,375 \cdot 10^{-3} \text{ l}}{5,48 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} = 0,25 \text{ mmH}_2\text{O}. \quad (3.2)$$



Obr. 3.13: Srážkoměr T116, převzato z [19]

Snímač intenzity srážek je ke vstupu mikrokontroléru připojen pomocí stejného obvodu jako v případě snímače rychlosti větru.

3.5 Barevná kamera

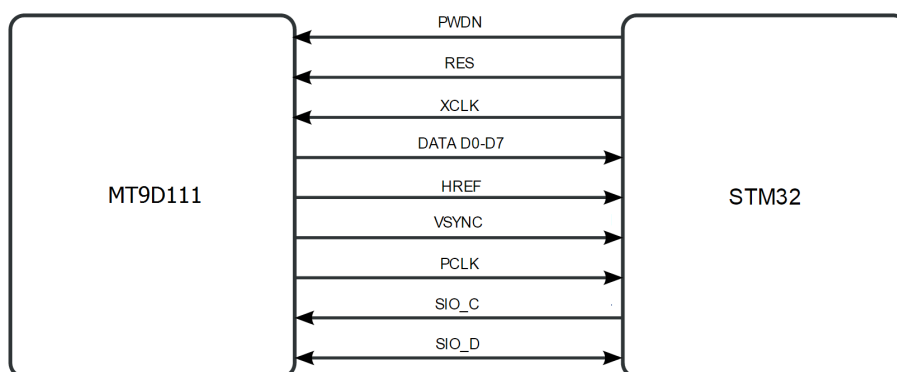
Pro doplnění informací o počasí je použit modul s barevnou kamerou MT9D111 (viz obr. 3.14).



Obr. 3.14: Kamera MT9D111, převzato z [22]

Tato kamera má nastavitelné rozlišení až do UXGA, tedy 1600×1200 . Obrazová data mohou být předávána v několika různých formátech (8, 10, 12 či 14 bitů, různá polarita řídicích signálů, různé standardy – RGB565, YCbCr 4:2:2 atd.) včetně formátu JPEG. Řídicí signály jsou do modulu přenášeny po sběrnici I²C, obrazová

data jsou přenášena rozhraním DCMI (viz obr. 3.15). Toto rozhraní obsahuje osmibitovou paralelní datovou sběrnici tvořenou signály D0 až D7 a tříbitovou řídicí sběrnici tvořenou signály PCLK (hodinový signál), HREF a VSYNC. Tyto signály generuje kamera a označují konce přenášovaných řádků, resp. celých snímků. Dále je možné kameru ovládat i signály pro Power Down mód a Reset. Tyto vývody mohou zůstat nezapojeny a tyto funkce kamery je možné aktivovat softwarově.

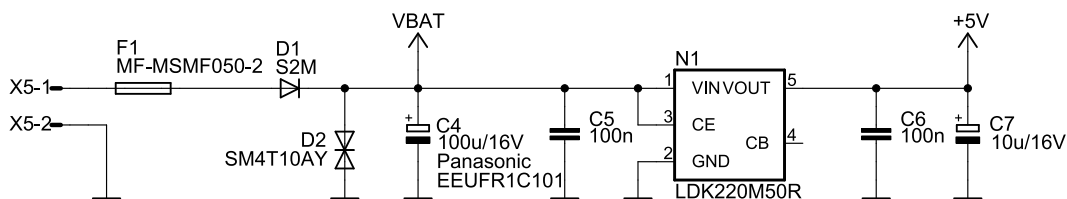


Obr. 3.15: Připojení kamery MT9D111 k mikrokontroléru

3.6 Napájecí zdroj

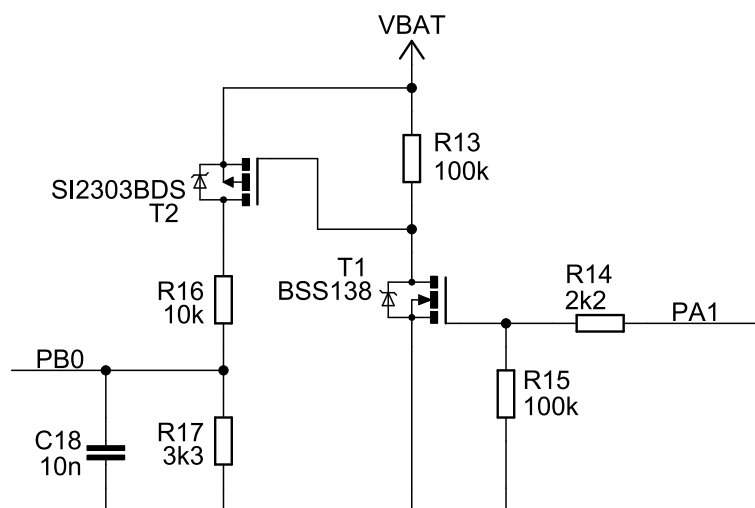
Vzhledem k tomu, že venkovní jednotka bude umístěna ve venkovních prostorách bez možnosti napojení na síťový rozvod, bylo nutné vyřešit bateriové či akumulátorové napájení jednotky a měření stavu baterie, resp. akumulátoru. Díky umístění venkovní stanice pod širým nebem bude možné použít nějakou z forem solárního napájení, resp. dobíjení akumulátoru. Pro účely tohoto tzv. energy harvesting se hodí např. gelové olověné akumulátory. Jednotka je tedy napájena tímto typem akumulátoru se jmenovitým napětím 6 V a kapacitou 10 Ah. Dobíjení akumulátoru ze solárního článku se bohužel nepodařilo do projektu zatím implementovat.

Použitý STM32F4 Discovery kit však není schopen pracovat s napájecím napětím, které může dodávat právě nabíjený akumulátor (až 7,5 V). Mezi akumulátor a napájecí piny kitu je tedy zařazen LDO regulátor s dostatečným vstupním napětovým rozsahem. Zapojení napájecí části venkovní jednotky je na obr. 3.16 a až na zařazení výše zmíněného regulátoru je shodné jako zapojení pro vnitřní jednotku.



Obr. 3.16: Schéma napájecí části venkovní jednotky

Napětí z akumulátoru je dále přivedeno na vstup A/D převodníku mikrokontroléru, který vyhodnocuje velikost tohoto napětí a odesílá informaci vnitřní jednotce. Neupravené napětí akumulátoru značně převyšuje maximální rozsah převodníku, a proto je na jeho vstup zařazen podobný obvod jako pro měření směru větru. Jeho schéma je na obr. 3.17. Tento obvod umožňuje připínání napětí akumulátoru V_{BAT} na vstup převodníku přes napěťový dělič pouze v době měření a snižuje tak energetickou náročnost zařízení.



Obr. 3.17: Schéma obvodu měření napětí akumulátoru

4 FIRMWARE MIKROKONTROLÉRŮ

Pro každou z jednotek, resp. pro každý mikrokontrolér byl napsán obslužný firmware, který řídí činnost jednotek.

Firmware venkovní jednotky je plně dokončen a otestován a probíhají na něm pouze změny, které si vynucuje vývoj firmwaru vnitřní jednotky. Jednotka se po většinu provozního času nachází v režimu se sníženou spotřebou Stop, ve kterém je odběr mikrokontroléru snížen na hodnotu nižší než $500\text{ }\mu\text{A}$ (viz katalogový list na [15]). Po 60 sekundách je jednotka spuštěna do běžného režimu, provede měření hodnot meteorologických prvků, snímání statického obrazu okolí a data vyšle vnitřní jednotce. Následně je venkovní jednotka opět uvedena do stavu s nízkou spotřebou.

Firmware vnitřní jednotky je schopen přijímat jak naměřené hodnoty meteorologických prvků, tak snímaná obrazová data. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny na displeji jednotky a jsou přístupné také na webové stránce, na kterou je při znalosti IP adresy webového serveru jednotky možný přístup z lokální sítě. Firmware této jednotky je stále v procesu vývoje. Nejdůležitějším dalším krokem při vývojových pracích bude implementování některé z metod přístupu jednotky do sítě internet a publikování dat o počasí a obrazových dat na veřejně přístupném umístění. Jako ideální se zatím jeví ftp přenos dat přímo na server poskytovatele internetového hostingu a další zpracování např. do formy SQL databáze přímo na serveru.

4.1 Vývojové prostředí a knihovny

Pro vývoj firmwaru bylo použito vývojové prostředí Keil μ Vision5. Byly použity volně šiřitelné knihovny CMSIS pro jádro ARM (obsahují hlavně definice symbolických názvů registrů a periférií a umožňují k nim pohodlný přístup) a knihovny Standard Peripherals Library od společnosti STMicroelectronics, které obsahují obslužné funkce periférií použitých v mikrokontrolérech STM. Všechny tyto knihovny jsou již integrovány ve vývojovém prostředí Keil μ Vision5. Dále byly použity volně šiřitelné, upravené a doplněné knihovny portálu STM32F4 Discovery [23]. Použita byla základní šablona projektu a především knihovny pro sériovou komunikaci pomocí sběrnice SPI, I²C a knihovny pro ovládání TFT displeje a pro snímač teploty a vlhkosti. Dále byly využity části kódů z oficiálních příkladů k perifériím od firmy STMicroelectronics a zdrojové kódy projektu LwIP (viz [24])

4.2 Obsluha modulu LAN8720

K ovládání obvodu LAN8720 byly využity knihovny z projektu portálu STM32F4 Discovery [23], které byly doplněny projektem LwIP [24]. V mikrokontroléru byl nastaven a spuštěn HTTP server, na který je možné přistupovat z lokální sítě. Pro komunikaci s nadřazeným prvkem sítě byla zvolena možnost volby pevné IP adresy 192.168.0.120. Po zadání této adresy do adresního řádku prohlížeče je načtena jednoduchá webová stránka, která kromě ladících informací zobrazuje i aktuální hodnoty meteorologických prvků, viz. obr. 4.1.

Meteostanice

Program		
Verze	27	
DPS	STM32F429-Discovery	
Cas	2015-08-02 18:44:50	
Network		
Pridelena IP	192.168.0.120	
MAC adresa	00-02-72-5C-1C-E8	
Gateway	192.168.0.1	
Sitova maska	255.255.255.0	
Rychlost	100Mbit	
Duplex	Full	
Leds		
LED	Status	Actions
GREEN	Off	Toggle On Off
RED	Off	Toggle On Off
ORANGE	Off	Toggle On Off
BLUE	Off	Toggle On Off
Meteohodnoty		
Teplota	23.2 °C	
Vlhkost	52.1 %	
Tlak	986.5 hPa	
Rychlost vetru	1.13 m/s	
Baterie	5.652 V	
Server		
All connections	1	
TX Bytes	2868	
RX Bytes	420	

StAu

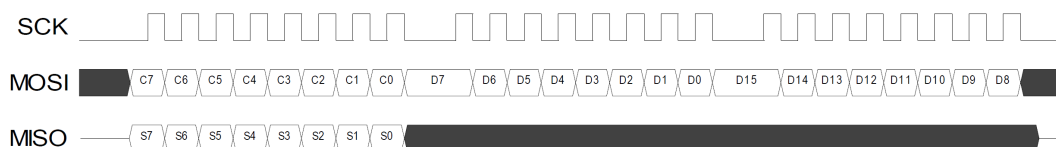
Obr. 4.1: Náhled webové stránky uložené ve webserveru

Webová stránka je společně se stránkou informující o nedostupnosti obsahu (chyba č. 404) uložena v souboru `fsdata.c`. Stránku je možné za běhu modifikovat tzv. SSI tagy. Pro každou stránku je možné nadefinovat různý počet SSI tagů a ty pak ve funkci `TM_ETHERNETSERVER_SSICallback` modifikovat. Aktualizace hodnot se provede po znovunačtení stránky.

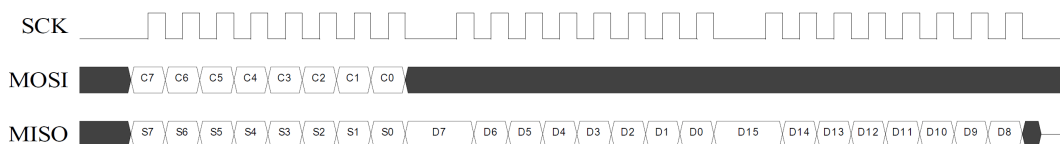
K zobrazení souboru (různých formátů včetně požadovaného formátu JPEG) slouží další funkce `TM_ETHERNETSERVER_OpenFileCallback`, k jeho zavření funkce `TM_ETHERNETSERVER_CloseFileCallback`, a pro čtení souboru je určena funkce `TM_ETHERNETSERVER_ReadFileCallback`. Po zadání IP adresy webserveru následované lomítkem a názvem souboru včetně přípony je volána první z uvedených funkcí a pokud má soubor formát, který dokáže prohlížeč otevřít, je prohlížečem zobrazen. V projektu je obrázek ukládán do souborového systému FATFS, který je zprovozněn v SDRAM paměti vývojového kitu. Bohužel z tohoto formátu se daří zobrazit obrázek pouze v prohlížečích Opera a Firefox. V prohlížeči Internet Explorer zobrazení není funkční (zřejmě nedostatečně definována hlavička JPEG souboru).

