

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Bezdrátová autonomní vyhodnocovací jednotka
pro sledování parametrů okolního prostředí**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan ZICH**
Osobní číslo: **E14N0091P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Bezdrátová autonomní vyhodnocovací jednotka pro sledování parametrů okolního prostředí**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


Navrhněte a realizujte zařízení pro monitorování parametrů okolního prostředí.

1. Proveďte rešerši a následný výběr vhodného čipu.
2. Proveďte výběr vhodných senzorů neelektrických veličin.
3. Navrhněte a realizujte funkční vzorek měřicí jednotky.
4. Navrhněte komunikační protokol pro bezdrátový přenos s nadřazenou jednotkou.


Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:
katalogy součástek - internet

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Čengery, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačesláv Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku návrhu a konstrukce autonomní bezdrátové jednotky pro sledování parametrů okolního prostředí. Pro realizaci funkčního vzorku bylo zapotřebí nejprve provést důkladnou rešerši dostupných bezdrátových komunikačních technologií a jednočipových mikrokontrolérů. Po definici požadavků na sledované veličiny následoval výběr senzorů pevně integrovaných do zařízení a stanovení vhodného rozhraní pro rozšiřující senzorové moduly. Návrh elektroniky je částečně založen na analýze demonstračního zařízení výrobce mikrokontroléru a následné syntéze vlastního obvodového řešení s doplněním napájecího a senzorového subsystému. Zvláštní péče byla věnována problematice snižování proudového odběru zařízení a účinnosti. Určujícími parametry při výběru komunikačního protokolu byla široká možnost připojení a snadná integrace do běžně používaných komunikačních systémů. Mechanická konstrukce je navržena s ohledem na adekvátní funkci senzorů, případnou drátovou konektivitu a s ohledem na moderní design vhodný do obytných prostorů. Výrobek je opatřen snadno ovladatelným fyzickým uživatelským rozhraním, které umožňuje jednoduchou vizualizaci vývoje úrovní jednotlivých veličin v čase. Výsledkem snažení je funkční zařízení s širokými možnostmi konfigurace měřených veličin, snadnou konektivitou, prodlouženou výdrží na akumulátor, efektivním systémem reprezentace výsledků měření a moderním designem.

Klíčová slova

Monitorovací jednotka, mikrokontrolér, senzor, CC3200, bezdrátová komunikace, autonomní, solární panel, akumulátor, nabíjení, bezdotykové tlačítko, displej.

Abstract

This thesis is focused on the issue of design and construction of autonomous wireless unit for environmental monitoring. First it was necessary to perform a search for available wireless communication technology and a microcontroller for practical realization of a working sample. The definition of required monitored variables was followed by device-integrated sensors and the definition of appropriate interface for expanding sensor modules. The circuit design is partly based on the analysis of demonstration board produced by the microcontroller manufacturer and consecutive custom synthesis with addition of power and sensor subsystems. Special effort was dedicated to current consumption and efficiency. The communication protocol determining parameters were wide connectivity and easy integration into the commonly used communication systems. The mechanical construction is designed with respect to suitable sensor function, potential wired connectivity and with respect to modern design which is appropriate for residential premises. The device provides an easy-to-use physical user interface which is able to visualize the time progression of individual variables. The result is a functional device with wide configuration of measuring variables, easy connectivity, extended battery life, effective representation of measurement results and modern design.

Key words

Monitoring unit, microcontroller, sensor, CC3200, wireless communication, autonomous, solar panel, accumulator, charging, touchless button, display.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 15.5.2016

.....

Bc. Jan Zich

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Čengerymu, Ph.D. za praktické připomínky, cenné rady a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	14
SEZNAM TABULEK.....	15
ÚVOD.....	16
1 PŘEHLED ZAŘÍZENÍ NA TRHU.....	18
1.1 MĚŘIČE PARAMETRŮ PROSTŘEDÍ	19
1.2 IOT ZAŘÍZENÍ	21
2 VÝBĚR MIKROKONTROLÉRU A KOMUNIKAČNÍ TECHNOLOGIE.....	23
2.1 KOMUNIKAČNÍ TECHNOLOGIE A BEZDRÁTOVÉ STANDARDY.....	23
2.2 MIKROKONTROLÉRY SE ZABUDOVANÝM BEZDRÁTOVÝM ROZHRAŇM.....	24
3 SENZORY PRO MONITOROVÁNÍ OKOLNÍHO PROSTŘEDÍ.....	27
3.1 MĚŘENÍ ÚROVNĚ HLUKU	27
3.2 SENZOR BAROMETRICKÉHO TLAKU	28
3.3 SENZOR OXIDU UHLÍČITÉHO.....	29
4 OBVODOVÉ ŘEŠENÍ.....	30
4.1 BLOKOVÉ SCHÉMA	30
4.2 POPIS FUNKCE	32
4.3 MIKROKONTROLÉR	33
4.3.1 <i>Referenční design.....</i>	33
4.3.2 <i>Parametry a funkce mikrokontroléru.....</i>	35
4.3.3 <i>Programovací a debugovací rozhraní</i>	37
4.3.4 <i>Komunikační technologie.....</i>	39
4.4 SENZORY INTEGROVANÉ NA HLAVNÍ DESCE	40
4.4.1 <i>Senzor intenzity osvětlení</i>	40
4.4.2 <i>Senzor teploty a relativní vlhkosti.....</i>	41
4.5 EXTERNÍ SENZOROVÉ MODULY	42
4.6 UŽIVATELSKÉ ROZHRAŇM.....	45
4.6.1 <i>Displej</i>	45
4.6.2 <i>Kapacitní senzory dotyku</i>	45
4.6.3 <i>Indikační LED diody.....</i>	47
4.7 NAPÁJECÍ SUBSYSTÉM	48
4.7.1 <i>Systém sběru energie.....</i>	49
4.7.2 <i>Solární panel</i>	50
4.7.3 <i>Akumulátor</i>	51
4.7.4 <i>Měření napětí baterie.....</i>	51
4.7.5 <i>Externí napájení, nabíjení akumulátoru</i>	54
4.7.6 <i>Snižující měnič.....</i>	55
4.7.7 <i>Energetická bilance</i>	56
4.8 EMC PROBLEMATIKA.....	58
4.8.1 <i>USB rozhraní</i>	59
4.8.2 <i>Připojení solárního panelu.....</i>	59
4.8.3 <i>Kapacitní tlačítka.....</i>	60
4.8.4 <i>Obvod pro sběr energie.....</i>	60
4.8.5 <i>Snižovací měnič</i>	61

5	REALIZACE OBVODOVÉHO ŘEŠENÍ.....	62
5.1	NÁVRHOVÝ SYSTÉM.....	62
5.2	MONTÁŽNÍ TECHNOLOGIE A POUZDRA SOUČÁSTEK.....	62
5.3	PARAMETRY PLOŠNÉHO SPOJE.....	62
5.4	SPECIFICKÉ VLASTNOSTI NÁVRHU.....	64
5.4.1	Návrh antény.....	64
5.4.2	Kapacitní tlačítka.....	64
5.4.3	Odporová síť obvodu pro sběr energie.....	65
5.4.4	Senzor teploty a relativní vlhkosti.....	66
5.4.5	Chlazení integrovaných obvodů.....	66
5.4.6	Praktická realizace DPS.....	66
6	MECHANICKÁ KONSTRUKCE.....	67
6.1	POUŽITÝ MATERIÁL A TECHNOLOGIE VÝROBY.....	67
6.2	ERGONOMIE DESIGNU.....	67
6.3	PRAKTICKÉ PŘEVODNÍKY.....	68
6.4	UŽIVATELSKÉ ROZHŘANÍ.....	69
7	VÝBĚR KOMUNIKAČNÍHO PROTOKOLU.....	70
7.1	DRÁTOVÁ KOMUNIKACE.....	70
7.2	BEZDRÁTOVÁ KOMUNIKACE.....	70
8	FIRMWARE A VÝVOJOVÝ DIAGRAM.....	72
9	MĚŘENÍ A PROVOZNÍ TESTY.....	75
9.1	SENZOR TEPLoty A RELATIVNÍ VLHKOSTI.....	75
9.2	SENZOR INTENZITY OSVĚTLENÍ.....	76
9.3	DRÁTOVÁ A BEZDRÁTOVÁ KOMUNIKACE, UŽIVATELSKÉ ROZHŘANÍ.....	76
9.4	NABÍJENÍ A MĚŘENÍ NAPĚTÍ AKUMULÁTORU.....	77
9.5	MĚŘENÍ SPOTŘEBY.....	77
9.5.1	Pracovní režimy.....	77
9.5.2	Měření dynamické spotřeby.....	78
9.5.3	Měření statické spotřeby.....	79
9.5.4	Vyhodnocení.....	79
	ZÁVĚR.....	81
	POUŽITÁ LITERATURA.....	83
	PŘÍLOHY.....	1
	PŘÍLOHA A – SCHÉMA DPS S KAPACITNÍMI TLAČÍTKY.....	1
	PŘÍLOHA B – OSAZOVACÍ VÝKRESY PRO DPS S KAPACITNÍMI TLAČÍTKY (FORMÁT 2:1).....	2
	PŘÍLOHA C – KUSOVNÍK PRO DPS S KAPACITNÍMI TLAČÍTKY.....	3
	PŘÍLOHA D – SCHÉMA DPS S USB ROZHŘANÍM.....	4
	PŘÍLOHA E – OSAZOVACÍ VÝKRESY PRO DPS S USB ROZHŘANÍM (FORMÁT 2:1).....	5
	PŘÍLOHA F – KUSOVNÍK PRO DPS S USB ROZHŘANÍM.....	6
	PŘÍLOHA G – SCHÉMA HLAVNÍ DPS – PROPOJENÍ BLOKŮ.....	7
	PŘÍLOHA H – SCHÉMA HLAVNÍ DPS – MIKROKONTROLÉR A JEHO PŘÍSLUŠENSTVÍ.....	8
	PŘÍLOHA CH – SCHÉMA HLAVNÍ DPS – USB/UART PŘEVODNÍK.....	9
	PŘÍLOHA I – SCHÉMA HLAVNÍ DPS – RH A T SENZOR.....	10
	PŘÍLOHA J – SCHÉMA HLAVNÍ DPS – SENZOR INTENZITY OSVĚTLENÍ.....	11
	PŘÍLOHA K – SCHÉMA HLAVNÍ DPS – NAPÁJECÍ SUBSYSTÉM.....	12
	PŘÍLOHA L – SCHÉMA HLAVNÍ DPS – PŘIPOJENÍ SENZOROVÉ DESKY.....	13
	PŘÍLOHA M – SCHÉMA HLAVNÍ DPS – PŘIPOJENÍ DESKY S USB ROZHŘANÍM.....	14
	PŘÍLOHA N – OSAZOVACÍ VÝKRESY HLAVNÍ DPS (FORMÁT 2:1).....	15

PŘÍLOHA O – KUSOVNÍK HLAVNÍ DPS.....	16
PŘÍLOHA P – KUSOVNÍK ELEKTRONIKY MIMO DPS A MECHANICKÉ KONSTRUKCE	18
PŘÍLOHA Q – VÝKRES BOČNÍHO DÍLU S USB ROZHRAŇÍM.....	19
PŘÍLOHA R – VÝKRES BOČNÍHO DÍLU	20
PŘÍLOHA S – VÝKRES KRYTU DISPLEJE	21
PŘÍLOHA T – VÝKRES MONTÁŽNÍ KRYCHLE	22
PŘÍLOHA U – VÝKRES SPODNÍHO DÍLU	23
PŘÍLOHA V – VÝKRES HORNÍHO DÍLU	24
PŘÍLOHA W – DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	25
PŘÍLOHA X – ZÁZNAM NAMĚŘENÝCH HODNOT	26
PŘÍLOHA Y – KOMPAKTNÍ DISK S FIRMWAREM, DOKUMENTACÍ A ELEKTRONICKOU VERZÍ PRÁCE	27

Seznam symbolů a zkratek

Symboly

C [F]	Elektrická kapacita
C_{GS} [F]	Vstupní kapacita MOSFET tranzistoru
C_X [F]	Kapacita deskového kondenzátoru
d [m]	Vzdálenost mezi elektrodami deskového kondenzátoru
i [A]	Elektrický proud (okamžitá hodnota)
I [A]	Elektrický proud
P [W]	Elektrický výkon, spotřeba
Q [C]	Elektrický náboj, kapacita akumulátoru
R [Ω]	Elektrický odpor
$R_{DS_{ON}}$ [Ω]	Spínací odpor MOSFET tranzistoru
S [m ²]	Plocha elektrod deskového kondenzátoru
t [s]	Čas, doba trvání
T [s]	Perioda
V [V]	Elektrické napětí
$V_{GS_{th}}$ [V]	Prahové napětí otevření MOSFET tranzistoru
δ [Ω]	Absolutní chyba (zde uvažováno pro elektrický odpor)
ϵ_0 [Fm ⁻¹]	Permitivita vakua
ϵ_r [-]	Relativní permitivita
ζ [%]	Relativní chyba
τ [s]	Časová konstanta

Zkratky

A/D	Analogově/digitální
AES	Advanced Encrypting System (standard pokročilého šifrování)
AD	Altium Designer
AP	Access Point (přístupový bod)
ARM	Advanced RISC Machine
CCS	Code Composer Studio
CRC	Cyclic Redundancy Check (cyklický redundantní součet)
DES/3DES	Data Encryption Standard
DFN	Dual Flat No-leads
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DPS	Deska Plošných Spojů
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (elektronicky programovatelná a mazatelná paměť pouze pro čtení)
EMC	ElectroMagnetic Compatibility (elektromagnetická kompatibilita)
GPIO	General Purpose Input Output (obecné vstupy a výstupy)
GPRS	General Packet Radio Service (univerzální paketová rádiová služba)
HSPA	High Speed Packet Access
HTTP	HyperText Transfer Protocol
HW	HardWare
I ² C	Inter-Integrated Circuit
IO	Integrovaný Obvod
IP	Internet Protocol (internetový protokol)
ISO	International Organization for Standardization (mezinárodní organizace pro normalizaci)
IoT	Internet of Things (internet věcí)
JTAG	Joint Test Action Group
LCD	Liquid Crystal Display (displej z tekutých krystalů)
LED	Light Emitting Diode (dioda emitující světlo)
Li-Ion	Lithium-Ionový
LTE	Long Term Evolution
N-MOSFET	N-type Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (tranzistor řízený polem s vrstvou kovového oxidu, typ N)
MAC	Media Access Control
McASP	Multichannel Audio Serial Port
MCU	MicroController Unit (mikrokontrolér)
MD5	Message-Digest
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanický Systém
MMC	Multi Media Card
MSOP	Mini Small Outline Package
NTC	Negative Thermal Coefficient (záporný teplotní součinitel)
OSI	Open Systems Interconnection (propojení otevřených systémů)
PC	Personal Computer (osobní počítač)
P-MOSFET	P-type Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (tranzistor řízený polem s vrstvou kovového oxidu, typ P)

PWM	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
QFN	Quad Flat No-lead
RAM	Random Access Memory (paměť s náhodným přístupem)
RH	Relative Humidity (relativní vlhkost)
RNP	Režim Nízkého Příkonu
ROM	Read Only Memory (paměť pouze pro čtení)
RR	Rychlý Režim
RSA	Rivest Shamir Adleman
RTC	Real Time Clock (obvod reálného času)
SD/microSD	Secure Digital/micro Secure Digital
SDK	Software Development Kit
SHA/SHA2	Secure Hash Algorithm
SOIC	Small Outline Integrated Circuit
SOT23	Small Outline Transistor
SPI	Serial Peripheral Interface (sériové periferní rozhraní)
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
SRAM	Static Random Access Memory (statická paměť s náhodným přístupem)
SSOP	Shrink Small Outline Package
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
SWD	Single Wire Debug
T	Teplota
TCP	Transfer Control Protocol
TI	Texas Instruments
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
USB	Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)
VF	VysokoFrekvenční
VoIP	Voice over Internet Protocol
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network (bezdrátová místní síť)
WPA/WPA2	Wi-Fi Protected Access (chráněný přístup k Wi-Fi)
WPAN	Wireless Personal Area Network (bezdrátová osobní síť)
WSAN	Wireless Sensor Area Network (bezdrátová senzorová síť)
WWAN	Wireless Wide Area Network (bezdrátová rozlehlá síť)
μDMA	micro Direct Memory Access (mikro přímý přístup do paměti)

Seznam obrázků

Obr. 1 Přístroj pro měření parametrů okolního prostředí KIMO HQ210 [3].....	19
Obr. 2 Přístroj pro měření parametrů okolního prostředí EXTECH EN300 [5].....	20
Obr. 3 IoT zařízení Netatmo (zleva): Weather Station, Indoor Module, mobilní aplikace [2].....	21
Obr. 4 Netatmo Wind Gauge [8].....	22
Obr. 5 Senzor barometrického tlaku, teploty a nadmořské výšky MPL3115A2 [23].....	28
Obr. 6 Senzor oxidu uhličitého SprintIR Fast 20-100% [25].....	29
Obr. 7 Blokové schéma řídicí a měřicí části bezdrátové jednotky.....	30
Obr. 8 Blokové schéma napájecího subsystému.....	31
Obr. 9 SimpleLink Wi-Fi CC3200 LaunchPad [28].....	33
Obr. 10 Zapojení převodníku USB/UART.....	37
Obr. 11 Zapojení převodníků logických úrovní.....	38
Obr. 12 Čipová anténa 2450AT43B100E, pásmová propust 2450BP15E0100E [34], [35].....	39
Obr. 13 Zapojení antény včetně pásmové propusti a přizpůsobovacího obvodu.....	39
Obr. 14 TSL2561T - senzor intenzity okolního osvětlení [38].....	40
Obr. 15 Zapojení senzoru intenzity okolního osvětlení.....	40
Obr. 16 SHT21 - senzor relativní vlhkosti a teploty [40].....	41
Obr. 17 Zapojení senzoru relativní vlhkosti a teploty.....	42
Obr. 18 Univerzální senzorový modul pro měření NO ₂ , NH ₃ či CO.....	43
Obr. 19 Zapojení IO LMP91000 se senzorem v potenciostatické konfiguraci [42].....	43
Obr. 20 Senzorový modul pro měření CH ₄	44
Obr. 21 TFT LCD displej - 1,8" Adafruit [46].....	45
Obr. 22 Zapojení kapacitního senzoru dotyku.....	46
Obr. 23 LED dioda pro reverzní SMT montáž [49].....	47
Obr. 24 Systém sběru energie s integrovaným obvodem BQ25504.....	50
Obr. 25 Solární panel BL65-45 [52].....	50
Obr. 26 Akumulátor L903450 - 3,7 V/1600 mAh [53].....	51
Obr. 27 Odporový dělič pro měření napětí akumulátoru – jednoduchý.....	51
Obr. 28 Odporový dělič pro měření napětí akumulátoru – odepínatelný.....	52
Obr. 29 Odporový dělič pro měření napětí akumulátoru – s tranzistorem.....	52
Obr. 30 Zapojení nabíječe akumulátoru MCP73837.....	55
Obr. 31 Zapojení snižujícího měniče TPS62203.....	55
Obr. 32 Ochrana USB rozhraní.....	59
Obr. 33 Ochrana připojení solárního panelu.....	59
Obr. 34 Typické aplikační zapojení obvodu AT42QT1010 [48].....	60
Obr. 35 Doporučená kresba plošného spoje pro obvod BQ25504 [51].....	61
Obr. 36 Schéma zapojení pro měnič TPS62203 se zásadami pro layout [57].....	61
Obr. 37 Skladba vrstev pro dvouvrstvou DPS [63].....	62
Obr. 38 Skladba vrstev pro čtyřvrstvou DPS [63].....	63
Obr. 39 Layout antény.....	64
Obr. 40 Layout DPS s kapacitními tlačítky.....	65
Obr. 41 Layout systému pro sběr energie.....	65
Obr. 42 Doporučený layout senzoru SHT21 (vlevo), navržený layout (vpravo) [41].....	66
Obr. 43 Výsledná podoba zařízení.....	68
Obr. 44 Aktivní displej a detekce stisku kapacitního tlačítka.....	69
Obr. 45 Výběr obrazovek displeje: úvodní obrazovka (vlevo), záznam měření teploty (vpravo).....	69
Obr. 46 Výpis přijatých UDP paketů [74].....	70
Obr. 47 Výpis přijatých TCP paketů [74].....	71
Obr. 48 Vývojový diagram hlavní větve programu.....	72
Obr. 49 Vývojový diagram obsluhy přerušeni od obvodu reálného času.....	72
Obr. 50 Vývojový diagram pro obsluhu přerušeni při detekci stisku tlačítka.....	73
Obr. 51 Ověření funkce kombinovaného senzoru pro měření teploty a RH [75].....	75
Obr. 52 Ověření funkce senzoru intenzity osvětlení [75].....	76
Obr. 53 Průběh pracovního cyklu (režim spánku, vyslání jednoho TCP paketu).....	78
Obr. 54 Detail navázání spojení a odeslání paketu.....	78

Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Ceny modulů systémů Netatmo [9]</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 2 Přehled mikrokontrolérů s integrovaným Wi-Fi rozhraním [13]</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 3 Parametry RH senzoru IO SHT21 [41].....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4 Parametry teplotního senzoru IO SHT21 [41]</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 5 Proudové odběry jednotlivých částí zařízení.....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 6 Statická spotřeba bezdrátové jednotky v různých režimech mikrokontroléru</i>	<i>79</i>

Úvod

Fenoménem posledních několika let a silnou vizí do budoucnosti se stal internet věcí. Síť fyzických objektů propojených do inteligentních komplexních celků má přinést výrazné zlepšení kvality osobního i profesního života. Senzory, akční členy, řídicí a komunikační systémy spolupracují k dosažení větší efektivity (časové, finanční, energetické) a přesnosti fyzických systémů. V IoT (internet věcí) lze v současnosti definovat čtyři majoritní technologické celky: chytré elektrické sítě, chytré domácnosti, inteligentní dopravní systémy a chytrá města [1]. Do chytré domácnosti patří zařízení pro sledování úrovně veličin, které citelně ovlivňují kvalitu života a definují místní mikroklima. Z provedené rešerše zařízení dostupných na trhu byly jako veličiny vhodné pro sledování vybrány: barometrický tlak, koncentrace oxidu uhličitého, úroveň hluku, relativní vlhkost ovzduší a teplota vzduchu. Monitorovací jednotky, zajišťující akvizici a zpracování dat ze sensorů uvedených veličin, které jsou na trhu dostupné, bývají vybaveny bezdrátovou konektivitou a společně s estetickým designem poskytují uživateli dostatečný komfort. Tato zařízení jsou ovšem konfigurovatelná jen ve velmi omezeném rozsahu, kdy měření dalších veličin zprostředkovává externí sensorový modul vyžadující vlastní napájecí zdroj či akumulátor [2].

Pro měření koncentrace plynů mimo CO₂ (oxid uhličitý) nejsou zařízení spadající do IoT vybavena. Stejně tak obvykle nedisponují displejem pro zobrazení naměřených hodnot a konfiguraci zařízení a fungují tedy jen v kooperaci s dalším zařízením – mobilní telefon, tablet, PC (osobní počítač). Možnost autonomního provozu (z hlediska interpretace dat), rozšíření spektra měřených veličin, průzkum bezdrátových technologií a možností systémů sběru energie ze solárního panelu, vedly ke vzniku zadání na návrh a realizaci bezdrátové autonomní monitorovací jednotky.

Před vymezením parametrů zařízení bylo nezbytné zorientovat se na trhu s monitorovacími jednotkami a to jak pro integrované využití v chytré domácnosti, tak pro jednorázová ověřovací měření. Tento průzkum vedl k definici vlastností, jako jsou: kompaktní rozměry, dlouhá výdrž na akumulátor s možností dobíjení ze solárního panelu a USB portu (univerzální sériová sběrnice), integrace základních typů sensorů do zařízení, možnost připojení sensorového modulu dovnitř monitorovací jednotky, uživatelsky komfortní ovládání ve formě LCD (displej s tekutými krystaly) displeje a kapacitních tlačítek a nakonec i ergonomický a esteticky zajímavý design. Po výběru komunikační technologie následovala selekce řídicího mikrokontroléru, jehož základní funkce a zapojení byly ověřeny na vývojovém kitu. Po analýze a následné úpravě vzorového zapojení bylo celkové obvodové

schéma doplněno o displej, modul s kapacitními tlačítky, USB rozhraní (napájení, drátová komunikace, programování), senzory integrované v zařízení, rozhraní pro sensorové moduly a systém pro dobíjení akumulátoru. Ve fázi dělení celkového obvodového zapojení do několika modulů byly uvažovány fyzické rozměry společně s estetikou a ergonomií zařízení, což vedlo ke kompaktizaci monitorovací jednotky jako celku i obsažených elektronických desek.

1 Přehled zařízení na trhu

Příbuzná zařízení, která lze v současnosti zakoupit, je možné rozdělit do dvou samostatných kategorií – Měřiče parametrů prostředí a IoT zařízení.

První kategorie zahrnuje převážně ruční přístroje určené pro jednorázová měření vyžadující ovládání obsluhou. Tato zařízení často obsahují možnost logování dat a jejich následné vyčtení počítačem. Měřiče jsou zpravidla napájeny baterií či akumulátorem. Funkcemi mohou měřiče parametrů prostředí zastávat anemometry, luxmetry, hlukoměry, teploměry, měřiče relativní vlhkosti a koncentrace CO (oxid uhelnatý) či CO₂. Příklady dvou měřičů včetně popisu funkcí a parametrů jsou uvedeny v kapitole 1.1.

Druhá kategorie se zabývá produkty, které je možné používat v komplexní síti internetu věcí. Tato kategorie zatím na trhu není příliš saturovaná a tak kapitola 1.2 popisuje pouze jeden modulární systém. IoT zařízení jsou určena k trvalé integraci do domácího prostředí, kde budou jako monitorovací a výstražné jednotky sloužit k informování členů domácnosti o překročení nastavených limitů. Dále pak tyto jednotky mohou vysílat signály pro řízení akčních členů a inteligentně tedy řídit parametry prostředí (například vyvětráním místnosti či stažením rolet). IoT jednotky typicky mohou zastávat funkce anemometru, teploměru, hlukoměru, měřiče relativní vlhkosti a koncentrace CO₂.

1.1 Měřiče parametrů prostředí



Obr. 1 Přístroj pro měření parametrů okolního prostředí KIMO HQ210 [3]

Přístroj KIMO HQ210 zobrazený na Obr. 1 je přenosný měřič koncentrace oxidu uhelnatého a uhličitého, teploty, relativní vlhkosti, tlaku a intenzity osvětlení. Pro měření uvedených veličin umožňuje měřič drátové (a v některých případech i bezdrátové) připojení sond a termočlánků:

- sonda pro měření CO a teploty: rozsah 0 až 500 ppm, -20 až +80 °C
- sonda pro měření CO₂ a teploty: rozsah 0 až 5 000 ppm, -20 až +80 °C
- sonda pro měření CO₂, teploty a vlhkosti: rozsah 0 až 5 000 ppm, -20 až +80 °C, 5 až 95 % RH (relativní vlhkost)
- sonda pro měření vlhkosti, teploty a zobrazení rosného bodu: provedení nerez, ABS plast, kabelové a bezdrátové; rozsah 3 až 98 % RH, -40 až +180 °C, 50 až +80 °C
- sondy pro měření teploty: různá provedení, např.: kontaktní, vpichové, prostorové a podobně, typy Pt₁₀₀, termočlánky K, J, T, N, S
- sonda pro měření tlaků, teploty a vlhkosti: rozsah 800 až +1 100 hPa, -20 až +80 °C, 5 až 95 % RV
- modul pro měření teploty: termočlánky s rozsahy -200 až +1 300 °C;
- sonda pro měření osvětlení: rozsah 0 až 150 000 lux

Měřič umožňuje uložení až 20 milionů měřených hodnot a jejich následné vyčtení s pomocí PC. O napájení se stará Li-Ion (Lithium-Iontový) akumulátor dobíjitelný přes USB rozhraní [3]. Cena měřicího přístroje je 11 495 Kč [4].