4.3 Obsluha modulů nRF24L01+

Tyto moduly komunikují s mikrokontrolerem pomocí sběrnice SPI. Jak již bylo naznačeno v kapitole 2.4 na straně 19, je tato sběrnice sériová a pro každý směr komunikace využívá samostatný vodič. Modul je v obou jednotkách meteostanice v roli Slave, je tedy řízen mikrokontrolerem. Ke komunikaci s modulem je přirozeně použita odpovídající periferie mikrokontroleru, která zajišťuje dodržení fyzických parametrů přenosu. Základem pro vývoj programu jsou především moduly `stm32f4xx_spi.c` z knihoven Standard Peripherals Library a `tm_stm32f4_spi.c` a `tm_stm32f4_nrf24l01.c` z knihoven portálu STM32F4 Discovery [23]. Obsluha se skládá ze zápisu přesně definovaných příkazů do řídicího registru, jejichž obsah ovlivňuje chování obvodu, čtení tzv. Status registru, který indikuje aktuální stav obvodu a ze zápisu a čtení datového registru, skrze který jsou přijímána, resp. vysílána data. Časové průběhy operací zápisu a čtení registrů obvodu jsou na obr.4.2 a 4.3.



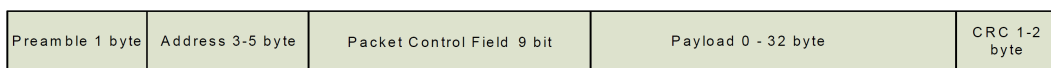
Obr. 4.2: Časové průběhy operace zápisu, převzato z [11]



Obr. 4.3: Časové průběhy operace čtení, převzato z [11]

V případě zápisu je z pohledu Master zařízení první vyslaný byte (bity C7 až C0) příkazem, který určuje, co se má provést s následně vyslanými daty Dx. V případě čtení naopak první byte určuje, jaký výstup je ze zařízení Slave požadován. Při operacích čtení i zápisu je vždy během vysílání příkazu ze zařízení Slave vyslán obsah Status registru (bity S7 až S0). Přesné časové souvislosti mezi stavy na sběrnici SPI jsou popsány v katalogovém listu obvodu (viz [11]).

Jednotlivé obvody je možné adresovat a vytvořit tak bezdrátovou síť. Při řešení projektu byly využity automatické funkce modulu – především funkce AutoACK, kdy je každý vyslaný paket protistranou potvrzen a funkce Auto Retransmission, která se v případě nepotvrzení příjmu protistranou pokusí vyslat paket opakovaně. Přenosy byly realizovány v režimu Enhanced ShockBurst, který umožňuje přenést v jednom paketu až 32 bytů užitečných dat. Paket kromě užitečných dat nese také data režijní (viz obr.4.4), která snižují maximální přenosovou rychlost obvodu.



Obr. 4.4: Enhanced ShockBurst paket obvodu nRF24L01+, převzato z [11]

Tato režijní data jsou tvořena především adresou obvodu, pro který je paket určen (Address), preambulí označující přenos pomocí Enhanced ShockBurst (Preamble), kontrolního pole (Packet Control Field) a CRC součtu, který je po příjmu porovnán se součtem, který vypočítá přijímač. V případě, že se tyto součty neshodují, není paket zařazen do výstupního bufferu přijímače a v případě aktivované funkce Auto ACK není vysílači potvrzen bezchybný příjem. Vysílač tak (pokud je tak nastaven) provede opakované vyslání paketu.

Pro přenos meteorologických dat je použit paket o přesně definované struktuře, která je patrná z tabulky 4.1.

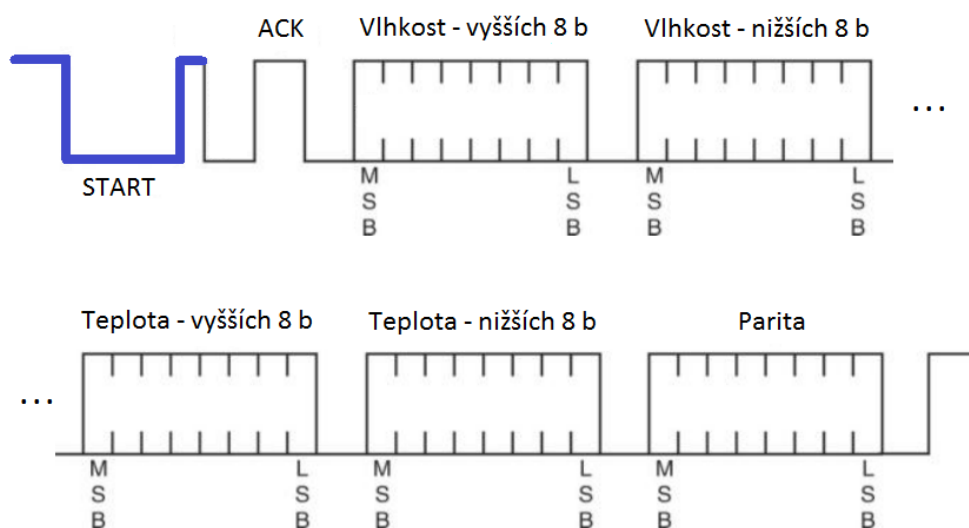
Tab. 4.1: Paket pro přenos meteodat

Byte	Hodnota / význam	Pozn.
0	42 = 0x2A	Začátek paketu
1–2	Teplota	299 $\Rightarrow$ 29,9 °C
3–4	Relativní vlhkost	567 $\Rightarrow$ 56,7 %
5–6	Rychlost větru	724 $\Rightarrow$ 7,24 ms ⁻¹
7	Směr větru	0 $\Rightarrow$ S, 1 $\Rightarrow$ SSV, ...
8 – 11	Tlak	10026 $\Rightarrow$ 1002,6 hPa
12	Srážky	Počet překlopení člunku za poslední minutu
13–14	Napětí akumulátoru	$U_{BAT} = 2,241 \cdot \text{hodnota} / 1000$

4.4 Obsluha meteorologických čidel

4.4.1 Čidlo teploty a vlhkosti vzduchu DHT22

Obvod DHT22 komunikuje pomocí vlastního protokolu po jednovodičové sběrnici, jejíž základní časový průběh je znázorněn na obr. 4.5.



Obr. 4.5: Časový průběh výstupu DHT22

Ke sběrnici je připojen pull-up rezistor, takže její klidová úroveň je H a může být připojenými zařízeními s výstupem s otevřeným kolektorem tzv. stažena do úrovně L. Nejprve je mikrokontrolérem vytvořena na sběrnici starovací podmínka (označena modře). Jedná se o stažení sběrnice do nízkého stavu na minimálně 800 μ s a její

následné uvolnění na minimálně $30\ \mu\text{s}$. Pokud je čidlo správně připojeno na sběrnici a je schopno provozu, vygeneruje ACK signál – $80\ \mu\text{s}$ stažení sběrnice a její stejně dlouhé uvolnění. Následují čidlem generovaná dvoubytová data pro vlhkost i teplotu vzduchu v pořadí od nejvýznamnějšího bytu po méně významný byte. V každém bytu je pořadí vysílaných bitů opět od nejvýznamnějšího po nejméně významný. Hodnoty datových bitů jsou tvořeny dvěma různými kombinacemi stavu sběrnice. Jednotlivé možnosti jsou shrnuty v tab. 4.2.

Tab. 4.2: Doby trvání signálů DHT22

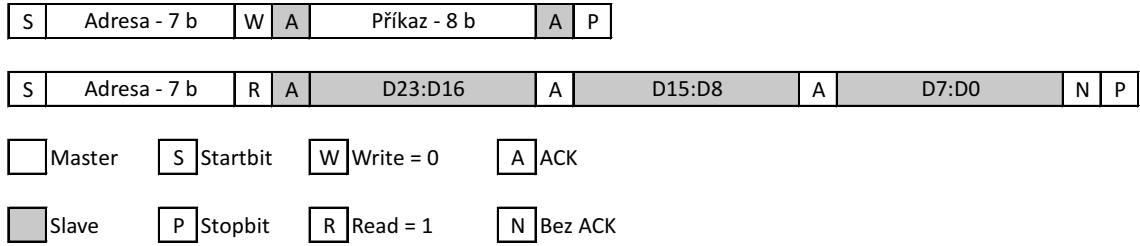
Signál	Generuje	Průběh
START	Mikrokontrolér	$800\ \mu\text{s}$ L, $30\ \mu\text{s}$ H
ACK	Čidlo	$80\ \mu\text{s}$ L, $80\ \mu\text{s}$ H
Data - log. 1	Čidlo	$50\ \mu\text{s}$ L, $70\ \mu\text{s}$ H
Data - log. 0	Čidlo	$50\ \mu\text{s}$ L, $26 - 28\ \mu\text{s}$ H

Pro tento protokol nemají mikrokontroléry řady STM32F4 příslušnou dedikovanou periférii. K obsluze byla použita knihovna `tm_stm32f4_am2301.c` z portálu [23]. Tato knihovna obsahuje všechny potřebné funkce pro ovládání senzoru včetně ošetření chybových stavů při přenosu.

4.4.2 Čidlo atmosférického tlaku

Pro čidlo atmosférického tlaku byla napsána vlastní knihovna `stau_MS56xx.c`, která dále využívá mimo jiné moduly ze Standard Peripheral Library. Obvod je nastaven na komunikaci pomocí sběrnice I²C a pomocí připojení jednoho z vývodů buď na zemní nebo napájecí vývod obvodu je možné změnit jeden bit jeho adresy. Sběrnice I²C je také sériová sběrnice, narozdíl od sběrnice SPI je však každé zařízení v rámci jedné sběrnice identifikováno svou jedinečnou adresou. Obsluha tohoto obvodu je v rámci běžné I²C komunikace standardní.

Obvod je řízen zápisem příkazu do řídicího registru obvodu. Při zápisu dat je využita adresa zařízení, která má na pozici LSB zapsanu logickou nulu. Naopak při požadavku na čtení dat z obvodu je poslední bit adresy nastaven na jedničku. Adresa je tak v podstatě pouze sedmibitová. Na obr. 4.6 je příklad zápisu osmibitového příkazu do obvodu a následná reakce obvodu ve formě vyslání tří bytů naměřených hodnot. Vhodnou hodnotou příkazu je možné nastavit obvod do různých režimů, nebo z něj načítat požadovaná data (kalibrační konstanty, výsledky převodů atd).



Obr. 4.6: Zápis a čtení dat z obvodu MS5611-01BA03

Vzhledem k tomu, že atmosférický tlak je závislý na teplotě okolí, je čidlo vybaveno i obvodem pro určení aktuální teploty. Výstupní hodnoty měření hodnot atmosférického tlaku a teploty vzduchu jsou dostupné pouze jako výsledky A/D převodu výstupních signálů obou senzorů. Tyto výstupy A/D převodníku je nutno kompenzovat a přepočíst programově. K tomu slouží šest kalibračních konstant, které jsou pro daný kus jedinečné a jsou výrobcem trvale uloženy do PROM paměti obvodu.

Nejprve je tedy nutné načíst šest šestnáctibitových kalibračních konstant C_1 až C_6 a výsledky A/D převodu pro atmosférický tlak (D_1) a teplotu vzduchu (D_2). Dále je proveden výpočet dle vztahů

$$dT = D_2 - C_5 \cdot 2^8, \quad (4.1)$$

$$TEMP = 2000 + \frac{dT \cdot C_6}{2^{23}}, \quad (4.2)$$

$$OFF = C_2 \cdot 2^{16} + \frac{C_4 \cdot dT}{2^7}, \quad (4.3)$$

$$SENS = C_1 \cdot 2^{15} + \frac{C_3 \cdot dT}{2^8} \quad (4.4)$$

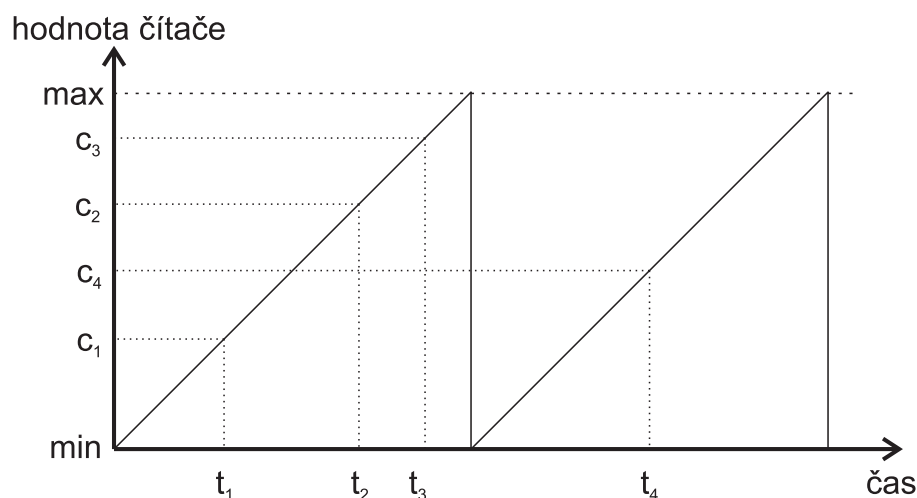
a konečně

$$P = \frac{\frac{D_1 \cdot SENS}{2^{21}} - OFF}{2^{15}}, \quad (4.5)$$

ve kterých dT je rozdíl mezi aktuální teplotou a teplotou, při které byla provedena kalibrace, $TEMP$ je aktuální teplota, OFF a $SENS$ jsou offset, resp. citlivost senzoru tlaku při aktuální teplotě a P je vypočtený aktuální atmosférický tlak. Při výpočtu těchto hodnot mikrokontrolérem jsou místo dělení a násobení mocninami dvěma použity bitové posuny tak, aby byl výpočet co nejjednodušší.

4.4.3 Snímač rychlosti větru

Výstup snímače je tvořen spínacím kontaktem jazýčkového relé. Pomocí vstupního obvodu na základní desce venkovní jednotky je získán obdélníkový signál na vstupním vývodu mikrokontroléru. Ten je využit k zachycení rozdílu dvou stavů jednoho čítače, který je nastaven v módu Input capture. Základní princip tohoto režimu čítače je znázorněn na obr. 4.7. Čítač čítá od minimální hodnoty do maximální a pak skokem přejde opět do minima. Pokud jsou např. v okamžicích t_1 a t_2 zachyceny stavy čítače c_1 a c_2 , je možné z rozdílu těchto stavů a z rychlosti čítání čítače odvodit časovou prodlevu mezi okamžiky t_1 a t_2 .



Obr. 4.7: Základní princip režimu čítače Input capture

V tomto režimu je tedy externí přerušení nastaveno tak, aby během něj bylo možné přečíst aktuální stav čítače, při dalším přerušení je zachycen stav čítače znovu a jednoduchým výpočtem je tak určena časová prodleva mezi těmito dvěma přerušeními. Obslužný program dále řeší i situaci, kdy proběhnou jednotlivá přerušení v různých bězích čítače (na obr. 4.7 tomu odpovídají okamžiky t_3 a t_4). Z délky této prodlevy je pak možné vypočíst rychlost větru. Minimální rychlost větru, kterou je možné zaznamenat použitým snímačem je s rezervou vyšší než 0,2 m/s. Vítr o nižší rychlosti již nedokáže překonat tření v uložení rotoru snímače a měřená hodnota je tedy nulová. Této rychlosti odpovídá zhruba jedna otáčka snímače za 2,5 s, tedy jednomu výstupnímu impulzu za 1,25 s a minimálně po tuto dobu musí být prováděno měření. Toho je docíleno měřením během snímání a vysílání obrazových dat, které trvá přibližně 2 sekundy.

4.4.4 Snímač směru větru

Snímač směru větru mění svůj ohmický odpor v závislosti na aktuálním směru. Toho je využito zapojením tohoto snímače do napěťového děliče a převodem napětí na tomto děliči A/D převodníkem mikrokontroléru. Pro tuto funkci byla napsán vlastní modul `stau_adc.c`, který sdružuje funkce pro měření směru větru a měření napětí na akumulátoru. Nastavení převodníku je standardní dle příkladů, které poskytuje firma STMicroelectronics. Převodník je nastaven do módu jednotlivých převodů s manuálním spouštěním. Vždy je nejprve obvodem popsáním v kapitole 3.4.4 na straně 29 připojeno referenční napětí na vstup děliče a po krátké časové prodlevě je převedena analogová hodnota na digitální, která je pak dále zpracována. V tabulce 4.3 jsou zaznamenány teoretické hodnoty výsledného převodu A/D_{TEOR} všech očekávaných napětí na výstupu děliče (tato napětí jsou shrnuta v tabulce 3.4 na straně 33). Jedná se o hodnoty převodu při referenčním napětí $U_{\text{ref}} = 3 \text{ V}$ a při rozlišení převodníku 12 bitů (4096 možných úrovní). Dále jsou v tabulce zaznamenány reálné naměřené hodnoty převodu A/D_{REAL} a také rozsahy, které jsou pro jednotlivé směry akceptovány. Rozsahy jsou zvoleny tak, aby jejich hranice ležely přesně uprostřed mezi dvěma sousedními reálně naměřenými hodnotami.

Tab. 4.3: Teoretické a reálné hodnoty převodu

Směr	A/D_{TEOR}	A/D_{REAL}	Akceptovaný rozsah
S	3143	3109	2984 – 3235
SSV	1623	1565	1391 – 1740
SV	1845	1933	1741 – 2125
VSV	335	326	299 – 353
V	372	394	354 – 435
VJV	263	259	221 – 298
JV	738	739	621 – 858
JJV	505	528	436 – 620
J	1149	1227	1064 – 1390
JJZ	978	961	859 – 1063
JZ	2520	2564	2461 – 2668
ZJZ	2397	2293	2126 – 2460
Z	3780	3774	3669 – 3880
ZSZ	3309	3337	3236 – 3438
SZ	3548	3553	3439 – 3668
SSZ	2810	2826	2669 – 2983

4.5 Obsluha barevné kamery MT9D111

Barevná kamera MT9D111 je ovládána pomocí dvou standardizovaných sběrnic I²C a DCMI a dalšího hodinového signálu XCLK. Na modulu kamery jsou dostupné také signály pro přepnutí kamery do úsporného módu, toto přepnutí však lze provést i softwarově pomocí sekvence příkazů, a proto nebyly tyto signály využity.

Pomocí sběrnice I²C je možné zapisovat do ovládacích registrů kamery příslušné hodnoty a ovládat tak parametry snímání obrazu a jeho přenosu. Samotný přenos obrazových dat je pak prováděn pomocí paralelní sběrnice DCMI.

Základním předpokladem pro komunikaci s kamerou je přivedení hodinového signálu na její vstup XCLK. Tento signál musí mít v případě požadavku na snímání v kontinuálním režimu relativně vysokou frekvenci (řádově desítky MHz). Pro snímání v režimu jednotlivých snímků bylo možné zvolit nižší frekvenci a delší přenos snímku do paměti mikrokontroléru využít jako žádané zpoždění, během kterého byla změřena rychlost větru. Z hlediska mikrokontroléru byl pro generování tohoto hodinového kmitočtu využit výstupní pin PA8, kterému byla nastavena alternativní funkce MCO1. Frekvence signálu, který je na tomto pinu generován je navázán na frekvenci externího krystalu (8 MHz) a předdělička je nastavena na hodnotu 1. Frekvence signálu je tedy 8 MHz.

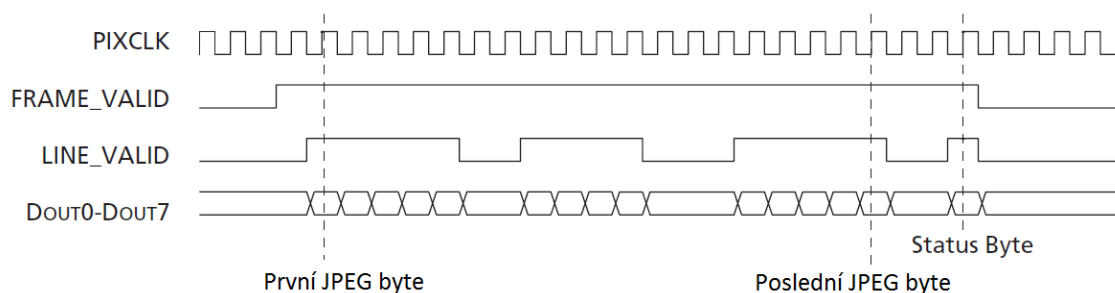
Kamera je řízena zápisem hodnot do registrů, které jsou rozděleny do tří základních bank či stránek. Banka 0 obsahuje několik desítek registrů pro řízení vlastností snímače kamery. Tyto registry ovládají mimo jiné nastavení jednotlivých barevných složek, volbu aktivní hrany hodinového signálu a jeho případné dělení pro interní potřeby kamery či použití externího blesku a generování výstupních signálů pro jeho řízení. Registry v bankách 1 a 2 nastavují parametry procesoru, který v reálném čase zpracovává obraz ze snímače (tzv. IFP - Image Flow Processor). Těchto tzv. IFP registrů je opět několik desítek a kromě jiného ovládají rozlišení výstupního obrazu, počet snímků za sekundu, formát výstupních dat apod. Několik těchto registrů ovládá přímo vlastnosti JPEG enkodéru. Nastavení většiny registrů bylo převzato z [25], hodnoty několika registrů však musely být upraveny.

Vzhledem k omezené paměťové kapacitě vývojového kitu byl zvolen formát JPEG, rozlišení 320 × 240 obrazových bodů. Příklad výsledného načteného obrázku je na obr. 4.8.



Obr. 4.8: Výstupní obrazová data z kamery

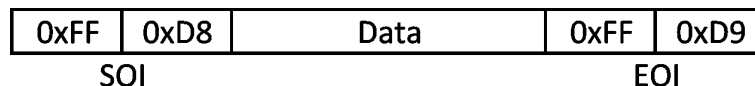
Datová velikost snímku ve formátu JPEG je proměnná, protože závisí kromě nastavení parametrů také na obsahu snímku. Při nastavení výstupního formátu kamery na formát JPEG tedy rozhraní DCMI funguje mírně odlišným způsobem, než v případě použití formátů, které mají pevně danou velikost výstupních dat. Signál kamery `LINE_VALID` je využit k označení platných dat (protože označování konců řádků není ve formátu JPEG smysluplné) a signál `FRAME_VALID` označuje celý JPEG snímek, viz obr. 4.9. Aby DCMI periferie mikrokontroléru správně zachytila tento výstupní signál kamery, musí být nastavena do režimu hardwarové synchronizace.



Obr. 4.9: Výstupní signály kamery MT9D111, převzato z [26]

Pro načtení celého JPEG snímku do paměti mikrokontroléru je využit DMA řadič, ovšem pro označení konce snímku není možné využít přerušení, které je je DMA řadičem standardně generováno po naplnění přidělené paměti, protože není předem známá datová velikost snímku. Je tedy využito přerušení od DCMI periferie, které je generováno v návaznosti na signál `FRAME_VALID` a je znovu přenastavena

periferie DMA (nedojde-li k naplnění přidělené paměti, není periférií DMA vyvoláno přerušení a periferie očekává další data). Data jsou poté odvysílána jednoduchým protokolem, který je znázorněn na obr. 4.10.



Obr. 4.10: Protokol pro přenos obrazových dat

Na začátku vysílání je zařazena dvoubytová sekvence 0xFF a 0xD8, která je označována jako Start Of Image – SOI. Při kódování obrazových dat do formátu JPEG je zaručeno, že žádné dva po sobě následující datové byty nemají tyto hodnoty. Obdobně je na konci souboru vložena sekvence 0xFF a 0xD9, která je označována jako End Of Image – EOI.

Po přenosu je třeba na straně serveru vytvořit na začátku souboru hlavičku, která má v nejjednodušší verzi 10 bytů (viz tab. 4.4) a pro každý snímek se stejným rozlišením a vzorkováním složek je stejná.