Obr. 2 Přístroj pro měření parametrů okolního prostředí EXTECH EN300 [5]

Obr. 2 zobrazuje měřič EXTECH EN300, který slouží jako teploměr, vlhkoměr, anemometr, luxmetr a zvukoměr. Přístroj umožňuje funkci podržení minimální a maximální hodnoty. Je napájen šesti 1,5 V AAA bateriemi. Cena přístroje je 6 921 Kč [6]. Měřicí rozsahy jsou následující [5]:

- rozsah měření rychlosti proudění vzduchu od 0,4 m/s do 30 m/s s přesností $\pm 3 \%$
- rozsah měření osvětlení od 0 do 20 000 lux s přesností $\pm 5 \%$
- rozsah měření relativní vlhkosti od 10 do 95 % s přesností $\pm 4 \%$
- rozsah měření teploty termistorem od 0 °C do +50 °C nebo termočlánkem K od -100 °C do +1300 °C s přesností 1 %
- rozsah měření úrovně zvuku od 35 dB do 130 dB s přesností $\pm 1,4$ dB, frekvenční rozsah 31,5 Hz až 8 000 Hz

1.2 IoT zařízení



Obr. 3 IoT zařízení Netatmo (zleva): Weather Station, Indoor Module, mobilní aplikace [2]

Možným řešením pro dlouhodobé sledování mikroklimatu může být modulární zařízení firmy Netatmo zobrazené na *Obr. 1* a *Obr. 4*. Tato meteostanice dokáže sledovat koncentraci CO₂, barometrický tlak, hluk, teplotu a relativní vlhkost. Velmi vhodné je bezdrátové připojení přes Wi-Fi 802.11 b/g/n a rovněž řídicí a monitorovací aplikace pro operační systémy iOS a Android. Mezi základní parametry Netatmo Weather station patří [7]:

- rozsah teploty: 0 °C až 50 °C, přesnost měření: ±0,3 °C
- rozsah relativní vlhkosti: 0 až 100 %, přesnost měření: ±3 %
- rozsah barometrického tlaku: 260 až 1 160 mbar, přesnost měření: ±1 mbar
- rozsah koncentrace CO₂: 0 až 5 000 ppm, přesnost měření: ±50 ppm nebo ±5 %
- rozsah hluku: 35 dB až 120 dB
- frekvence měření: 5 min

K základnímu modulu Netatmo Weather Station (*Obr. 3* vlevo) lze bezdrátově připojit až tři externí měřicí moduly Indoor Module (*Obr. 3* uprostřed) či Wind Gauge (*Obr. 4*). Interiérový modul Netatmo Indoor Module slouží k monitorování koncentrace oxidu uhličitého, RH a teploty v lokalitě vzdálené až 100 m od základní jednotky. Rozsahy sledovaných veličin a přesnost měření jsou u Indoor Module shodné s Weather Station. Modul je napájen bateriově. Předpokládaná životnost na čtyři baterie typu AA je přibližně 1 rok.



Obr. 4 Netatmo Wind Gauge [8]

Netatmo Wind Gauge slouží jako anemometr. Jelikož je určen pro venkovní použití, je vyroben z vysoce odolného plastu (včetně odolnosti proti ultrafialovému záření). Pro měření rychlosti a směru vzduchu jsou využívány čtyři ultrazvuková čidla, která zaručují rozsah měřitelné rychlosti od 0 do 45 m/s s přesností 0,5 m/s. Přesnost směru větru je 5 °. Modul je také napájen čtyřmi AA bateriemi. Současné ceny všech modulů shrnuje *Tab. 1*.

Tab. 1 Ceny modulů systémů Netatmo [9]

Modul	Cena [Kč]
Weather Station	4 199
Indoor Module	1 999
Wind Gauge	2 799

2 Výběr mikrokontroléru a komunikační technologie

2.1 Komunikační technologie a bezdrátové standardy

Při výběru komunikační technologie bylo v první řadě zapotřebí zorientovat se v přehledu bezdrátových datových standardů. Standardy se dělí dle cílového určení a rozsahu do čtyř základních kategorií [10], [11]:

- WWAN (Wireless Wide Area Network) – Bezdrátové rozlehlé sítě jsou navrženy pro pokrytí na úrovni jednotlivých měst, států a případně i větších oblastí. V rozsahu těchto sítí je připojení k přístupovému bodu kontinuální a přechod mezi geografickými oblastmi spravovanými různými základovými stanicemi je obstaráván automaticky bez nutnosti zásahu uživatele. Mezi známé standardy WWAN sítí patří:
 - EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution)
 - GPRS (General Packet Radio Service)
 - HSPA (High Speed Packet Access)
 - LTE (Long Term Evolution)
 - UMTS (Universal Mobile Telecommunication System)
- WLAN (Wireless Local Area Network) – Bezdrátové místní sítě jsou určeny pro komunikaci přibližně v rozsahu domácnosti či firmy. Tyto systémy jsou používány k místnímu propojení zařízení, jako jsou počítače, sdílené tiskárny a další. Sítě WLAN typicky nabízejí vysoké přenosové rychlosti a jsou vhodné pro přístup k internetu. Mezi WLAN standardy patří Wi-Fi 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n a 802.11ac.
- WSN (Wireless Sensor Area Network) – Bezdrátové senzorové sítě jsou ve většině případů sítě s nízkou spotřebou energie a cenou. Komponenty WSN systémů jsou bezdrátově propojeny za účelem sběru a výměny dat získaných z jejich fyzického prostředí. Jednotlivé uzly jsou typicky propojeny do hvězdicové nebo smíšené (mesh) topologie. Většina uzlů v WSN síti používá komunikace krátkého dosahu (Bluetooth, ZigBee, apod.), nicméně často se v tomto typu sítě objevuje uzel s komunikační technologií většího dosahu (Wi-Fi). Senzorové sítě se vyskytují například v pokročilém zemědělství, kde slouží k měření úrovně vlhkosti zeminy a k reportování dat do řídicího systému, který analyzuje data, modeluje trendy a řídí zavlažovací systém.

- WPAN (Wireless Personal Area Network) – Bezdrátové osobní sítě jsou určeny pro komunikace na krátkou vzdálenost mezi zařízeními typicky ovládanými jednou osobou. Mezi příklady využití WPAN sítí patří bezdrátová sluchátka pro mobilní telefony nebo bezdrátové měřiče srdečního tepu komunikující s chytrými hodinkami.

Jelikož se funkce zastoupené v WSN a WPAN sítích mohou částečně překrývat, je i soubor standardů používaných v těchto systémech uváděn společně:

- Bluetooth
- Wireless USB
- ZigBee

Z cílového určení bezdrátové autonomní jednotky vyplývá možný přesah do dvou typů sítí a to WLAN a WSN. Jelikož je však předpokládáno použití pouze drátových senzorů a možná komunikace jednotky se zařízeními jako jsou mobilní telefony, tablety a počítače, dochází velmi rychle k eliminaci výčtu komunikačních technologií na Wi-Fi a Bluetooth. Technologie Wi-Fi je standardně podporována všemi vyjmenovanými zařízeními a její implementace je poměrně dobře zvládnuta. Bluetooth technologie nemusí být cílovým zařízením podporována vždy (stolní PC jí standardně vybaveno nebývá) a její implementace není kvůli různým standardům bezproblémová. Jako vhodnější se tedy jeví Wi-Fi a to konkrétně ve standardech 802.11b (2,4 GHz; 11 Mbit/s), 802.11g (2,4 GHz; 54 Mbit/s) a 802.11n (2,4 GHz/5 GHz; 600 Mbit/s), které jsou v současnosti nejrozšířenější [12].

2.2 Mikrokontroléry se zabudovaným bezdrátovým rozhraním

Mezi základní systémové části pro tvorbu zařízení spadající do definice IoT patří dle [13] následující komponenty:

- připojení k internetu
- integrovaný obvod vhodný pro komunikaci v internetu (Wi-Fi preferované)
- aplikační mikrokontrolér schopný vykonávat definované senzorické či akční funkce s možností řízení IO pro bezdrátovou komunikaci (případně obsahující integrované komunikační periferie)
- další hardware nezbytný pro zajištění požadovaných funkcí systému

Tab. 2 Přehled mikrokontrolérů s integrovaným Wi-Fi rozhraním [13]

Výrobce	Název produktu	Podporovaný standard	MCU
Espressif	ESP8266	802.11b/g/n	Tensilica Xtensa LX106; 80 MHz; RAM 64+96 kB.
Espressif	ESP32	802.11b/g/n	Tensilica Xtensa LX106; 160 MHz.
TI	CC3200	802.11b/g/n	ARM® Cortex®-M4 Core; 80 MHz; RAM 256kB.
Nufront	NL6621	802.11b/g/n	ARM® Cortex®-M3 Core; 160 MHz; RAM 448kB.
MediaTek	MT7681	802.11b/g/n	32-bit RISC architektura

Velmi rozšířeným se za poslední rok stal ESP8266, který krom příznivé ceny (již od 100 Kč za modul) umožňuje využití běžných periférií, jako jsou: SPI (Serial Peripheral Interface), I²C (Inter-Integrated Circuit), A/D (analogově/digitální) převodník, UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter), čítače/časovače s PWM (pulzně šířková modulace) a GPIO (obecné vstupy a výstupy). MCU (mikrokontrolér) ESP8266 je dodáván v QFN (Quad Flat No-Leads) pouzdru s 32 piny, přičemž pro zmíněné periferie lze z tohoto počtu použít 17 pinů. To je pro použití ve funkci řídicího mikrokontroléru bezdrátové jednotky nedostatečný počet a jediná případná aplikace ESP8266 může být ve formě podřízeného systému, kdy by sloužil pouze pro zajištění bezdrátové komunikace, jejíž obsah by si vyměňoval s řídicím mikrokontrolérem [14].

ESP32 se má stát nástupcem mikrokontroléru ESP8266. Tento nový IO (integrovaný obvod) obsahuje všechny potřebné periferie a dostatečný počet pinů, nicméně v době návrhu a stavby bezdrátové jednotky ještě nebyl na trhu. V případě příznivé ceny a podpory po uvedení na trh je jeho využití zajímavou možností. Výrobce vyzdvihuje zaměření na nízkou spotřebu dosaženou 40 nm výrobní technologií, podporu HW (hardwarového) šifrování FLASH paměti a běžně používané šifrovací algoritmy AES (standard pokročilého šifrování), SHA (Secure Hash Algorithm) a RSA (Rivest Shamir Adleman) [15].

Mikrokontrolér CC3200 obsahuje všechny potřebné periferie (A/D převodník, I²C, SPI, UART, zásobník čítačů/časovačů, obvod reálného času, atd.). CC3200 je dodáván v QFN pouzdře se 64 vývody, přičemž počet využitelných pinů pro aplikaci je 27. Systém řízení spotřeby přináší širokou škálu úsporných režimů a je tedy velmi vhodný pro bateriové napájení zařízení. MCU podporuje HW šifrování algoritmy AES, DES, 3DES (Data Encryption Standard); hašovací funkce SHA2 (Secure Hash Algorithm), MD5 (Message Digest) a kontrolní součty CRC (Cyclic Redundancy Check). Velkou výhodou je také podpora v podobě rozsáhlého SDK (Software Development Kit), který umožňuje rychlé pochopení základní funkce a ovládání periférií [16].

Mikrokontrolér NL6621 je formě DPS (Deska Plošných Spojů) modulů poslední dva roky oblíbený v amatérských aplikacích jako Wi-Fi komunikační rozhraní kvůli své nízké ceně, kdy je samotný modul možno pořídit přibližně za 70 Kč. S pomocí SPI rozhraní je možné modul připojit k řídicímu mikrokontroléru a používat ho jako externí periférii, nicméně kvůli velmi slabé technické a vývojové podpoře ze strany firmy Nufront (a tedy i k řídké uživatelské komunitě) není použití samotného MCU pro řídicí účely vhodné [17].

MT7681 je určen pro aplikace, jako jsou jednoduchá domácí automatizace, chytré zásuvky, řízení osvětlení, základní měření a vzdálené řízení. Možnosti IO jsou však značně omezeny a mezi jeho integrované periférie lze počítat pouze SPI, UART, GPIO a softwarové PWM. I tento mikrokontrolér je tedy vhodný využít jako komunikační rozhraní, ovšem pro samotné řízení bezdrátové jednotky neposkytuje všechny potřebné funkce [18].

Z uvedeného přehledu mikrokontrolérů s podporou Wi-Fi byl zvolen CC3200 firmy Texas Instruments, který poskytuje v komplexním řešení dostatečně výkonný aplikační mikrokontrolér (jádro Cortex-M4), subsystém řízení spotřeby a hlavně Wi-Fi procesor. Dostupný SDK obsahuje 63 vzorových projektů zaměřených na využití většiny periférií a funkcí integrovaného obvodu. Dále pak podpora od výrobce zahrnuje pokyny pro návrh layoutu DPS, hospodaření s energií napájecího zdroje, uživatelské příručky pro používání síťového procesoru a obsáhlý referenční manuál s blokovými diagramy popisujícími obsluhu periférií. Vlastnosti mikrokontroléru a demonstračního kitu popisují kapitoly 4.3.1 a 4.3.2.

3 Senzory pro monitorování okolního prostředí

Pro implementaci na hlavní elektronickou desku byl vybrán senzor intenzity osvětlení (z důvodu zajištění informací pro regulaci podsvětlení displeje) společně s kombinovaným senzorem relativní vlhkosti a teploty. Bližší informace o senzoru osvětlení poskytuje kapitola 4.4.1 a kombinovaný senzor RH/T (teplota) popisuje kapitola 4.4.2.

Mezi další parametry okolního prostředí, které může bezdrátová jednotka sledovat, patří koncentrace plynů NO₂ (oxid dusičitý), NH₃ (amoniak), CO, CH₄ (metan). Samotné senzory, principy detekce a připojení externích sensorových modulů popisuje kapitola 4.5.

Vhodným doplňkem zařízení při funkci sledování lokálního mikroklimatu by mohly být další tři typy senzorů, které nebyly na hlavní desku implementovány, avšak lze je doplnit na externím sensorovém modulu. Jedná se o senzory koncentrace CO₂, úrovně hluku a barometrického tlaku.