Tab. 4.4: Hlavička JPEG souboru

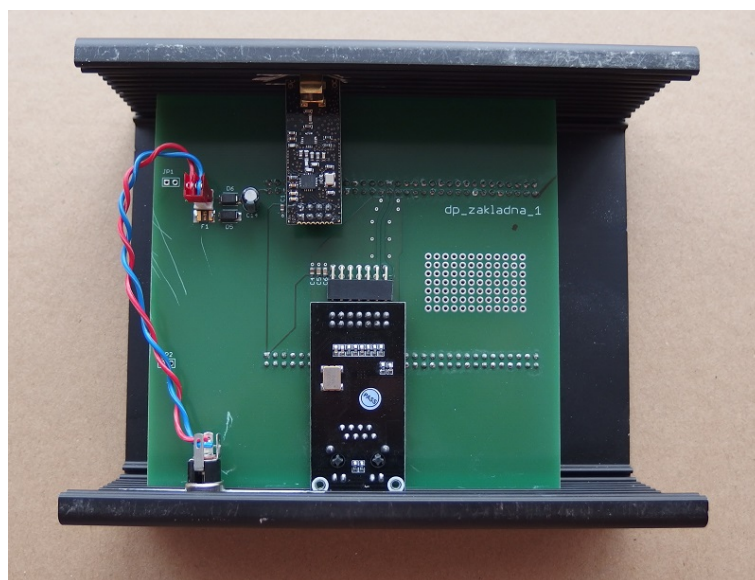
Byte č.	Počet bytů	Význam / hodnota
0 a 1	2	SOI - Start Of Image (0xFF a 0xD8)
2 a 3	2	Šířka obrazu v pixelech
4 a 5	2	Výška obrazu v pixelech
6	1	Počet barevných složek (3 pro RGB)
7	1	Vzorkování jasové složky (4 pro formát 4:2:2)
8	1	Vzorkování doplňkové složky C_B (2 pro formát 4:2:2)
9	1	Vzorkování doplňkové složky C_R (2 pro formát 4:2:2)

Data, která s hlavičkou tvoří již spustitelný soubor, jsou uložena v paměti SDRAM vývojového kitu v souborovém systému FATFS. Během přenosu však dochází k občasnému kolizím s obslužným softwarem IP stacku, obrázek se zhruba v jedné desetině případů neuloží v čitelné formě. Na odstranění této vady jsou zaměřeny probíhající vývojové práce.

5 MECHANICKÉ PROVEDENÍ JEDNOTEK

5.1 Vnitřní jednotka

Plošný spoj základní jednotky je navržen tak, aby ho bylo možné zasunout do drážek hliníkové krabičky 1455Q1601 od firmy Hammond Manufacturing (viz [27]). Tato krabička má na vnitřních bočnicích drážky, které jsou určeny pro uchycení plošného spoje s šířkou 120 mm. Deska plošného spoje je tedy navržena tak, aby bylo možné těchto drážek využít. Na povrchu krabičky bylo třeba vytvořit otvory pro displej, průchod anténního konektoru rádiového modulu, konektoru rozhraní ethernet a pro kruhový konektor napájecího zdroje. Nezakrytovaná krabička je na obr. 5.1.



Obr. 5.1: Vnitřní uspořádání vnitřní jednotky

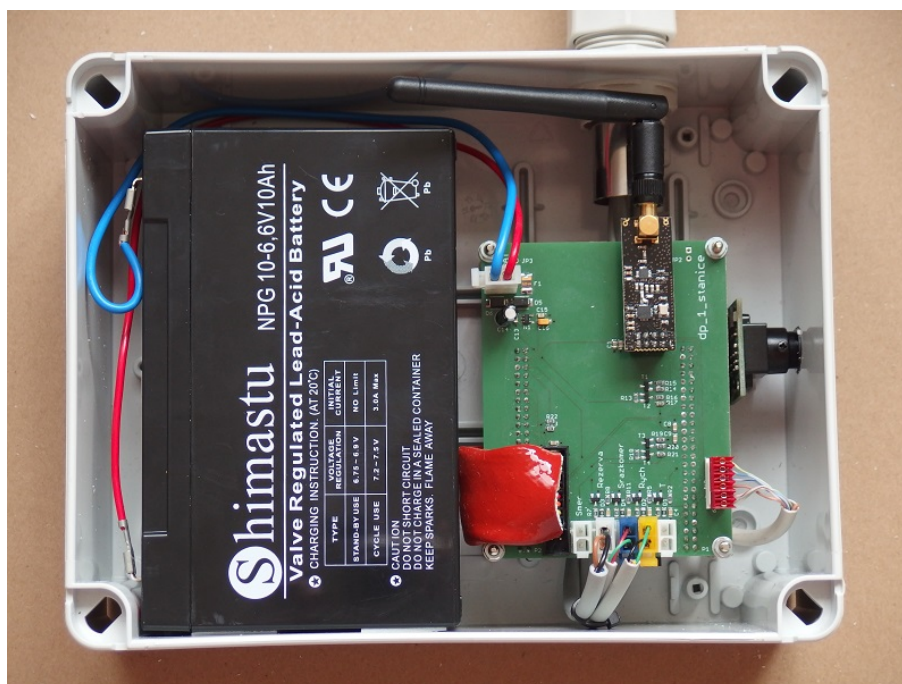
Krabička je v porovnání s displejem relativně velká a nepůsobí tedy příliš elegantním dojmem. Navíc zapojení modulů s externími obvody nebylo jednoduché a při jejich zasouvání do dutinkových lišt bylo nutné mírně (vratně) zdeformovat bočnice krabičky. Pro oživení a ověření funkcí jednotky je však zvolené řešení dostačující a funkční. Případné další kroky vývoje vnitřní jednotky by spíše směřovaly k opuštění varianty s využitím vývojového kitu, což by sice vyžadovalo vyšší nároky při návrhu plošného spoje, ale zároveň by přineslo jistou vývojovou flexibilitu především v mechanické části návrhu. Další fotografie mechanického řešení vnitřní jednotky je na obr. 5.2 a v datové příloze.



Obr. 5.2: Mechanické provedení vnitřní jednotky

5.2 Venkovní jednotka

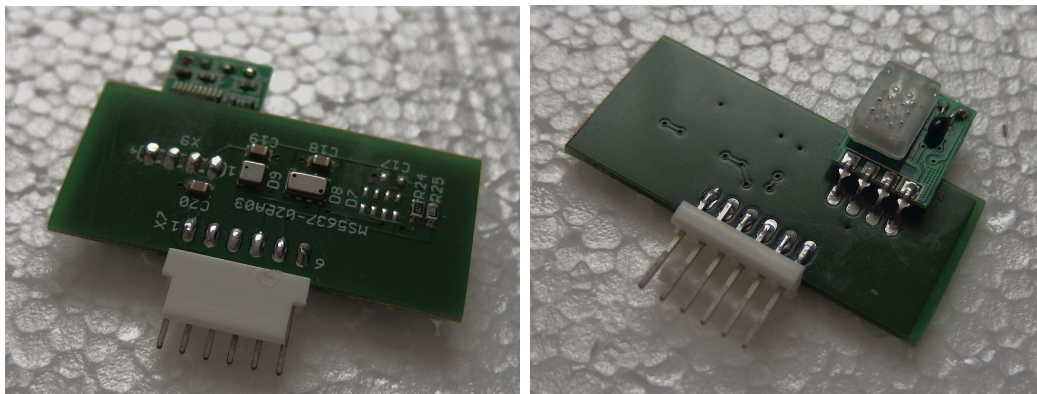
Celá venkovní jednotka kromě meteorologických čidel je umístěna v instalační krabici 1SL0856A00 od výrobce ABB (katalogový list viz [28], str. 6/67) o rozměrech 220 mm × 170 mm × 80 mm. Vnitřní uspořádání jednotky v instalační krabici je na obr. 5.3.



Obr. 5.3: Vnitřní uspořádání venkovní jednotky

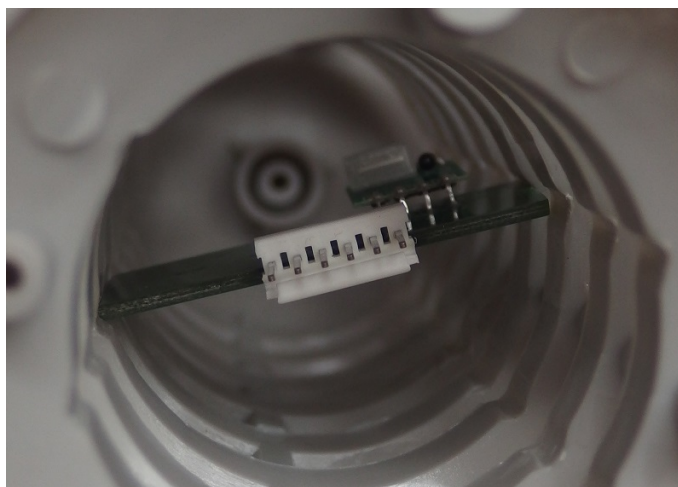
Tato instalační krabice má zcela odnímatelné víko, což umožňuje snadnou manipulaci s částmi meteostanice a při zavřeném víku má krytí IP65, což je plně dostačující pro použití ve venkovním prostředí. Uvnitř této krabice je pomocí 30mm distančních sloupků přišroubován navržený plošný spoj s připojeným vývojovým modulem, do prostoru krabice je skrz vývodku PG21 vložen spodní konec trubkového držáku, na kterém jsou připevněny konzoly s meteorologickými čidly a také jsou jeho vnitřkem přivedeny veškeré vodiče, kterými mikrokontrolér komunikuje s čidly. Do otvoru v boční stěně je vložen objektiv kamery a je utěsněn tmelem. O vhodnosti a odolnosti tohoto řešení bude třeba rozhodnout až po delším používání meteostanice, především během podzimního a zimního období. Anténa radiového komunikačního modulu je ohnuta tak, aby byla umístěna uvnitř krabice. Během testování bylo zjištěno, že při nastaveném výkonu radiomodulu na 0 dBm a komunikační vzdálenosti do 70 m není třeba anténu vyvádět na povrch instalační krabice. V krabici je dále umístěn olověný gelový akumulátor o jmenovitém napětí 6 V a kapacitě 10 Ah. Výhodou gelového provedení akumulátoru je možnost umístění akumulátoru v libovolné poloze. Akumulátor je ke stěně krabice uchycen oboustrannou lepicí páskou.

Čidla atmosférického tlaku, teploty a vlhkosti vzduchu jsou napájeny na malém plošném spoji – viz obr. 5.4.



Obr. 5.4: Plošný spoj s čidly

V návrhových datech je tento plošný spoj součástí plošného spoje venkovní jednotky a fyzicky je od zbytku plošného spoje oddělen drážkováním, které umožnilo snadné rozdělení obou částí plošného spoje. Tento plošný spoj byl po důkladném nalakování vložen do vnitřních drážek radiačního krytu. Způsob jeho vložení do krytu je patrný z obr. 5.5.



Obr. 5.5: Plošný spoj s čidly vložený do krytu (před zalakováním)

Meteorologická čidla včetně osazeného radiačního krytu jsou umístěna na plastových konzolách, které jsou dodávány společně s čidly. Tyto konzoly jsou pak umístěny na kovové nosné trubce, která je skrze vývodku zasunuta do krabice jednotky. Celkový pohled na sestavu je na obr. 5.6 a dále pak v obrazové příloze.



Obr. 5.6: Kompletní venkovní jednotka s čidly

Celá jednotka je umístěna na ploché střeše starého zahradního domku ve vzdálenosti přibližně 40 m od vnitřní jednotky a v dosavadní fázi vývoje byla z důvodu snadné snímatelnosti přichycena 400mm vázacími páskami k provizorní konstrukci, která zajišťovala vodorovné usazení jednotky. Poloha jednotky sice není ideální (vítr z jihu a jihovýchodu je cloněn stromem), ale pro ověření funkčnosti a vlastností jednotky je poloha dostačující.

6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout, vyrobit, oživit a otestovat dvě jednotky tvořící systém meteostanice, které budou řízeny mikrokontroléry s jádrem ARM Cortex-M4. Jedna z jednotek – venkovní – má za úkol měřit a zpracovávat data z meteorologických čidel a barevné kamery a tato data bezdrátově odesílat do vnitřní jednotky, jejímž úkolem má být vizualizace dat, jejich zpřístupnění pomocí protokolu ethernet a vytvoření vhodného prostředí pro ovládání celého systému.

Byly navrženy dva plošné spoje, které vytvořily platformy propojující použité moduly. Vnitřní jednotka byla sestavena z vývojového kitu STM32F429 Discovery, modulu pro připojení k síti ethernet LAN8720 a modulu zprostředkující rádiovou komunikaci s venkovní jednotkou. Venkovní jednotka byla vytvořena také jedním z vývojových modulů, konkrétně STM32F4 Discovery kitem, rádiového modulu a k vývodům mikrokontroléru byly připojeny výstupy meteorologických čidel pro měření teploty a vlhkosti vzduchu, atmosférického tlaku, rychlosti a směru větru a intenzity kapalných srážek. Byly určeny parametry těchto čidel a postupy získání potřebných dat. Tyto naměřené parametry se v rámci testování podařilo bezdrátově přenést a zobrazit na displeji vnitřní jednotky a na webové stránce ve webserveru vnitřní jednotky. Aktualizace naměřených dat na webserveru probíhá pomocí tzv. SSI tagů. Dále bylo vyřešeno snímání okolí venkovní jednotky barevnou kamerou, zpracování obrazových dat ve formátu JPEG a jejich přenos do vnitřní jednotky.