3.1 Měření úrovně hluku

Jednou z možností měření úrovně hluku je dle [19] využití elektretového mikrofону CMA-4544PF-W následovaného speciálním mikrofonním předzesilovačem MAX4466.

Mezi klíčové vlastnosti mikrofону CMA-4544PF-W patří všesměrová charakteristika, citlivost -44 dB, napájecí napětí vnitřního impedančního převodníku v rozsahu 3 V až 12 V, operační frekvenční rozsah 20 Hz až 20 kHz a maximální proudový odběr 500 μ A [20].

Předzesilovač MAX4466 se vyznačuje stabilním jednotkovým zesílením a 200 kHz frekvenčním pásmem při napájecím proudu maximálně 24 μ A. IO může pracovat až do krajních limitů napájecího napětí a společně s velkým zesílením v otevřené smyčce (125 dB při zatěžovací impedanci 100 k Ω), dostatečným potlačením rušivých vlivů napájecího napětí (112 dB) a vysokým potlačením souhlasného rušení (126 dB) je pro úpravu signálu z mikrofону velmi vhodný [21].

Výstupní analogový signál musí být zpracován mikrokontrolérem (ať už integrovaným nebo externím A/D převodníkem) s využitím odpovídajícího algoritmu pro určení úrovně hluku. Funkcí vhodnou k implementaci při zpracování získaného signálu je detekce periodického hluku (zvuk s charakteristikou tónu o konstantní frekvenci), jelikož takovýto signál má nejsilnější fyziologické účinky a může způsobit poškození hlemýždě ve sluchovém ústrojí [22].

3.2 Senzor barometrického tlaku



Obr. 5 Senzor barometrického tlaku, teploty a nadmořské výšky MPL3115A2 [23]

Piezoelektrický absolutní senzor tlaku zobrazený na *Obr. 5* je vybaven I^2C rozhraním a s měřicím rozsahem 20 kPa až 110 kPa je schopný pokrýt všechny úrovně nadmořské výšky na Zemi. Vnitřní plně kompenzovaný MEMS (Mikro-Elektro-Mechanický Systém) senzor společně s 24bitovým A/D převodníkem zprostředkovává přesné měření tlaku, nadmořské výšky a teploty. IO obsahuje vnitřní blok pro zpracování dat a není tedy nutné zatěžovat nadřazený mikrokontrolér výpočty pro kompenzaci závislých veličin (závislost tlaku na teplotě) a převod jednotek. MPL3115A2 integruje programovatelné uživatelské módy (šetření energie, prahové hodnoty přerušení, autonomní sběr dat včetně programovatelných cyklů). Napájecí napětí může nabývat rozsahu 1,95 V až 3,6 V, přičemž typická hodnota proudového odběru v aktivním režimu je 40 μA . Mezi klíčové funkce senzoru patří [24]:

- kalibrovaný rozsah tlaku od 50 kPa do 110 kPa, absolutní přesnost $\pm 0,4$ kPa
- měřicí rozsah od -40 $^{\circ}C$ do $+85$ $^{\circ}C$, absolutní přesnost ± 1 $^{\circ}C$ (při teplotě 25 $^{\circ}C$) a ± 3 $^{\circ}C$ v celém rozsahu
- I^2C rozhraní
- plná vnitřní kompenzace
- 24bitový A/D převodník
- možnost přímého vyčtení hodnoty tlaku (20 bitů, v Pascalech), nadmořské výšky (20 bitů, v metrech), teploty (12 bitů, ve stupních Celsia)

3.3 Senzor oxidu uhličitého

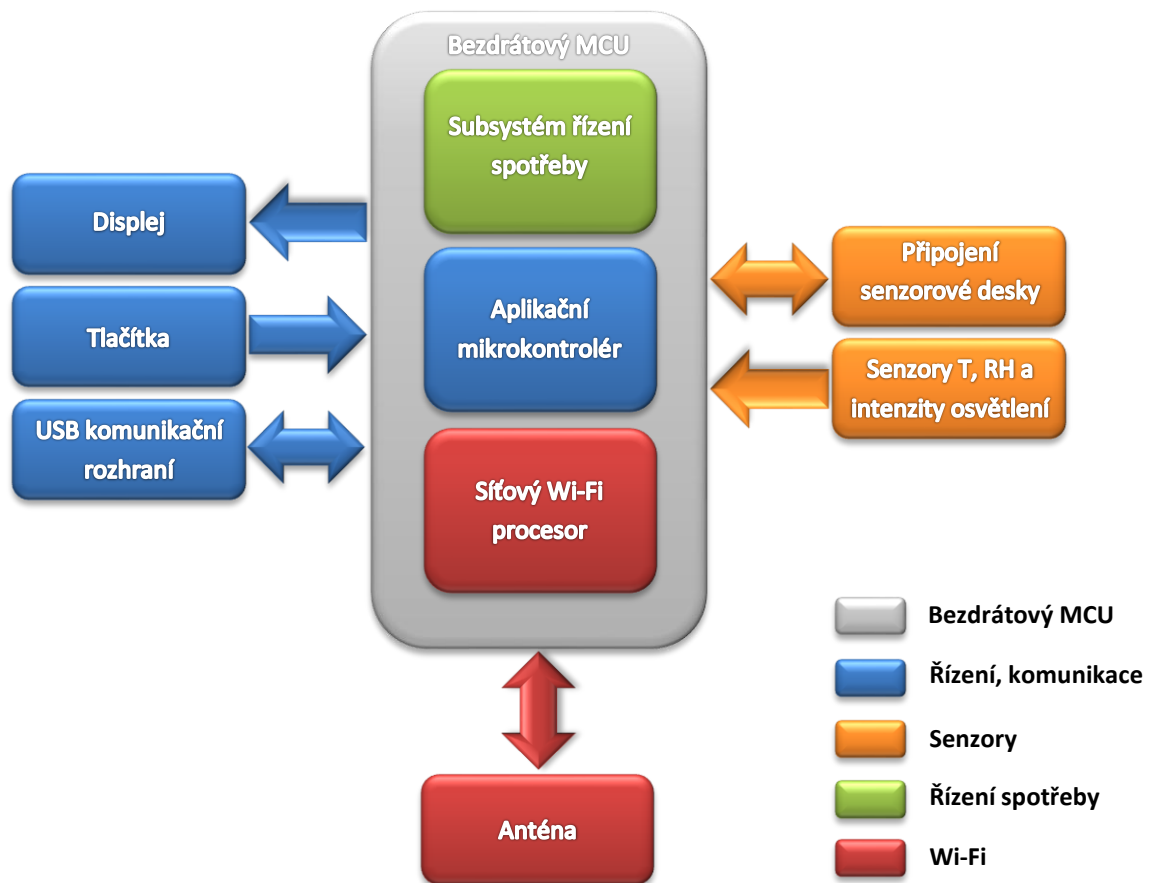


Obr. 6 Senzor oxidu uhličitého SprintIR Fast 20-100% [25]

Pro měření úrovně CO_2 v přenosných zařízeních je určen senzorový modul zobrazený na Obr. 6. Princip měření je založen na využití nedisperzní infračervené technologie, která využívá InSb (antimonid india) LED (dioda emitující světlo) diody a detektory v uzavřené komoře a umožňuje robustní konstrukci senzorů bez pohyblivých částí. Jelikož tento typ senzoru nepotřebuje vyhřívání, je jeho příkon minimalizován na 35 mW při napájecím napětí v rozsahu 3,2 V až 5 V. Senzor dokáže měřit s frekvencí až 20 Hz a tedy i monitorovat poměrně rychlé jevy v reálném čase. Senzor se dále vyznačuje vysokou chemickou odolností a malou změnou parametrů v závislosti na čase. Modul je vybaven komunikačním rozhraním UART. Rozsah měření je podle konkrétního typu modulu buď 0% až 20% koncentrace oxidu uhličitého, případně 0% až 100%. Přesnost měření je udávána jako $\pm 70 \text{ ppm} \pm 5 \%$ z měřené hodnoty [26].

4 Obvodové řešení

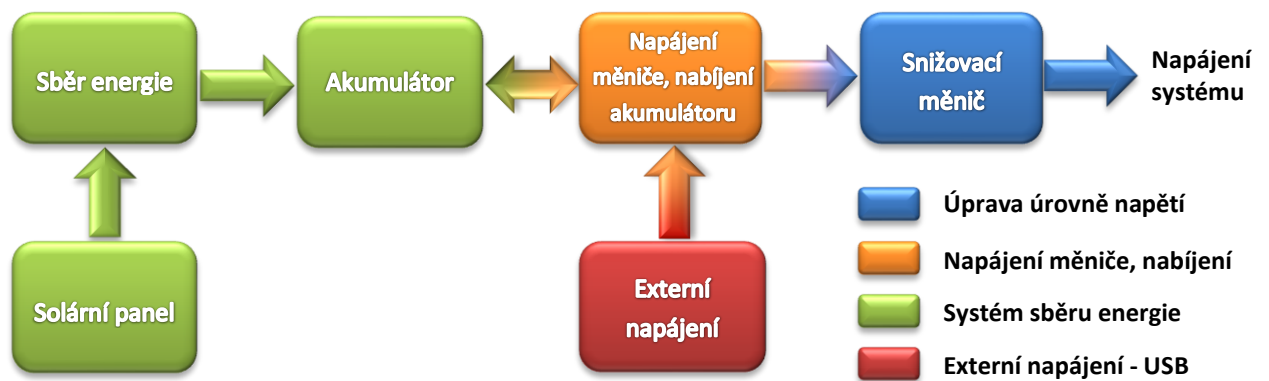
4.1 Blokové schéma



Obr. 7 Blokové schéma řídicí a měřicí části bezdrátové jednotky

Hlavním řídicím prvek systému je 32bitový mikrokontrolér CC3200, který je složen ze třech částí: subsystém řízení spotřeby, aplikační mikrokontrolér a síťový Wi-Fi procesor. Jako uživatelské rozhraní slouží LCD grafický displej s úhlopříčkou 1,8" a rozlišením 128×160 pixelů, který zobrazuje časové průběhy sledovaných veličin (relativní vlhkost a teplota z kombinovaného senzoru SHT21, intenzita okolního osvětlení). Ovládání obrazovek displeje zabezpečují dvě kapacitní tlačítka založená na vyhodnocovacím obvodu AT42QT1010. Pro drátovou datovou komunikaci a programování je přítomno USB komunikační rozhraní ve verzi USB 2.0. O převod mezi rozhraními USB/UART se stará převodník FT230XS. Pro samotnou bezdrátovou komunikaci je k síťovému Wi-Fi procesoru připojena čipová anténa. Velmi důležitým prvkem zařízení je univerzální rozhraní pro připojení externích senzorů, respektive sensorového modulu.

Z tohoto důvodu je na hlavní DPS umístěn konektor s napájecími piny a rovněž s piny přivedenými na A/D převodník, I²C rozhraní a také obecné GPIO piny pro univerzální použití (čtení či zápis logické úrovně, zdroj externího přerušení). Jako prostředek pro efektivní využívání energetických zásob je na desce integrován senzor TSL2561, který měří intenzitu okolního osvětlení a na základě této hodnoty je řízena regulace jasu podsvětlení LCD displeje PWM modulací. To přispívá nejen k úspoře energie, ale i k pohodlnějšímu ovládní, kdy nedochází k přesvícení displeje v temném okolním prostředí.



Obr. 8 Blokové schéma napájecího subsystému

Důležitou částí zařízení je napájecí subsystém. Jeho základní koncepcí je prodloužení výdrže na akumulátor, což vyvolává požadavek na efektivní sběr dostupné energie. Jako energetický zdroj byl zvolen kompaktní solární panel, který spolu s IO BQ25504, zaměřeným speciálně na sběr energie z termálních generátorů a solárních článků, dobíjí lithium-polymerový akumulátor s kapacitou 1 600 mAh. V případě, že zařízení nemá dostatečný přísun solární energie, je možné akumulátor nabíjet přes USB rozhraní a nabíjecí obvod MCP73837T, který rovněž dokáže paralelně s nabíjením akumulátoru i napájet celý systém. Potřebné napěťové úrovně pro napájení systému je dosaženo snižujícím měničem TPS62203, který zajišťuje úroveň 3,3 V a v případě, že jeho vstupní napětí nedosahuje dostatečné úrovně vhodné pro úpravu snižováním, je jeho vstupní svorka s výstupní propojena interním regulačním P-MOSFET (tranzistor řízený polem s vrstvou kovového oxidu, typ P) tranzistorem s nízkým spínacím odporem $R_{DS\text{ON}}$. Veškeré integrované obvody v napájecím subsystému (IO pro sběr energie, nabíjení baterie a snižující měnič) byly vybrány s ohledem na vysokou efektivitu a režimy úspory energie v případě napájení z akumulátoru.

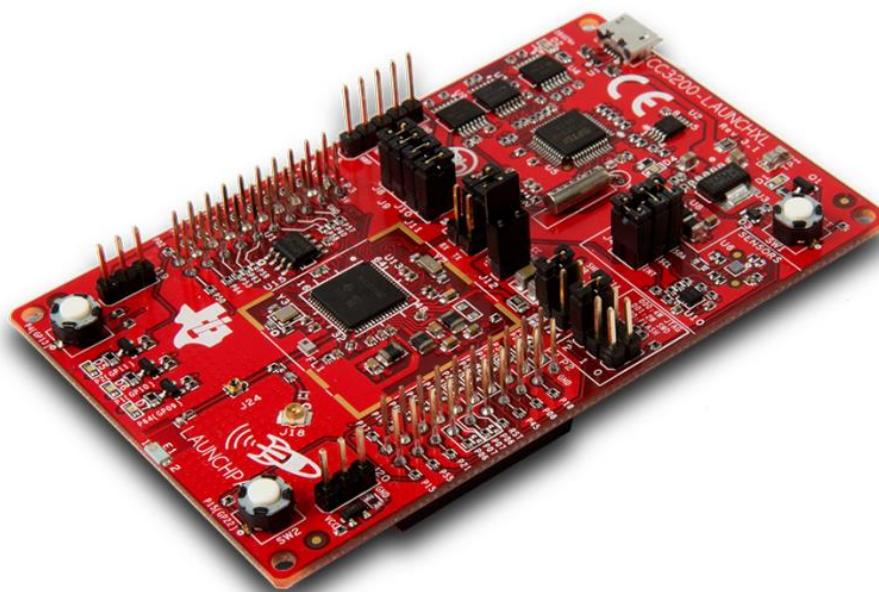
4.2 Popis funkce

Hlavním účelem zařízení je akvizice dat ze senzorů na hlavní desce a sensorových modulů. Analogové signály (zpracované A/D převodníkem mikrokontroléru) a digitální signály (zpracované I²C či SPI periferiemi, případně pomocí GPIO) poskytují informace například o okolní relativní vlhkosti a teplotě, úrovni NO₂, NH₃, CO, CH₄, intenzitě osvětlení, atd. Data mohou být, dle konkrétního typu dané veličiny, mikrokontrolérem předzpracována a poté zobrazena na displeji či odeslána ke zpracování do místní sítě. Posun mezi obrazovkami s průběhy a dalšími informacemi o sledovaných veličinách zajišťují kapacitní tlačítka. Na předním panelu se spolu s tlačítky a displejem nacházejí tři indikační diody, přičemž dvě z nich slouží jako zpětná vazba při stisku kapacitních tlačítek a zbývající LED signalizuje poruchy a události. Zařízení má nastavený časový limit, po jehož uplynutí dojde k vypnutí podsvícení displeje a tedy k šetření energie. Displej je znovu možno aktivovat stiskem jednoho z kapacitních tlačítek. Stisk rovněž dokáže mikrokontrolér probrat z jakéhokoli úsporného režimu či režimu spánku. Solární panel sbírá energii, která je po dosažení jisté minimální úrovně ukládána do akumulátoru. Paralelně s procesem dobíjení ze solární energie lze zařízení nabíjet i přes USB rozhraní. Použití solárního panelu může v závislosti na proudovém odběru z akumulátoru plně dostačovat k napájení zařízení (při velmi střídavém používání displeje a dostatečné dostupnosti solární energie), ale hlavně demonstruje použitelnost solárních zdrojů v aplikacích s nízkým příkonem. Akumulátor je možné z bezpečnostních důvodů odpojit od zařízení vypínačem, což je vhodné především při demontáži. Pro informaci o energetických rezervách je zařízení vybaveno měřením napětí baterie, které je orientačně schopno určit zbývající energii, respektive upozornit na její nízkou úroveň (indikace na displeji). Přes USB rozhraní je možno zařízení i programovat (s použitím programu FT Prog [27]), ovšem není zde možnost debugování. Pro ladění programu za běhu je nutno zařízení demontovat a připojit JTAG (Joint Test Action Group) programátor či jednodušeji LaunchPad s mikrokontrolérem CC3200 (viz kapitola 4.3). Je-li do univerzálního konektoru pro připojení senzorů zapojen nový modul, je nutno upravit stávající kód mikrokontroléru (lze využít univerzálních zobrazovacích funkcí a nový typ senzoru tedy do systému zakomponovat velmi rychle) – akvizice a zpracování dat z daného senzoru, vykreslení na displej a distribuce dat pro bezdrátovou komunikaci.

4.3 Mikrokontrolér

4.3.1 Referenční design

Pro otestování základních funkcí mikrokontroléru a rychlý vývoj aplikací vyvinula firma Texas Instruments demonstrační kit SimpleLink Wi-Fi CC3200 LaunchPad [28]. Tento kit (zobrazený na *Obr. 9*) integruje základní HW pro provoz MCU (napájecí subsystém, krystalové rezonátory, externí FLASH paměť, atd.), impedančně přizpůsobenou anténu pro bezdrátovou komunikaci, FTDI USB/UART převodník s rozšířenými funkcemi programování a debugování, taktilní spínače, LED diody, akcelerometr, teplotní senzor a také dvouřadé lištové konektory s vyvedenými piny procesoru. Ke kitu je dodáván kvalitní SDK s ovladači a vzorovými příklady vhodnými pro použití ve vývojovém prostředí CCS (Code Composer Studio) [29]. Podpurný balík dále obsahuje dokumentaci k MCU, vzorovým příkladům, rutinám základních funkcí pro použití periférií a ke schematickému zapojení LaunchPadu. Programovací a debugovací rozhraní kitu je možné odpojit od mikrokontroléru zabudovaného na desce a používat pak modul pro navázání komunikace a ovládání externího zařízení. Deska také obsahuje propojky a pozice pro měřicí rezistory a umožňuje tak kontrolovat spotřebu při vývoji aplikací s nízkým příkonem.



Obr. 9 SimpleLink Wi-Fi CC3200 LaunchPad [28]

Velmi vhodný nástroj usnadňující rozvržení využití mikrokontroléru (jeho periférií a vývodů) je TI Pin Mux Tool [30]. Tento program umožňuje vybrat jednu z následujících periférií:

- ADC – kanál analogově digitálního převodníku
- Camera – 8bitové paralelní rozhraní pro kameru
- GPIO – vstupně/výstupní pin s obecným použitím
- I²C – rozhraní pro datovou komunikaci
- McASP – vícekanálový audio sériový port
- SDHost – rozhraní pro připojení SD/MMC paměťové karty (Secure Digital/Multi Media Card)
- SPI – pro datovou komunikaci
- TimerCP – čítač/časovač s porovnávacím registrem
- TimerPWM – čítač/časovač s možností PWM modulace
- UART – Universal Asynchronous Receiver and Transmitter rozhraní pro datovou komunikaci

Pro zvolenou periférii dokáže program zobrazit možné piny, na které ji lze připojit a v případě obsazení daného pinu jinou periférií upozorní na konflikt. Po dokončení procesu přiřazování výstupů/vstupů periférií k definovaným pinům lze z programu TI Pin Mux Tool vygenerovat inicializační soubory pro projekt v CCS. Tyto soubory obsahují nastavení typu pinů (zda se jedná o vstupně/výstupní pin či pin s otevřeným kolektorem), zavedení zdroje hodin do konkrétní periférie a rovněž její počáteční reset.

4.3.2 Parametry a funkce mikrokontroléru

Mikrokontrolér CC3200 je založen na architektuře ARMv7E-M a patří do rodiny MCU Cortex-M4, která je určena pro běžné cenově dostupné operace v reálném čase. IO je speciálně upraven pro jednoduchou komunikaci prostřednictvím Wi-Fi a minimalizaci počtu externích komponent nutných pro její provoz. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1, skládá se mikrokontrolér ze třech hlavních částí, jejichž klíčové vlastnosti jsou [16]:

- Aplikační mikrokontrolér:
 - ARM (Advanced RISC Machine) Cortex-M4 jádro pracující na frekvenci 80 MHz
 - zabudovaná paměť 256 kB RAM (paměť s náhodným přístupem), bootloader načítající obsah externí sériové FLASH paměti, ovladače periferií v ROM (paměť pouze pro čtení)
 - 32kanálový přímý přístup do paměti přes rozhraní μ DMA (mikro přímý přístup do paměti)
 - hardwarové šifrování zahrnující AES, DES, 3DES, SHA2, MD5, CRC a kontrolní součet
 - SD/MMC rozhraní
 - 2 rozhraní UART
 - 1 rozhraní SPI
 - 1 rozhraní I²C
 - 4 časovače o šířce 16 bitů a možností PWM modulace pro univerzální použití
 - 1 Watchdog diagnostický obvod
 - 4kanálový 12bitový A/D převodník
 - 27 jednotlivě programovatelných GPIO pinů
 - dedikované externí SPI rozhraní pro sériovou FLASH paměť
- Wi-Fi síťový procesor:
 - dedikovaný ARM mikrokontrolér kompletně zbavující aplikační mikrokontrolér zátěže s Wi-Fi a internetovým protokolem
 - 802.11 b/g/n Radio, Baseband, MAC (Media Access Control) a Wi-Fi radič
 - TCP/IP (Transfer Control Protocol/Internet Protocol) zásobník
 - výkonný šifrovací nástroj pro rychlé a bezpečné Wi-Fi a internetová připojení s 256bitovým AES šifrováním

- WPA2 (Wi-Fi Protected Access) zabezpečení
- podpora mobilní aplikace SmartConfig pro snadné připojení
- výkon vysílače 18,0 dBm, citlivost přijímače -95,7 dBm
- Subsystem řízení spotřeby:
 - integrované stejnosměrné měniče podporují široký rozsah vstupních napětí, přičemž povolený rozsah je od 2,1 V do 3,6 V a logické úrovně pinů jsou vždy svázané s napájecím napětím
 - mikrokontrolér v režimu hlubokého spánku pracuje s proudovým odběrem 250 μ A
 - minimální odběr při aktivním příjmu přes Wi-Fi je 59 mA a 229 mA při vysílání

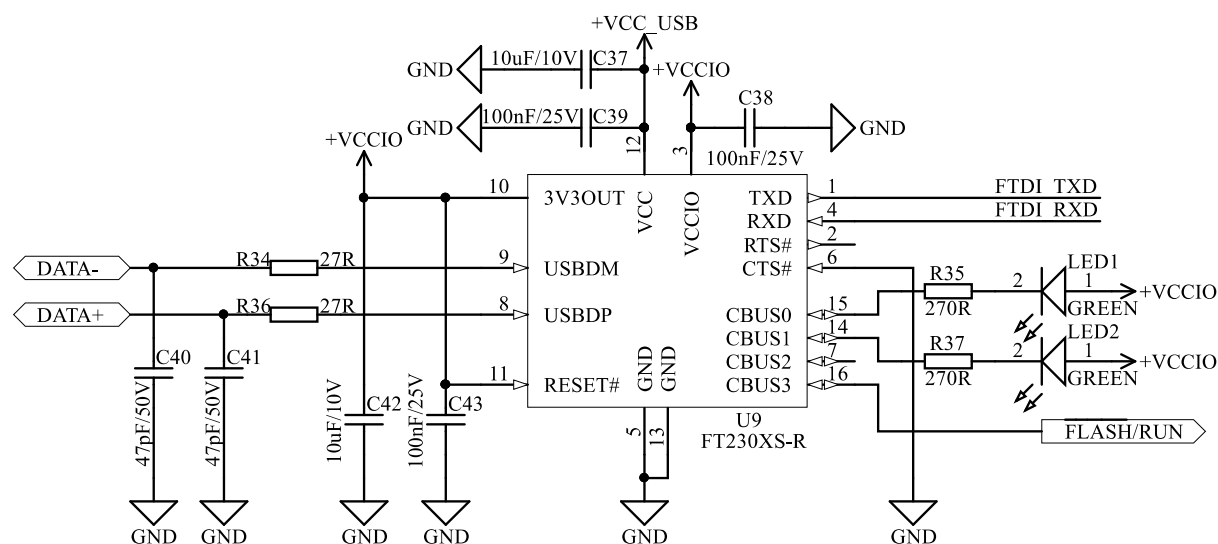
Integrovaný obvod je dodáván v QFN pouzdru se 64 piny a rozměry 9 mm \times 9 mm. Kompletní zapojení mikrokontroléru je zobrazeno v příloze H. Za povšimnutí stojí rozsáhlý napájecí subsystém mikrokontroléru, kde jsou pomocí externích pasivních součástek (cívky a kondenzátorů), ve spolupráci s vnitřními spínacími prvky, vytvářeny napěťové úrovně pro napájení různých částí systému (0,9 V až 1,2 V pro vnitřní logiku, 1,8 V až 1,9 V pro analogovou a radiofrekvenční část, 1,8 V až 1,9 V pro WLAN výkonový zesilovač) z jednoho napájecího napětí v rozsahu 2,1 V až 3,3 V.

Pro taktování obvodu reálných hodin a časování WLAN protokolu v režimech s nízkým příkonem je přítomen krystalový rezonátor Q_1 s frekvencí 32,768 kHz. Součástí zdroje kmitočtu pro fázový závěs, a taktování částí mikrokontroléru běžících na vyšších frekvencích, je krystal Q_2 s rezonanční frekvencí 40 MHz. Piny 11 až 14 vedou k externí FLASH paměti s kapacitou 8 MB přes speciálně vyhrazené SPI rozhraní. Pin 21 slouží k přepínání mezi režimy programování/běhu zařízení a schéma nezbytného řídicího obvodu je v příloze H, kde se rovněž nachází i FLASH paměť a obvod připojený na pin 32, který je určen k resetu mikrokontroléru. Čipová anténa je spolu s filtračními členy připojena k pinu 31. Zbývající použité piny disponují vždy funkcí GPIO s možnými alternativními funkcemi – I²C, SPI, UART, výstupy z časovačů, PWM výstupy, vstupy A/D konvertoru, atd.

4.3.3 Programovací a debugovací rozhraní

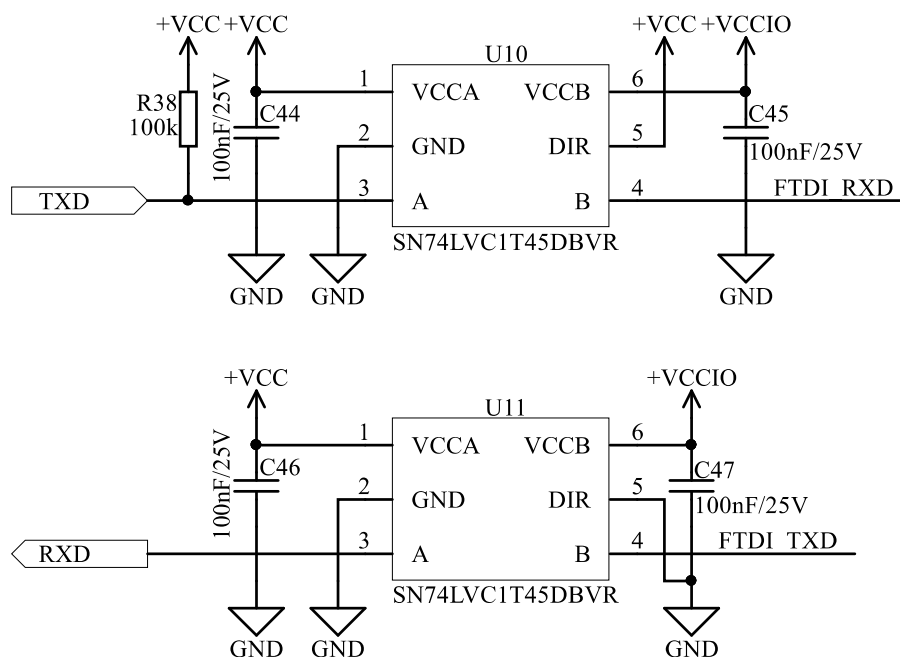
V Code Composer Studiu je při debugování přes JTAG možné nahrát do SRAM (statická paměť s náhodným přístupem) paměti mikrokontroléru zkompilovaný program a ten následně provozovat. Vzhledem k energetické závislosti SRAM paměti však dojde po odpojení napájecího napětí k vymazání jejího obsahu a je tedy nutné použít nástroj pro trvalý záznam programu do externí FLASH paměti, ze které je pomocí bootloaderu v mikrokontroléru při připojení napájení program načten do vnitřní SRAM a spuštěn. Pro nahrávání souborů do FLASH paměti a další konfiguraci CC3200, jako AP (Access Point), HTTP (HyperText Transfer Protocol) či DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) server slouží utilita CCS UniFlash [31].