Byl také vyřešen mechanický návrh venkovní jednotky. Ta byla navržena tak, aby se všechny obvody včetně napájecí baterie vešly do instalační krabice s krytím IP65 a vodiče jednotlivých čidel byly do krabice zavedeny společným trubkovým držákem čidel. Kamera je umístěna v otvoru v boční stěně krabice. Tato varianta provedení se prozatím jeví jako dostatečně robustní pro použití ve venkovním prostředí. Úplné ověření vhodnosti použitého řešení proběhne zřejmě až v měsících s chladnějším a vlhčím počasím. Vnitřní jednotka byla vmontována do hliníkové krabičky, do které byly vytvořeny příslušné otvory. Pro další vývoj bude zřejmě vhodné opustit variantu vytvoření jednotky na základě vývojového kitu. Kit není přímo určen pro zabudování do hotového přístroje a jeho provedení tak silně limituje možnost estetické montáže.

Napájení jednotek bylo vyřešeno použitím síťového adaptéru u vnitřní jednotky, resp. olověného akumulátoru na straně venkovní jednotky. Olověný gelový akumulátor se jeví jako vhodný zdroj pro budoucí využití solárního zdroje elektrické energie.

Během práce na projektu se vyskytly potíže s některými funkcemi jednotky, které se prozatím nepodařilo uspokojivě vyřešit. Především zobrazení přenesených obrazových dat ve webovém prohlížeči vykazuje náhodné chyby, jejichž příčinu se dosud nepodařilo odhalit. Zhruba v jedné desetině pokusů o zobrazení dat dochází k selhání. Dále nebyl plně vyhodnocen signál z čidla intenzity srážek. Při dalším

vývoji bude pozornost zaměřena na přenos naměřených dat na veřejně přístupný datový prostor (webhosting) a vyhodnocení dat přímo na webhostingovém serveru, včetně ukládání historie naměřených dat.

LITERATURA

- [1] Praha Klementinum. *Portál ČHMÚ : Historická data : Počasí : Praha Klementinum*. [online]. [cit. 2014-11-15]. Dostupné z URL: <<http://goo.gl/MYj1P0>>.
- [2] ALADIN. *Website of the ALADIN Consortium*. [online]. [cit. 2014-11-16]. Dostupné z URL: <<http://www.cnrm.meteo.fr/aladin/?lang=en>>.
- [3] Dream Catcher. *Instalace meteobudky*. [online]. [cit. 2014-12-07]. Dostupné z URL: <<http://beta.dreamcatcher.cz/list/meteorologicka-budka/dokumentace/instalace-meteobudky/>>.
- [4] Český hydrometeorologický úřad. *INFOMET - Počasí v lednu 2011*. [online]. [cit. 2014-12-07]. Dostupné z URL: <<http://www.infomet.cz/index.php?id=read&idd=1296895431>>.
- [5] SOUKUPOVÁ, Jana. *Atmosférické procesy: (základy meteorologie a klimatologie)*. Vyd. 6. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011, 193 s. ISBN 978-80-213-2234-9.
- [6] Wikipedie: Otevřená encyklopedie. *Vlhkost vzduchu*. [online]. [cit. 2014-11-27]. Dostupné z URL: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Vlhkost_vzduchu&oldid=10647460>.
- [7] STMicroelectronics. *Discovery kit for STM32 F429/439 lines - with STM32F429ZI MCU*. [online]. [cit. 2014-10-12]. Dostupné z URL: <<http://www.st.com/web/catalog/tools/FM116/SC959/SS1532/PF259090>>.
- [8] STMicroelectronics. *STM32F429ZI*. [online]. [cit. 2014-10-12]. Dostupné z URL: <<http://www.st.com/web/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1577/LN1806/PF255419>>.
- [9] WaveShare. *LAN8720A ETH Board*. [online]. [cit. 2014-12-03]. Dostupné z URL: <<http://www.wvshare.com/product/LAN8720-ETH-Board.htm>>.
- [10] Microchip. *LAN8720A - Small Footprint RMII 10/100 Ethernet Transceiver with HP Auto-MDIX Support*. [online]. [cit. 2014-12-01]. Dostupné z URL: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/8720a.pdf>>.
- [11] Nordic Semiconductor. *nRF24L01+ Product Specification*. [online]. [cit. 2014-10-14]. Dostupné z URL: <<http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01P>>.

- [12] Český telekomunikační úřad. *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/05.2014-3*. [online]. [cit. 2014-10-14]. Dostupné z URL: <http://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok_2014/vo-r_10-05_2014-03.pdf>.
- [13] MySensors. *Connecting the Radio to your Arduino*. [online]. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z URL: <http://www.mysensors.org/build/connect_radio>.
- [14] STMicroelectronics. *Discovery kit for STM32F407/417 lines - with STM32F407VG MCU*. [online]. [cit. 2014-10-13]. Dostupné z URL: <<http://www.st.com/web/catalog/tools/FM116/SC959/SS1532/PF252419>>.
- [15] STMicroelectronics. *STM32F407VG*. [online]. [cit. 2014-10-18]. Dostupné z URL: <<http://www.st.com/web/en/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1577/LN11/PF252140>>.
- [16] Adafruit. *DHT22 temperature-humidity sensor + extras*. [online]. [cit. 2014-12-01]. Dostupné z URL: <<http://www.adafruit.com/products/385>>.
- [17] FERTÉ, Élisabeth, ed. *Zázračná planeta: rekordy Země: [jen těžko uvěříte!.. 1. vyd. V Praze: Albatros, 2011. 185 s. ISBN 978-80-00-02736-4.*
- [18] Measurement Specialties. *MS5611-01BA03 Barometric Pressure Sensor, with stainless steel cap* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z URL: <<http://www.meas-spec.com/downloads/MS5611-01BA03.pdf>>.
- [19] Hadex. *Vnější čidla k meteostanicím*. [online]. [cit. 2014-10-06]. Dostupné z URL: <<http://goo.gl/nFQ095>>.
- [20] Argent Data Systems. *Weather Sensor Assembly p/n 80422* [online]. [cit. 2015-01-23]. Dostupné z URL: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Weather/Weather%20Sensor%20Assembly..pdf>>.
- [21] AMS. *AS5030 Rotary Sensor* [online]. [cit. 2015-03-16]. Dostupné z URL: <<http://ams.com/eng/Products/Position-Sensors/Magnetic-Rotary-Position-Sensors/AS5030>>.
- [22] Portál ArduCam. *2MP: MT9D111* [online]. [cit. 2015-07-04]. Dostupné z URL: <http://www.arducam.com/wp-content/uploads/2012/11/MT9D111_M12x0.5.jpg>.
- [23] MAJERLE, T. *Libraries and tutorials for STM32F4 series MCUs*. [online]. [cit. 2014-12-12]. Dostupné z URL: <<http://stm32f4-discovery.com>>.

- [24] MANSLEY, K., GOLDSCHMIDT, S. *lwIP - A Lightweight TCP/IP stack - Summary* [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z URL: <<http://savannah.nongnu.org/projects/lwip/>>.
- [25] ArduCAM. *Arduino repository* [online]. [cit. 2015-07-20]. Dostupné z URL: <<https://github.com/ArduCAM>>.
- [26] Micron Technology. *1/3.2-Inch System-On-A-Chip (SOC) CMOS Digital Image Sensor*. [online]. [cit. 2014-12-07]. Dostupné z URL: <http://www.dragonwake.com/download/camera/MT9D111/mt9d111_rev5.pdf>.
- [27] Hammond manufacturing. *1455Q1601 Datasheet*. [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z URL: <<http://www.hammondmfg.com/pdf/1455Q1601.pdf>>.
- [28] ABB *System pro M compact – Protection and comfort systems for residential and small commercial installations* [online]. [cit. 2015-08-02]. Dostupné z URL: <<https://library.e.abb.com/public/d4ad806c68131391c1257bf2003a85f2/2CSC400031D0201.pdf>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ALADIN Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Development International

CMOS Complementary Metal–Oxide–Semiconductor, doplňkový polovodič na bázi kovu a oxidu

TFT Thin Film Transistor, tenkovrstvý tranzistor

QVGA Quarter Video Graphics Array, čtvrtina standardního grafického rozlišení (320×240 pixelů)

SDRAM Synchronous Dynamic Random Access Memory, dynamická paměť s náhodným přístupem a synchronním přenosem dat

LED Light-Emitting Diode, dioda emitující světlo

USB Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice

QFP Quad Flat Package, čtvercové ploché pouzdro pro povrchovou montáž

QFN Quad Flat No-leads Package, čtvercové ploché pouzdro pro povrchovou montáž bez postranních vývodů

RMII Reduced Media-independent Interface, rozhraní nezávislé na přenosovém médiu s redukováným počtem signálů

MII Media-independent Interface, rozhraní nezávislé na přenosovém médiu

SPI Serial Peripheral Interface, sériové periferní rozhraní

LDO Low Dropout Regulator, napěťový regulátor s malým úbytkem

PTC Positive Temperature Coefficient, kladný teplotní koeficient

TVS Transient Voltage Suppressor, prvek chránící před přepětím

FPU Floating Point Unit, jednotka pro výpočty v pohyblivé řádové čárce

SRAM Static Dynamic Random Access Memory, statická paměť s náhodným přístupem

XGA Extended Graphics Array, rozšířené grafické rozlišení (1024×768 pixelů)

XGA Ultra Extended Graphics Array, ultrarozšířené grafické rozlišení (1600×1200 pixelů)

A/D analogově-digitální

I²C Inter-Integrated Circuit, sběrnice pro propojení integrovaných obvodů

MAC Medium Access Control, vrstva řízení přístupu k sdílenému médiu

CRC Cyclic Redundancy Check, cyklický redundantní součet

GFSK Gaussian Frequency Shift Keying, gaussovská modulace s frekvenčním klíčováním

ISM Industrial, Scientific and Medical, rádiové pásmo pro průmysl, vědu a zdravotnictví

EIRP Equivalent Isotropically Radiated Power, ekvivalentní izotropně vyzářený výkon

RMII Reduced Media Independent Interface, rozhraní pro spojení linkové a fyzické vrstvy

DCMI Digital camera interface, rozhraní pro digitální kameru

CMSIS Cortex Microcontroller Software Interface Standard, standard pro hardwarově-sofwarové rozhraní mikrokontrolérů Cortex

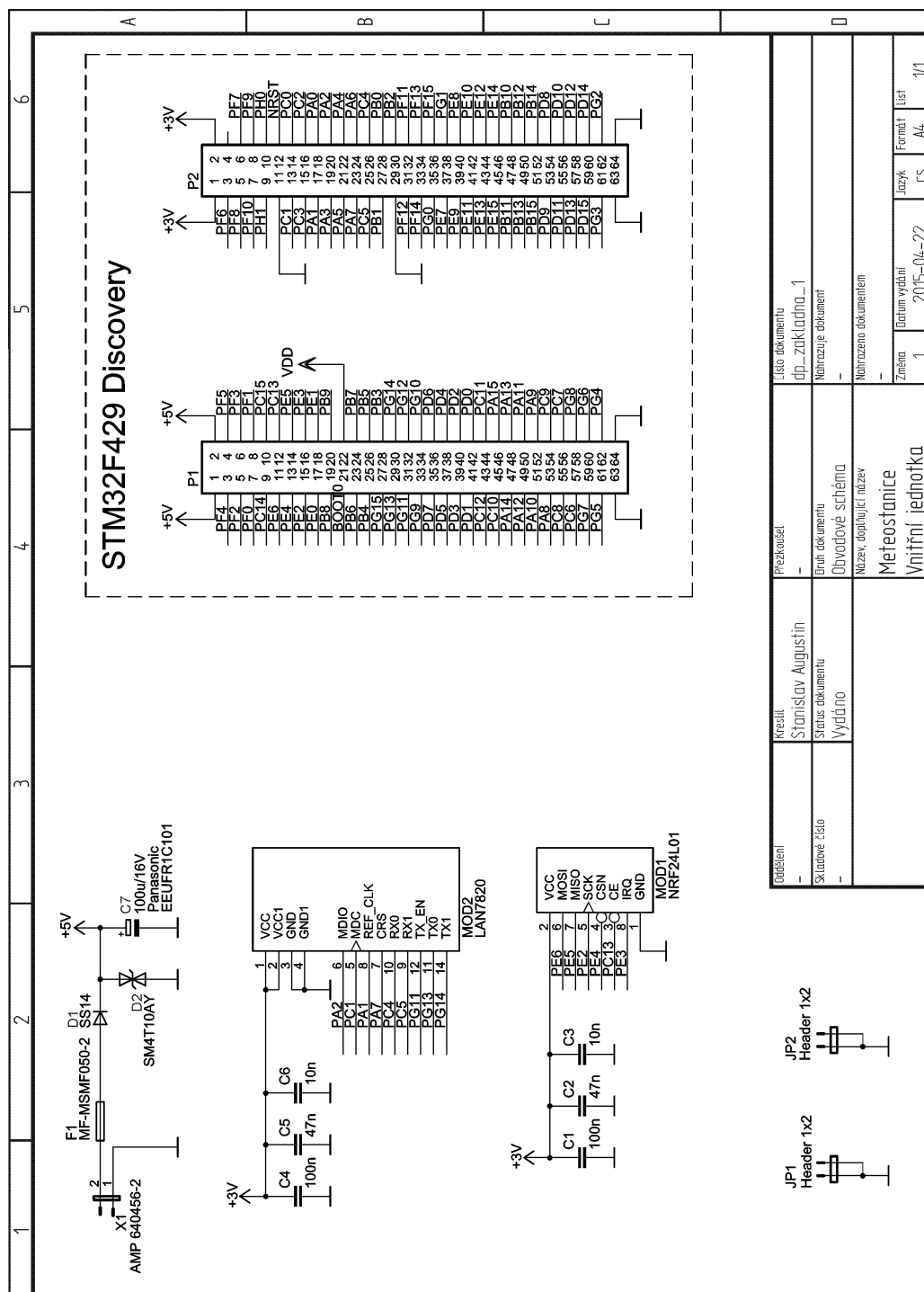
fps Frame Per Second, snímková frekvence, počet snímků za sekundu