Při procesu trvalého záznamu dat do externí FLASH paměti je nutno uvést mikrokontrolér do režimu programování (nastavení pinu 21 do stavu logické jedničky, viz kapitola 4.3). V tomto režimu jsou data přijatá periferií UART zapsána přes vyhrazené SPI rozhraní do externí FLASH paměti. Po dokončení programování je pin 21 opět nastaven do logické nuly a po resetu MCU je program z FLASH paměti načten do vnitřní SRAM paměti procesoru a spuštěn. USB/UART rozhraní je dále možné využívat pro běžnou sériovou komunikaci. Jako převodník mezi uvedenými rozhraními byl zvolen obvod FT230XS, který má všechny požadované funkce, je cenově dostupný a velmi jednoduchý na implementaci - pouzdro SSOP (Shrink Small Outline Package) a minimum nezbytných součástek [32]. Krom signálů RX a TX je u převodníku využit i jeden GPIO pin (CBUS3) určený pro ovládání tranzistoru, který řídí logickou úroveň na pinu 21 a přepíná tedy mezi režimy programování/běhu zařízení. Zapojení převodníku zobrazuje *Obr. 10*.



Obr. 10 Zapojení převodníku USB/UART

Jelikož je IO FT230XS nezbytné napájet minimálně 3,3 V, byla zvolena varianta zapojení, kdy je převodník napájen z USB sběrnice. Logické úrovně datových signálů převodníku ovšem respektují napájecí napětí a tak by mohlo v okamžiku, kdy napětí napájející mikrokontrolér dosahuje 3 V a méně (při náhradě použitého akumulátoru za jeden z obvyklých Li-Ion akumulátorů, které dokáží pracovat i s napětím 2,7 V) dojít k otevření parazitní struktury ve formě substrátové diody a k poškození mikrokontroléru. Z tohoto důvodu byly do zařízení zakomponovány převodníky logických úrovní SN74LVC1T45, které umožňují bezproblémový přenos dat a vyznačují se extrémně nízkou vlastní spotřebou (maximálně 4 μA) [33]. Převodníky logické úrovně jsou dodávány v pouzdře SOT23-6 (Small Outline Transistor). Obvodové zapojení převodníků logických úrovní je zobrazeno na Obr. 11.



Obr. 11 Zapojení převodníků logických úrovní

Pro debugování je možné použít buď pětivodičové rozhraní JTAG nebo modernější třívodičové rozhraní SWD (Single Wire Debug). Jako hlavní důvod pro použití SWD je uváděna redukce nezbytného počtu vodičů. Jelikož hlavní deska obsahuje vyvedený JTAG a je možné od mikrokontroléru odpojit FTDI obvod na desce a RX, TX signály tedy vyžít pro připojení externích periférií, lze hlavní desku propojit s LaunchPadem. To umožňuje velmi pohodlné programování i debugování s minimem elektroniky na hlavní desce. LaunchPad pro účely debugování obsahuje komplexnější USB/UART převodník (vyžadující externí krystal a EEPROM paměť), několik IO s třístavovými členy a k nim příslušujícími pasivními prvky.

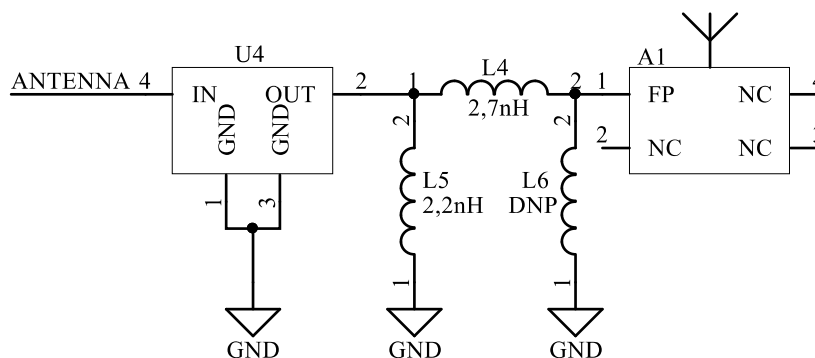
4.3.4 Komunikační technologie



Obr. 12 Čipová anténa 2450AT43B100E, pásmová propust 2450BP15E0100E [34], [35]

Použitá anténa je určena pro pracovní rozsah 2,4 GHz až 2,5 GHz a je tedy vhodná pro WLAN (v běžných standardech 802.1 b/g) a Bluetooth komunikace. Její špičkový zisk se pohybuje kolem 1,3 dBi (izotropně) a průměrný zisk kolem -0,5 dBi. Maximální vstupní výkon je 2 W a impedance má hodnotu 50 Ω . Obr. 13 zobrazuje zapojení celé anténní části včetně přizpůsobovacího obvodu tvořeného indukčnostmi L_4 , L_5 , L_6 . Γ -článek tvořený indukčnostmi L_4 a L_5 doporučuje výrobce doplnit o pozici na další indukčnost (v tomto případě L_6) pro ladění impedančního přizpůsobení v případě problémů s provozem antény [36].

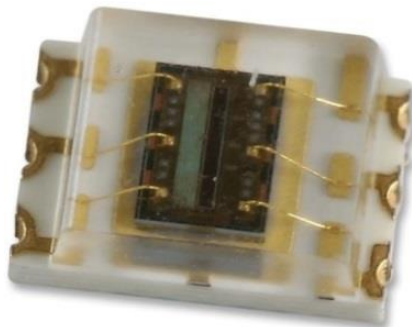
Pásmová propust je stejně jako anténa určena pro frekvence 2,4 GHz až 2,5 GHz a impedanci 50 Ω . Její vložný útlum je maximálně 1,5 dB a vstupní výkon 500 mW [37].



Obr. 13 Zapojení antény včetně pásmové propusti a přizpůsobovacího obvodu

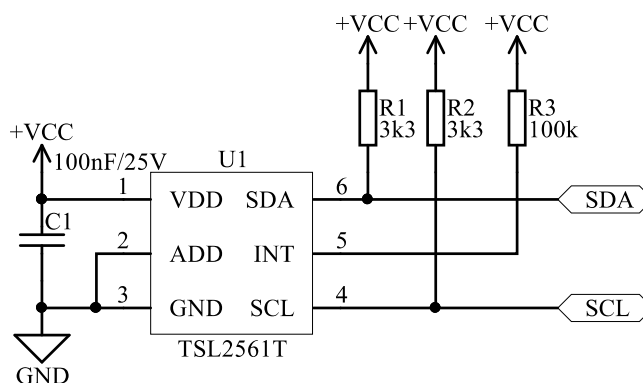
4.4 Senzory integrované na hlavní desce

4.4.1 Senzor intenzity osvětlení



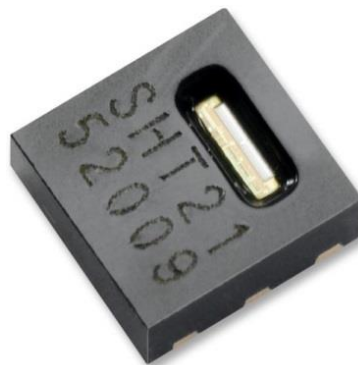
Obr. 14 TSL2561T - senzor intenzity okolního osvětlení [38]

Integrovaný obvod TSL2561T patří do rodiny inteligentních převodníků konvertujících intenzitu světla do digitálního signálového výstupu [39]. Senzor kombinuje jednu širokopásmovou fotodiodu (zahrnující viditelné i infračervené spektrum) a jednu infračervenou fotodiodu. Dva integrované sigma-delta A/D převodníky převádí proudy fotodiodami s rozlišením 16 bitů na digitální I²C rozhraní. Výsledky převodu mohou být mikrokontrolérem dle empirického vztahu přepočítány na intenzitu osvětlení v luxech. IO je dostupný v široké variantě pouzder, přičemž zvolená varianta je na Obr. 14. Nízký příkon, pohybující se typicky okolo 750 μ W v úsporném režimu, předurčuje TSL2561T k použití v mobilních aplikacích. Jako další užitečné funkce integruje IO pin pro výběr I²C adresy a pin vyhrazený pro přerušení, které je aktivováno při podtečení/přetečení softwarově definované úrovně osvětlení. Schematické zapojení senzoru je uvedeno na Obr. 15.



Obr. 15 Zapojení senzoru intenzity okolního osvětlení

4.4.2 Senzor teploty a relativní vlhkosti



Obr. 16 SHT21 - senzor relativní vlhkosti a teploty [40]

SHT21 je inteligentní senzor relativní vlhkosti a teploty s I²C rozhraním, kalibrací z výroby, nízkým proudovým odběrem a dlouhodobou stabilitou parametrů. Je dodáván v pouzdru typu DFN (Dual Flat No-Leads), které je zobrazeno na Obr. 16. Měření relativní vlhkosti je založeno na kapacitním principu a teplotu měří band-gap senzor. SHT21 obsahuje na křemíkovém čipu všechny části měřicího řetězce: senzor vlhkosti a teploty, precizní napájení, nízkošumový lineární zesilovač, A/D převodník a digitální rozhraní. Jeho rozlišení lze přepínat mezi 8/12 bity pro RH a 12/14 bity pro měření teploty. Další parametry senzorů zobrazuje Tab. 3 a Tab. 4.

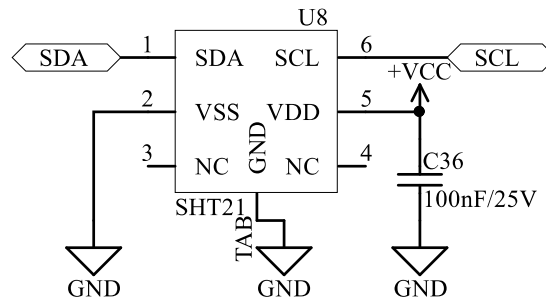
Tab. 3 Parametry RH senzoru IO SHT21 [41]

Senzor relativní vlhkosti					
Parametr	Podmínky	Minimum	Typicky	Maximum	Jednotky
Rozlišení	12 bit		0,04		%
	8 bit		0,7		%
Přesnost	typ.		±2,0		%
Opakovatelnost			±0,1		%
Hystereze			±1		%
Nelinearita			<0,1		%
Doba odezvy	τ (63 %)		8		s
Operační rozsah		0		100	%
Časový drift			<0,5		%/rok

Tab. 4 Parametry teplotního senzoru IO SHT21 [41]

Senzor teploty					
Parametr	Podmínky	Minimum	Typicky	Maximum	Jednotky
Rozlišení	14 bit		0,01		°C
	12 bit		0,04		°C
Přesnost	typ.		±0,3		°C
Opakovatelnost			±0,1		°C
Operační rozsah		-40		125	°C
Doba odezvy	τ (63 %)	5		30	s
Časový drift			<0,04		°C/rok

Mezi významné elektrické parametry patří proudový odběr 150 nA v režimu spánku, což při napájecím napětí 3,3 V znamená příkon přibližně 0,5 μ W. Návrhová pravidla layoutu zmiňuje kapitola 5.4.4. Schematické zapojení senzoru je zobrazeno na Obr. 17.

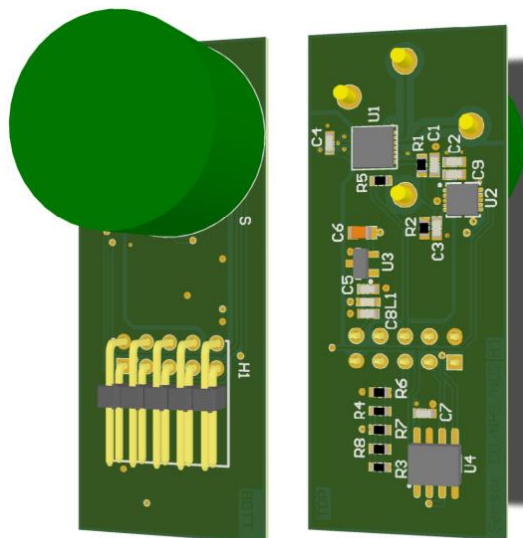


Obr. 17 Zapojení senzoru relativní vlhkosti a teploty

4.5 Externí senzorové moduly

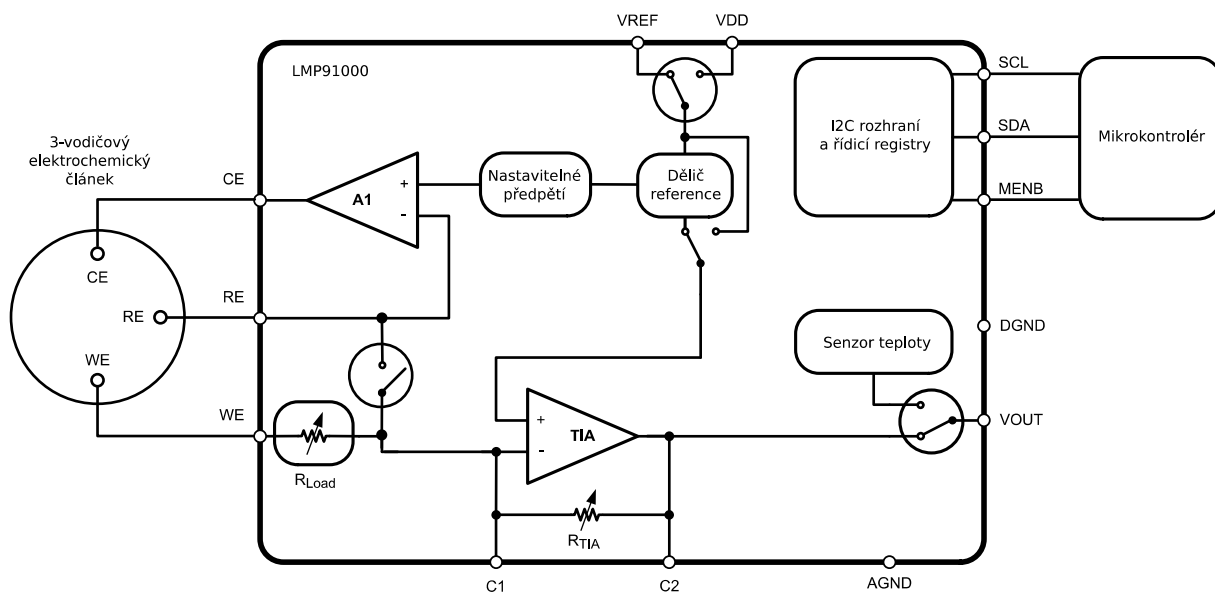
Jelikož má velká většina moderních senzorů, které se dají použít pro sledování parametrů okolního prostředí, rozhraní I²C, byly signální vodiče SDA a SCL společně s napájením vybrány jako základ univerzálního konektoru. Pro přibližné měření analogového napětí je na konektor připojen signál ADC3, který je přiveden taktéž na vstup 12bitového A/D převodníku mikrokontroléru. Některé senzory určené pro použití na I²C sběrnici jsou dodávány s neměnnou adresou, jako například analogový front-end LMP91000 pro práci s elektrochemickými senzory [42]. Zmíněný obvod má však aktivační/povolovací pin, který umožní připojení IO na sběrnici a nastiňuje tedy řešení konfliktu I²C adres při vícenásobné aplikaci. Z důvodu výběru aktivních integrovaných obvodů, ale i z důvodu řízení dalších částí externího senzorového modulu, jsou na konektor přivedeny z mikrokontroléru signály GPIO8, GPIO12 a LCD_MOSI, které všechny mohou sloužit jako obecné GPIO piny a fungovat tedy jak ve funkci digitálního výstupu, tak vstupu.

Uspořádání signálů na konektoru je provedeno s ohledem na možnost využití senzorových modulů vyvíjených v rámci diplomové práce s názvem Vyhodnocovací jednotka pro multisenzorový modul kolegou Jiřím Janatou. Mezi parametry, které jsou moduly schopny vyhodnocovat, patří úroveň plynů NO₂, NH₃, CO a CH₄.

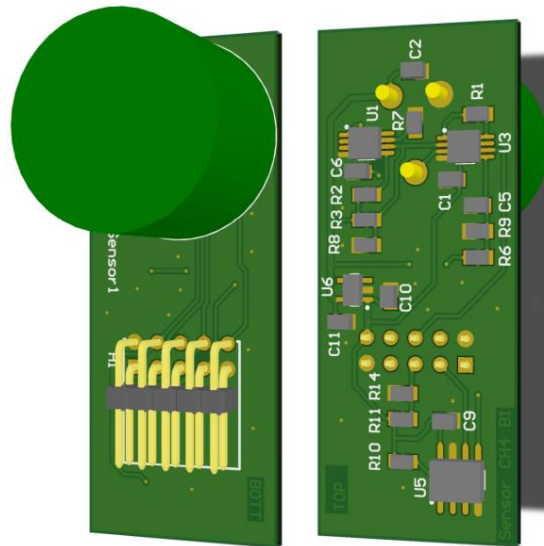


Obr. 18 Univerzální senzorový modul pro měření NO_2 , NH_3 či CO

Senzory zobrazené na Obr. 18, určené pro měření koncentrace oxidu dusičitého, amoniaku a oxidu uhelnatého v ovzduší, jsou koncipovány jako třívodičové amperometrické cely, které jsou v potenciostatické konfiguraci (konstantní napětí mezi pracovní a referenční elektrodou) zapojeny k LMP91000, viz Obr. 19. Transimpedanční zesilovač převádí proud generovaný plynovým senzorem na napětí V_{OUT} , které je upraveno odporovým děličem a navzorkováno 24bitovým A/D převodníkem s I^2C výstupem. Použití tohoto typu modulů je velmi výhodné z hlediska spotřeby, jelikož hodnota proudu tekoucího modulem by v průměru neměla přesahovat $30 \mu\text{A}$, což spolu s napájecím napětím $3,3 \text{ V}$ znamená příkon přibližně $100 \mu\text{W}$.



Obr. 19 Zapojení IO LMP91000 se senzorem v potenciostatické konfiguraci [42]



Obr. 20 Senzorový modul pro měření CH_4

Modul zobrazený na Obr. 20 je určen pro měření metanu. Hlavní částí modulu je pelistorový senzor [43]. Na povrchu tohoto senzoru dochází ke katalytickému spalování hořlavých plynů v ovzduší. Spalování je nutno iniciovat vhodnou teplotou, z čehož plyne vyšší energetická náročnost provozu pelistoru a jeho použití tedy není příliš vhodné při bateriovém napájení zařízení. Pro použitý senzor CH-A3 dosahuje při doporučeném napětí 3 V příkon hodnoty 190 mW [44]. Pelistory se typicky zapojují do odporového můstku (měřicí pelistor, referenční pelistor, dva přesné odpory) a výstupem je analogové napětí odpovídající rozvážení můstku [45].

4.6 Uživatelské rozhraní

4.6.1 Displej



Obr. 21 TFT LCD displej - 1,8" Adafruit [46]

Použitý grafický LCD displej má rozlišení 128×160 bodů a s barevnou hloubkou 18 bitů dokáže zobrazit až 262 144 barev. Jako řadič je použit integrovaný obvod ST7735R [47]. Mezi zajímavé funkce displeje patří přítomnost microSD slotu, ze kterého mohou být po vložení karty načítány uložené bitmapy. Jako základ datové komunikace je použito rozhraní SPI dovybavené o piny pro funkci RESET, aktivaci displeje a volbu, zda budou zapsána data či příkaz. Dále je pak vyveden pin pro řízení intenzity podsvětlení displeje. Displej je kompatibilní s napájením a logickými úrovněmi +3,3 V i +5 V. Při napájení +3,3 V a plném jasu podsvícení je proudový odběr přibližně 50 mA. Fyzické rozměry displeje jsou $34 \text{ mm} \times 56 \text{ mm} \times 6,5 \text{ mm}$.

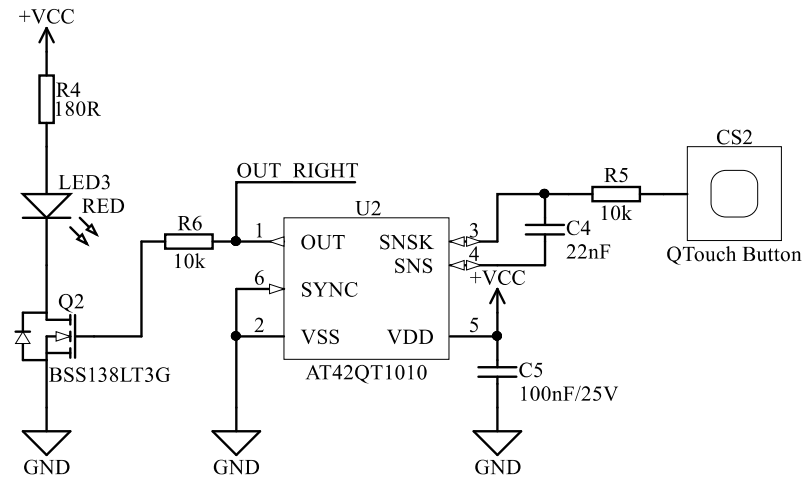
4.6.2 Kapacitní senzory dotyku

Jelikož taktilní spínače vyžadují pro svou aktivaci nezanedbatelnou sílu stisku (mohlo by docházet k posunu krabičky po pracovní ploše), byly pro ovládání zařízení zvoleny kapacitní senzory dotyku. Toto řešení přináší pozitiva ve formě nulové síly pro aktivaci tlačítka, celistvosti čelního panelu a neomezené životnosti kapacitních tlačítek. Nevýhodou je vyšší cena obvodu pro detekci stisku/přiblížení a nutnost korektního návrhu layoutu DPS.

Pro vyhodnocování stisku/přiblížení byl zvolen integrovaný obvod AT42QT1010 v pouzdře SOT23-6 [48]. Mezi jeho hlavní vlastnosti patří:

- vyhodnocení jednoho tlačítka při stisku/přiblížení
- použití layoutu snímací elektrody o minimální velikosti $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ či větší (v závislosti na tloušťce panelu zařízení), postačuje jednovrstvá DPS
- materiál elektrod: měď, stříbro, uhlík
- elektrodové substráty: DPS (ohebné i pevné), plastová folie, sklo
- materiál panelu zařízení: plast, sklo, kompozity, barvené povrchy

- tloušťka panelu vhodná pro detekci: až 12 mm u skla, až 6 mm u plastu
- citlivost nastavitelná pomocí kondenzátoru
- informace o detekci předmětu ve formě logické jedničky na výstupním pinu
- napájecí napětí 1,8 V až 5,5 V
- zpracování signálu: automatická kalibrace, kompenzace driftu, filtrování šumu



Obr. 22 Zapojení kapacitního senzoru dotyku

Integrovaný obvod AT42QT1010 lze dle zapojení pinu SYNC provozovat buď v rychlém režimu (RR) nebo v režimu nízkého příkonu (RNP). V RR dosahuje proudový odběr při napětí 3,0 V hodnoty přibližně 378 μA a doba odezvy senzoru se pohybuje kolem 1 ms. V RNP je při stejném napětí proudový odběr podstatně menší (34 μA), ovšem za cenu prodloužení doby odezvy senzoru na hodnotu přibližně 80 ms. Doba odezvy v RNP je stále vhodná pro komfortní ovládání zařízení a jedenáctinásobné snížení proudového odběru je u bateriově napájeného zařízení velmi žádoucí.

IO dále integruje funkci HeartBeat, která indikuje bezchybný provoz obvodu tak, že před každým snímáním dotyku/přiblížení uvede OUT pin na 15 μs do stavu vysoké impedance. Z toho důvodu lze OUT pin svázat pull-up rezistorem s napájecím napětím a vzniklý pulz detekovat. Při stavbě bezdrátové vyhodnocovací jednotky byly výstupy z integrovaných obvodů přivedeny na piny mikrokontroléru vybavené možností zapnutí interních pull-down rezistorů. Zároveň se jedná o piny, které jsou označeny jako Wake-Up sources a lze je tedy použít pro probuzení mikrokontroléru z režimu spánku (buzení na náběžnou hranu).

Z experimentů vyplynulo, že vhodná hodnota kondenzátoru C_4 , který nastavuje citlivost a dobu nezbytnou pro detekci stisku, je 22 nF. Zásady návrhu layoutu pro optimální funkci kapacitních senzorů jsou uvedeny v kapitole 5.4.2.

4.6.3 Indikační LED diody

Pro poskytnutí zpětné vazby o detekci dotyku/přiblížení je zařízení opatřeno červenými LED diodami pro levé i pravé tlačítko. LED dioda je připojována katodou k zemi přes N-MOSFET tranzistor, jenž je (přes rezistor omezující kapacitní proud k nabíjení a vybíjení C_{GS} – vstupní kapacita MOSFET tranzistoru) řízen z OUT pinu IO AT42QT1010.

Přední panel bezdrátové vyhodnocovací jednotky je opatřen ještě jednou červenou LED diodou určenou k univerzálnímu použití – signalizace poruchových stavů a různých událostí. Tato dioda je (opět přes tranzistor) řízena z mikrokontroléru.

Jelikož se indikační diody nacházejí na panelu spolu s kapacitními tlačítky, bylo nutné vybrat speciální LED pro reverzní povrchovou montáž. Zvolené elektroluminiscenční diody se montují na opačnou stranu DPS, než kde má být svit viditelný, a svítí skrz díru v plošném spoji, viz *Obr. 23*.



Obr. 23 LED dioda pro reverzní SMT montáž [49]

4.7 Napájecí subsystém

V kombinaci s bezdrátovou datovou komunikací bylo vhodné uvažovat i o energetické autonomii zařízení. Sběr energie ze solárních článků malých výkonů je dnes dobře rozpracovanou a technologicky zvládnutou oblastí. Tento fakt vedl k výběru integrovaného obvodu BQ22504, který je pro sběr energie (z různých zdrojů) speciálně určen a jeho vlastnosti jsou podrobně popsány v kapitole 4.7.1. Jako solární panel, vhodný pro použití s čipem pro sběr energie, byl vybrán BL65-45, jehož stručný popis následuje v 4.7.2.

V případě trvalého nedostatku slunečního svitu či při větším průměrném odběru energie, než je solární panel schopen dlouhodobě dodávat, by hrozilo, že se zařízení ocitne zcela bez energie a nebude moci fungovat. Z tohoto důvodu bylo vybráno řešení ve formě IO MCP73837T, jehož vlastnosti jsou detailně popsány v kapitole 4.7.5. Zmíněný obvod je schopen nabíjet akumulátor a napájet daný systém z rozhraní USB. Vzhledem k všudypřítomnosti počítačů, notebooků či adaptérů pro mobilní telefony a tablety je tento způsob napájení mimořádně vhodný a společně s rozšířeným typem USB konektoru (USB Micro B) je napájecí zdroj v případě potřeby prakticky vždy po ruce. Zařízení se po připojení k PC nejen nabíjí, ale lze s ním i drátově komunikovat, programovat ho a ladit.