SEZNAM PŘÍLOH

A	Schémata zapojení	63
A.1	Schéma vnitřní jednotky	63
A.2	Schéma venkovní jednotky - část 1/2	64
A.3	Schéma venkovní jednotky - část 2/2	65
A.4	Schéma modulu s obvodem nRF24L01+	66
A.5	Schéma modulu s obvodem LAN8720	67
A.6	Schéma modulu s obvodem MT9D111	68
B	Osazovací výkresy	69
B.1	Osazovací výkres - vnitřní jednotka TOP	69
B.2	Osazovací výkres - vnitřní jednotka BOTTOM	70
B.3	Osazovací výkres - venkovní jednotka TOP	71
B.4	Osazovací výkres - venkovní jednotka BOT	72

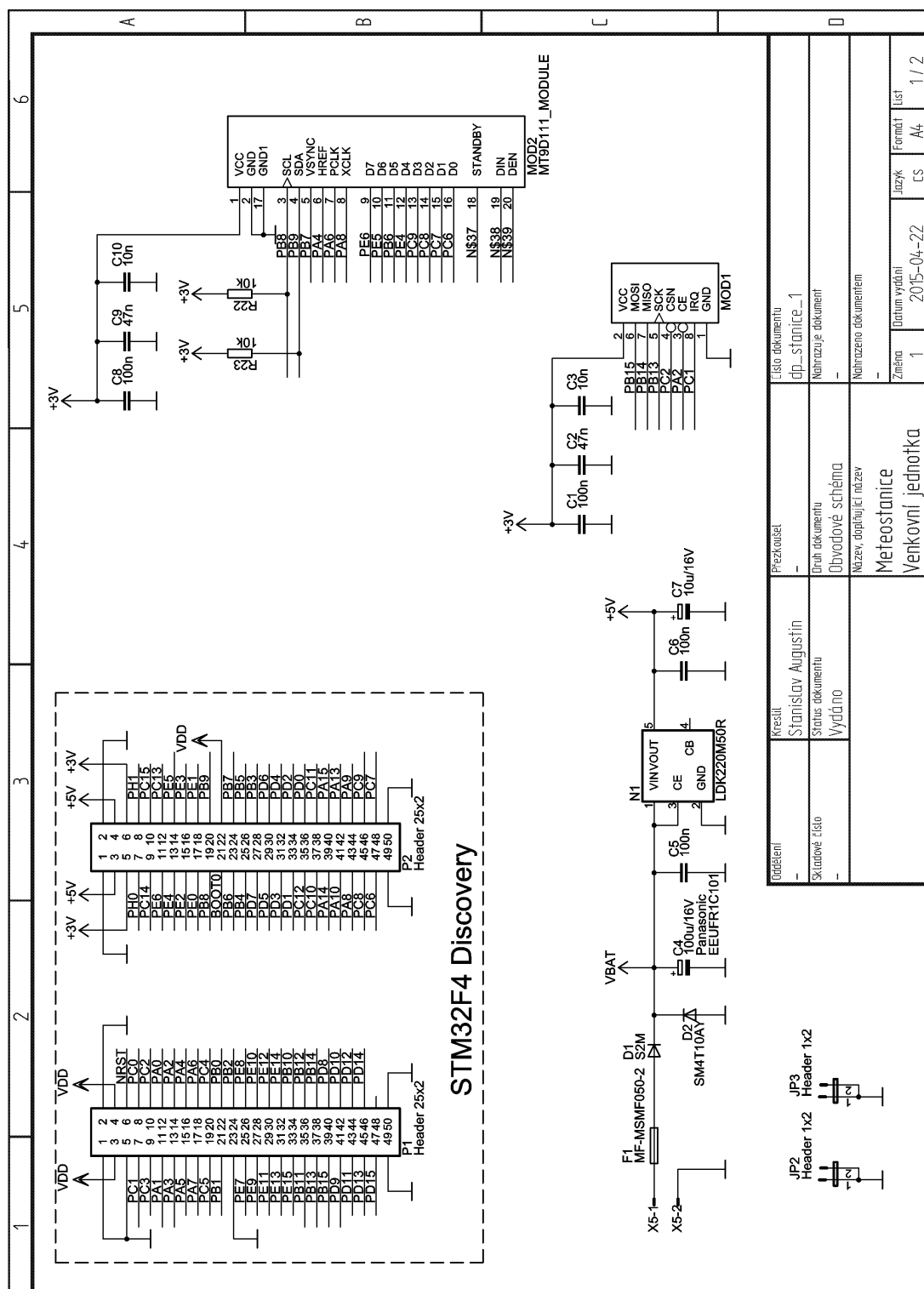
A SCHÉMATA ZAPOJENÍ

A.1 Schéma vnitřní jednotky

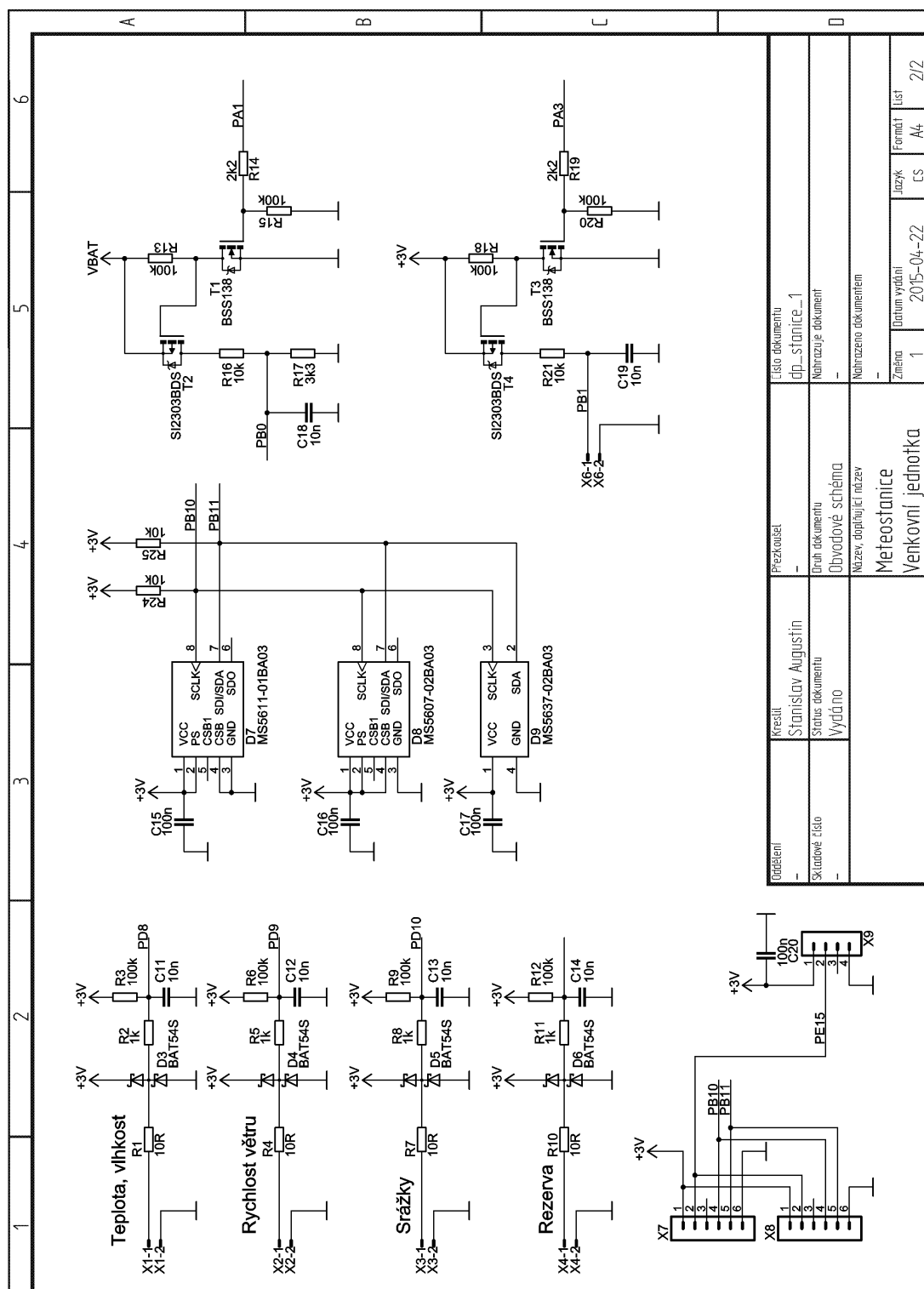


Obr. A.1: Schéma vnitřní jednotky

A.2 Schéma venkovní jednotky - část 1/2

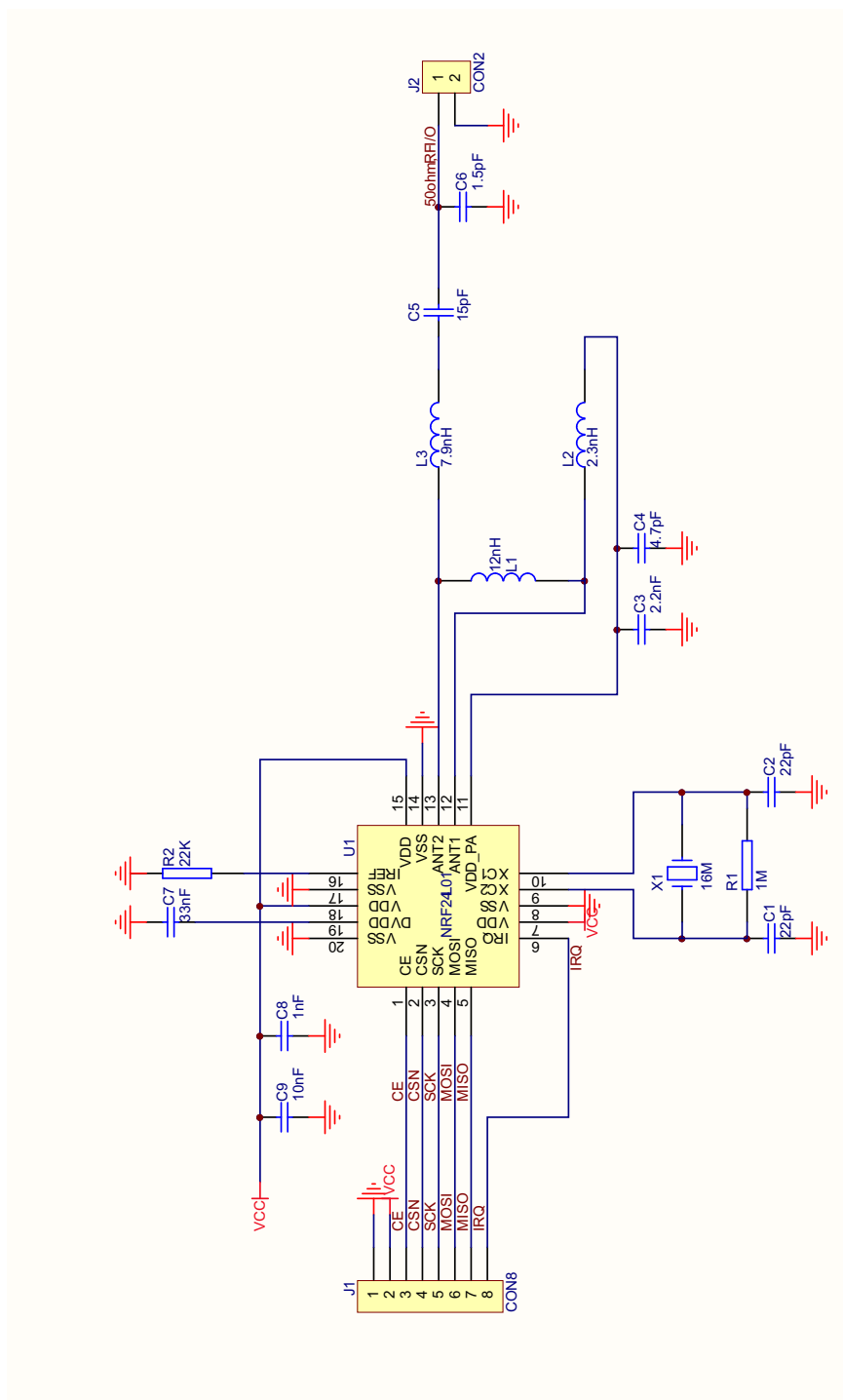


A.3 Schéma venkovní jednotky - část 2/2



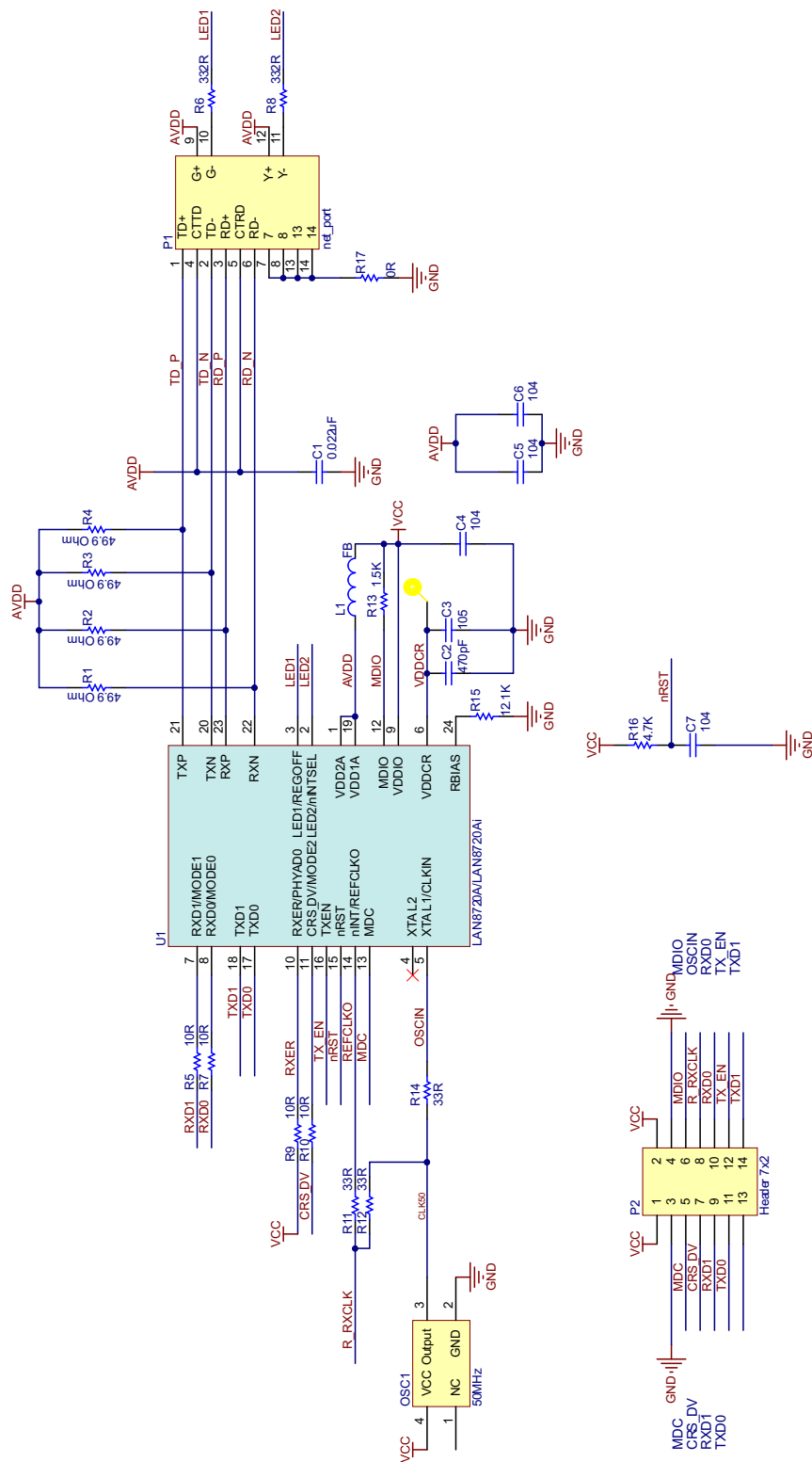
Obr. A.3: Schéma venkovní jednotky - část 2/2

A.4 Schéma modulu s obvodem nRF24L01+



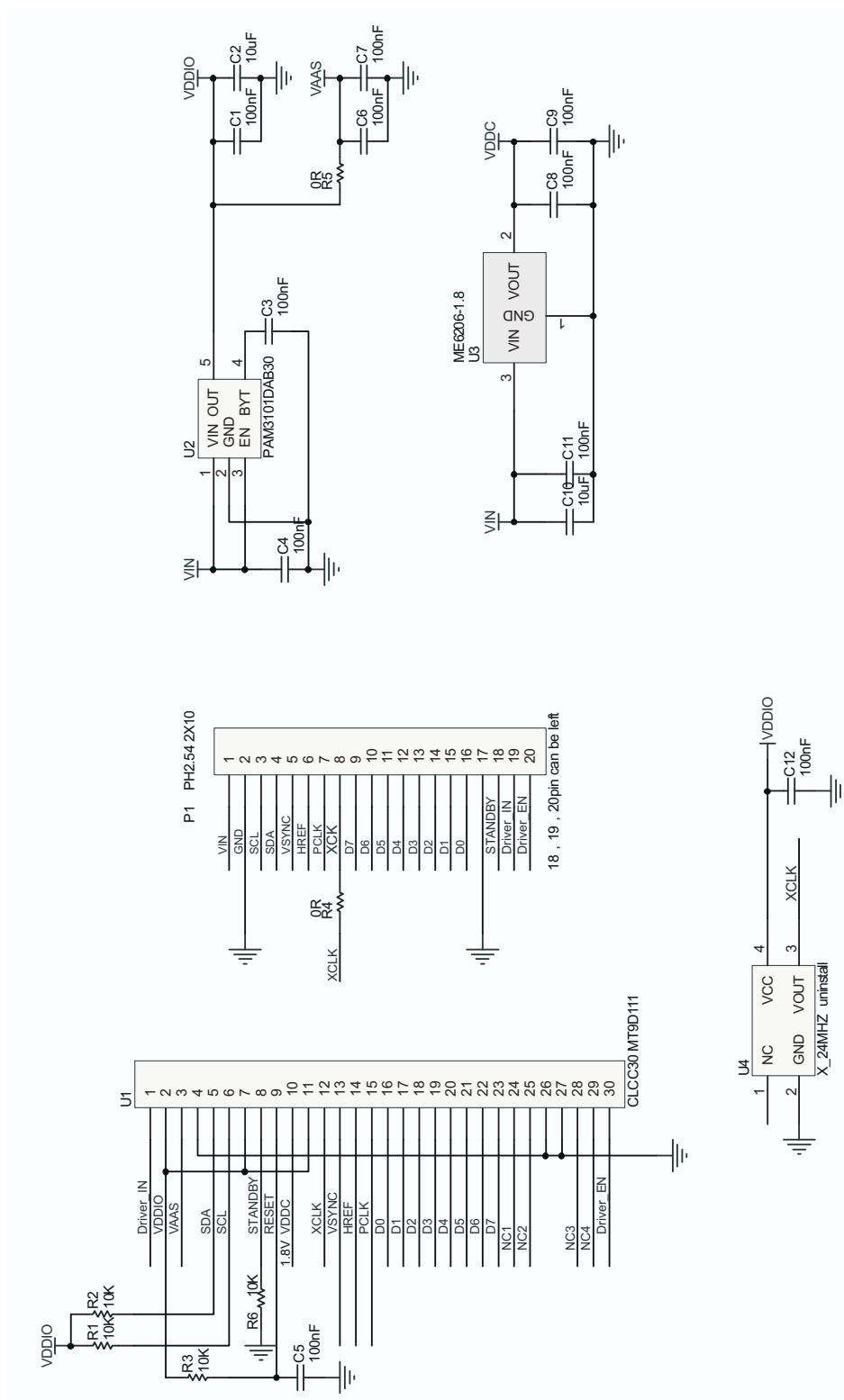
Obr. A.4: Schéma zapojení modulu s obvodem nRF24L01+

A.5 Schéma modulu s obvodem LAN8720



Obr. A.5: Schéma zapojení modulu s obvodem LAN8720

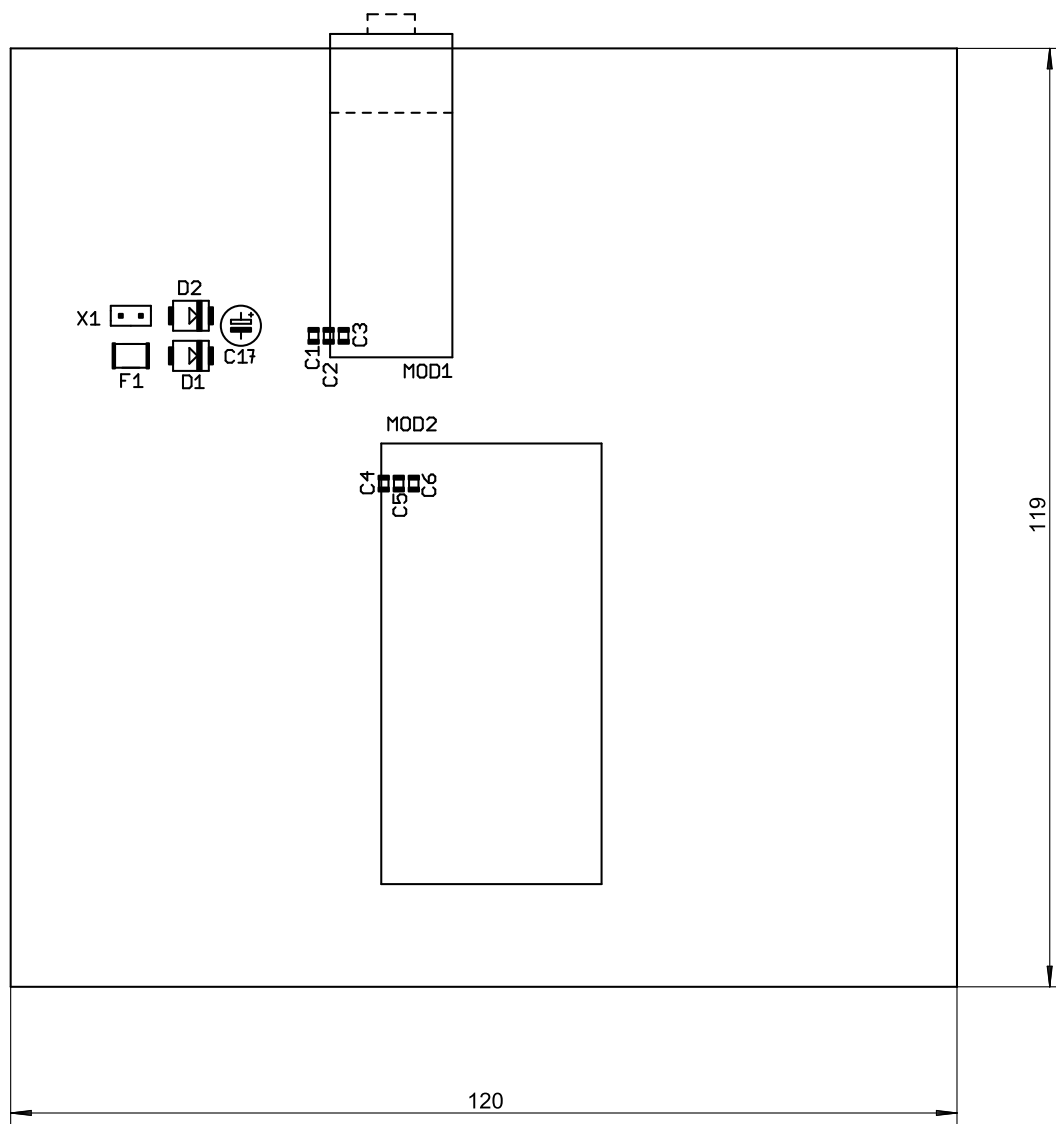
A.6 Schéma modulu s obvodem MT9D111



Obr. A.6: Schéma zapojení modulu s obvodem MTD9D111, převzato z [22]

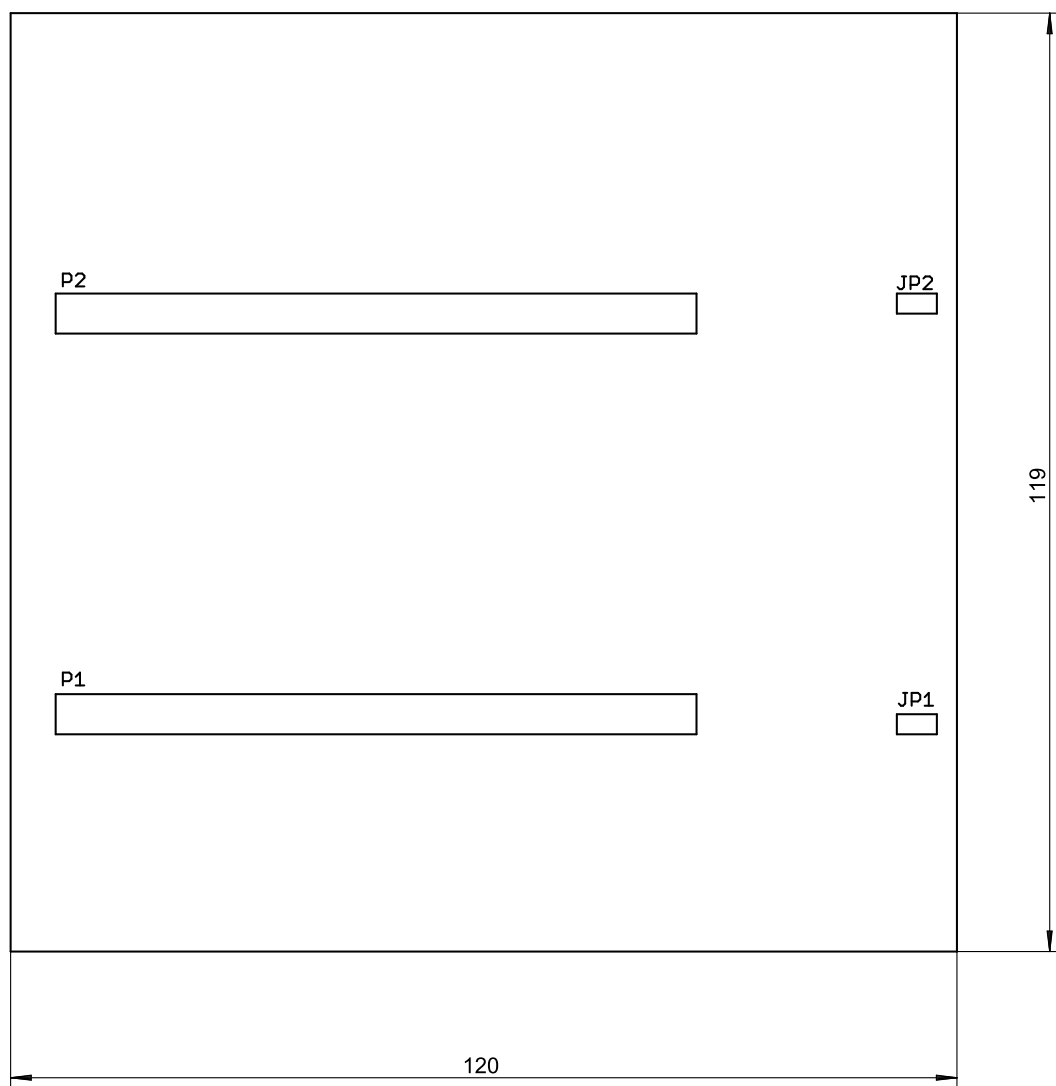
B OSAZOVACÍ VÝKRESY

B.1 Osazovací výkres - vnitřní jednotka TOP



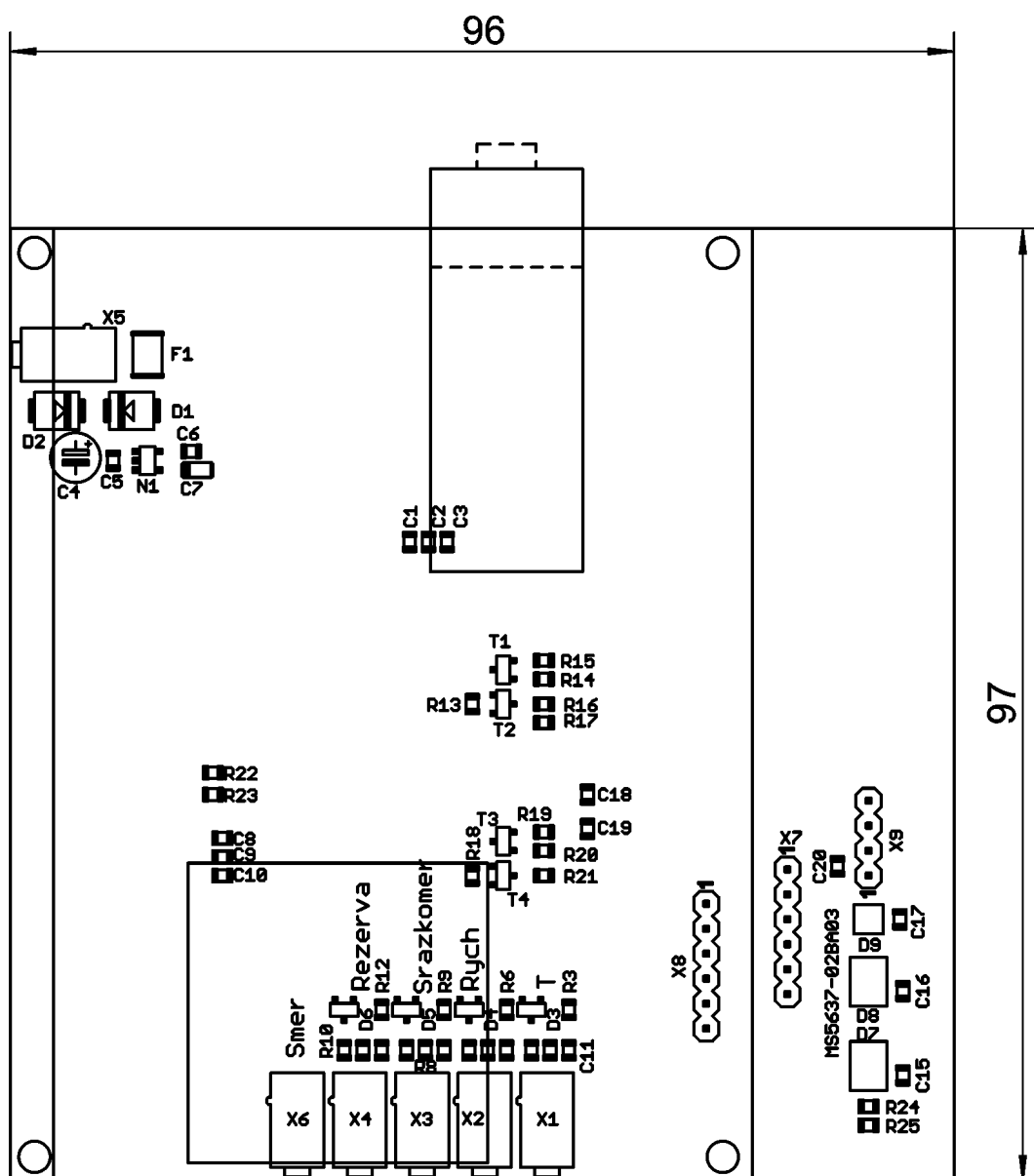
Obr. B.1: Osazovací výkres vnitřní jednotky, strana TOP

B.2 Osazovací výkres - vnitřní jednotka BOTTOM



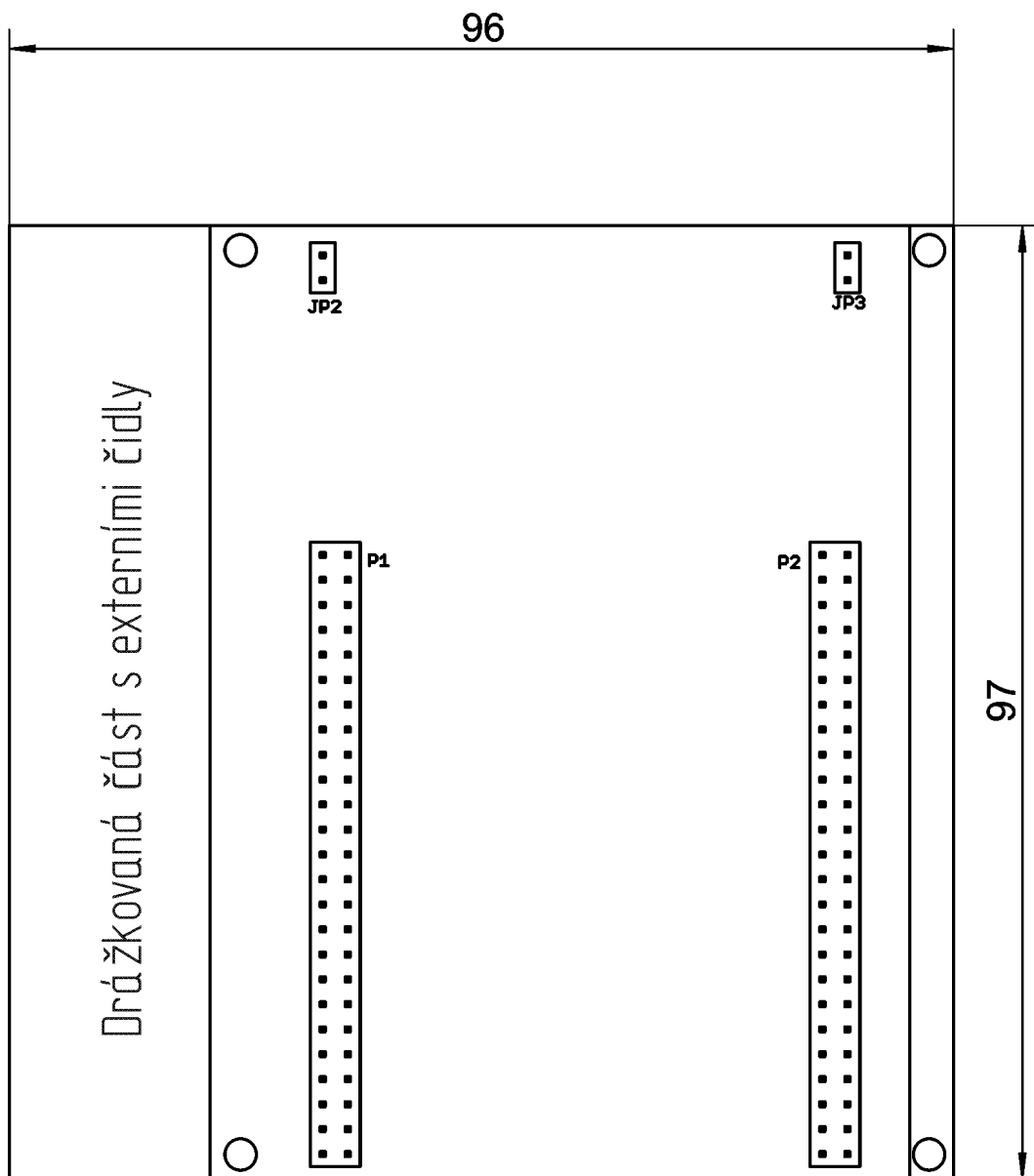
Obr. B.2: Osazovací výkres vnitřní jednotky, strana BOTTOM

B.3 Osazovací výkres - venkovní jednotka TOP



Obr. B.3: Osazovací výkres venkovní jednotky, strana TOP

B.4 Osazovací výkres - venkovní jednotka BOT



Obr. B.4: Osazovací výkres venkovní jednotky, strana BOTTOM