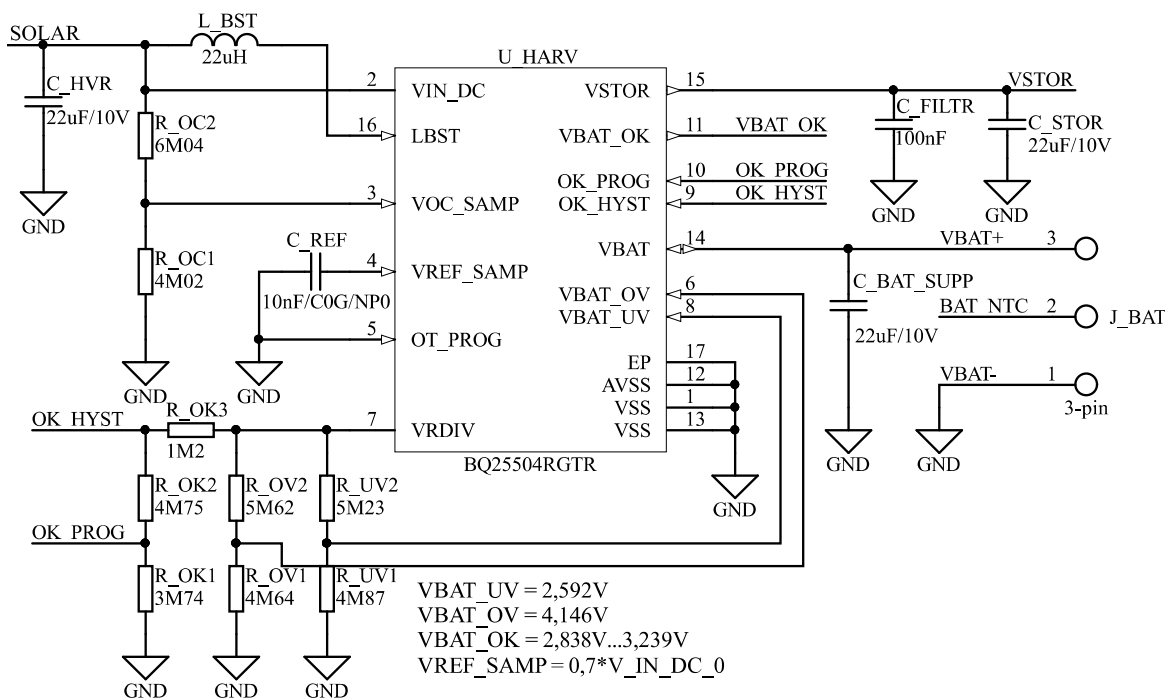
Jako úložiště energie byl použit lithium-polymerový akumulátor z důvodů, jako jsou: nízká hmotnost, relativně vysoká kapacita, nízké samovybití, velký zátěžový proud a nízká vnitřní impedance [50]. Podrobnější popis použitého akumulátoru se nachází v kapitole 4.7.3.

Nejjednodušší cestou pro napájení systému by bylo napájet celý systém z akumulátoru, který by mohl být paralelně dobíjen ze systému pro sběr energie a USB rozhraní. Problém je ovšem s omezenou tolerancí napájecího napětí u některých IO (například mikrokontrolér CC3200 má absolutní maximum napájecího napětí stanovené jako 3,8 V) a s maximálním napětím baterie, které může dosáhnout až 4,35 V. Řešení přinesl snižující měnič TPS62203, který mění vstupní napětí na 3,3 V, je-li vstupní napětí vyšší než tato úroveň, případně funguje jako kontinuálně sepnutý P-MOSFET tranzistor, pokud vstupní napětí dosahuje úrovně 3,3 V a méně. Snižující měnič je blíže popsán v kapitole 4.7.6.

Měření aktuální úrovně napájecího napětí zabezpečuje upravený odporový dělič připojený k jednomu z A/D kanálu mikrokontroléru. Jeho princip a přesný postup návrhu vysvětluje kapitola 4.7.4.

4.7.1 Systém sběru energie

Základem systému sběru energie je integrovaný obvod BQ25504 [51]. IO se řadí do rodiny inteligentních zařízení určených pro sběr energie při vstupních výkonech v řádech desítek mikrowattů až stovek miliwattů. Vzhledem k vysoké účinnosti (v závislosti na parametrech zdroje energie až 93 %) a velmi malé vlastní spotřebě je mimořádně vhodný při použití v aplikacích s nízkým odběrem, respektive v aplikacích s velmi omezenými energetickými zdroji. Předpokládanými zdroji energie jsou solární články či termoelektrické generátory. Jelikož se napěťové úrovně z těchto zdrojů obvykle pohybují v řádu stovek milivoltů až jednotek voltů, je pro ukládání energie do energetické banky (superkondenzátory, elektrolytické kondenzátory s nízkým svodovým odporem a akumulátory na bázi lithia či niklu) na čipu integrován zvyšující měnič. Integrovaný obvod implementuje ochranné funkce akumulátoru – ochranu proti přebíjení a ochranu proti nadměrnému vybíjení. Napěťové úrovně, při kterých jsou zmíněné ochrany aktivní, jsou nastavitelné pomocí odporových děličů R_{UV1} , R_{UV2} pro vybíjení a R_{OV1} , R_{OV2} pro přebíjení, které jsou zakresleny na *Obr. 24*. IO je dále vybaven komparátorem s hysterezí, který logickou úrovní na pinu V_{BAT_OK} signalizuje, zda se napětí baterie pohybuje v optimálních mezích, které jsou rovněž nastavitelné odporovou sítí – R_{OK1} , R_{OK2} a R_{OK3} . Mimořádně vhodnou funkcí je regulace pracovního bodu solárního panelu pro dosažení maximální hodnoty odebíraného výkonu z energetického zdroje. V zobrazeném zapojení je pracovní bod solárního panelu stanoven jako 70 % z napětí naprázdno pomocí rezistorů R_{OC1} a R_{OC2} . Vzorkování poměrné hodnoty z napětí naprázdno probíhá přibližně každých 16 vteřin, kdy je solární panel odpojen od vnitřního zvyšujícího měniče, po 256 ms dojde ke změření napětí a následuje uchování hodnoty v kondenzátoru C_{REF} . Z požadavků na velmi nízký odběr zařízení plynou i velmi vysoké hodnoty v rezistorových sítích (doporučená sumární hodnota pro jednotlivé děliče je kolem 10 M Ω), což vede k nutnosti specifického návrhu motivu plošného spoje. Výpočet konkrétních hodnot rezistorů pro nastavení jednotlivých napěťových úrovní pro ochranu akumulátoru, indikaci úrovně napětí a nastavení pracovního bodu solárního panelu, je usnadněn matematickými funkcemi, které výrobce poskytl pro tabulkový procesor MS Excel. Obvod BQ25504 je dodáván v pouzdře QFN se 16 vývody a půdorysem 3 mm \times 3 mm.



Obr. 24 Systém sběru energie s integrovaným obvodem BQ25504

4.7.2 Solární panel



Obr. 25 Solární panel BL65-45 [52]

Použitý solární panel má jako štítkovou hodnotu uvedeno napětí nezátíženého výstupu 1,5 V a zkratový proud 240 mA. Jeho fyzické rozměry jsou 67 mm × 46 mm × 4 mm.

4.7.3 Akumulátor

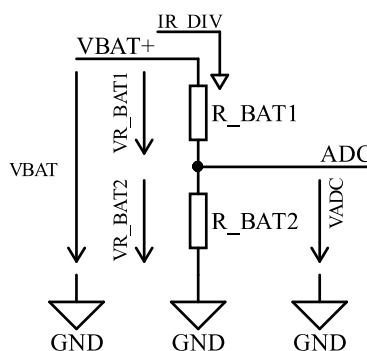


Obr. 26 Akumulátor L903450 - 3,7 V/1600 mAh [53]

Použitý lithium-polymerový akumulátor je vybaven ochranným obvodem pro sledování napěťové úrovně na výstupních svorkách. Výstup akumulátoru je od vnějšího obvodu odpojen jak při příliš nízké úrovni napětí ($3,0\text{ V} \pm 25\text{ mV}$), tak při příliš vysoké úrovni ($4,325\text{ V} \pm 50\text{ mV}$). Akumulátor má jmenovité napětí $3,7\text{ V}$ a kapacitu 1600 mAh . Vnitřní impedance, stanovená při kmitočtu 1 kHz , dosahuje hodnoty $38\text{ m}\Omega$. Maximální kontinuální vybíjecí proud je 1C , tedy 1600 mA . Mechanické rozměry baterie jsou $50\text{ mm} \times 34\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ [54].

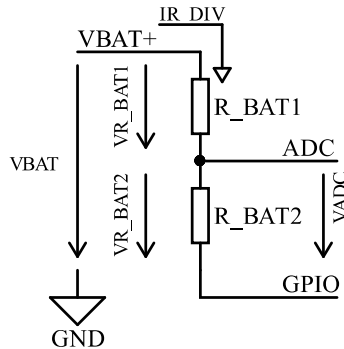
4.7.4 Měření napětí baterie

Pro získání informace o aktuálním napětí akumulátoru lze obvykle použít jednoduchý odporový dělič připojený mezi svorky akumulátoru Obr. 27, jehož střed by byl přiveden na vstup analogového převodníku integrovaného v mikrokontroléru. Při snaze o extrémně nízký příkon měřicího převodníku by bylo nutno použít rezistory v řádu jednotek či desítek $\text{M}\Omega$, což by prakticky mohlo vést k významnému zkreslení měřené úrovně, protože při těchto hodnotách odporů se již významněji projevuje konečná vstupní impedance A/D převodníku a také parazitní rezistorová síť plošného spoje (prosakující a plazivé proudy).



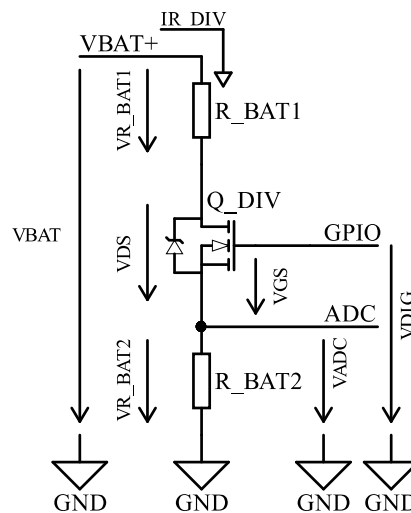
Obr. 27 Odporový dělič pro měření napětí akumulátoru – jednoduchý

Další možností měření napětí akumulátoru je jednoduchý odporový dělič připojený mezi kladnou svorku akumulátoru a GPIO pin MCU (viz *Obr. 28*). V okamžiku měření by byl vývod odporového děliče uzemněn přes vnitřní tranzistor integrovaného obvodu. V klidovém režimu by popisované zapojení mělo takřka nulový odběr, ovšem nastává zde problém s otevřením polovodičové diody tvořené vstupem MCU na pinu A/D převodníku a substrátem čipu. Tato skutečnost omezuje maximální napětí baterie na součet napájecího napětí mikrokontroléru a prahového napětí substrátové diody, tzn. $+VCC + 0,6 \text{ V}$.



Obr. 28 Odporový dělič pro měření napětí akumulátoru – odepínatelný

Vhodné řešení je zobrazeno na *Obr. 29*, kde je možné použít rezistory relativně malých hodnot (desítky $k\Omega$), jelikož v režimu nečinnosti má zařízení zanedbatelný příkon.



Obr. 29 Odporový dělič pro měření napětí akumulátoru – s tranzistorem

Uvedené zapojení ovšem vyžaduje pečlivý návrh, protože pro sepnutí unipolárního tranzistoru je třeba respektovat úroveň prahového napětí V_{GSth} . Pro použitý tranzistor IRLML6344 [55] platí:

$$V_{GS_{th_{max}}} = 1,1 \text{ V} \quad (4.1)$$

Napěťové úrovně pro návrh děliče:

$$V_{BAT_{min}} = 2,7 \text{ V} \quad (4.2)$$

$$V_{BAT_{max}} = 4,5 \text{ V} \quad (4.3)$$

$$V_{GPIO_{min}} = 2,7 \text{ V} \quad (4.4)$$

$$V_{GS_{CHOSEN}} = 1,5 \text{ V} \quad (4.5)$$

Zvolená celková hodnota děliče:

$$R_{DIV_{num}} = R_{BAT1_{num}} + R_{BAT2_{num}} = 100 \text{ k}\Omega \quad (4.6)$$

Při zanedbání $R_{DS_{ON}}$ je proud děličem dán jako:

$$I_{RDIV} = \frac{V_{BAT_{max}}}{R_{DIV_{num}}} = \frac{4,5}{10^5} = 45 \text{ }\mu\text{A} \quad (4.7)$$

Napětí na spodním rezistoru $R_{BAT2_{num}}$:

$$V_{RBAT2_{num_{max}}} = V_{GPIO_{min}} - V_{GS_{CHOSEN}} = 2,7 - 1,5 = 1,2 \text{ V} \quad (4.8)$$

Výsledné hodnoty odporů:

$$R_{BAT2_{num}} = \frac{V_{RBAT2_{num_{max}}}}{I_{RDIV_{max}}} = \frac{1,2}{45 \times 10^{-6}} = 26, \bar{6} \text{ k}\Omega \quad (4.9)$$

$$R_{BAT1_{num}} = R_{DIV} - R_{BAT2_{num}} = 100 \times 10^3 - 26,6 \times 10^3 = 73, \bar{3} \text{ k}\Omega \quad (4.10)$$

Volba hodnot reálných součástek:

$$R_{BAT1} = 73,2 \text{ k}\Omega/0,1\% \quad (4.11)$$

$$R_{BAT2} = 26,7 \text{ k}\Omega/0,1\% \quad (4.12)$$

Výpočet relativní chyby převodu odporového děliče:

$$\delta_{RBAT1, RBAT2} = \sqrt{\delta_{RBAT1}^2 + \delta_{RBAT2}^2} = \sqrt{(0,1 \times R_{BAT1})^2 + (0,1 \times R_{BAT2})^2} = \quad (4.13)$$

$$= \sqrt{(0,001 \times 73200)^2 + (0,001 \times 26700)^2} \cong 77,92 \text{ }\Omega$$

$$\xi_{RBAT1, RBAT2} = \frac{\delta_{RBAT1, RBAT2}}{R_{BAT1} + R_{BAT2}} \times 100 = \frac{77,92}{99\,900} \times 100 \cong 0,078 \quad (4.14)$$

$$\xi_{RDIV} = \sqrt{\xi_{RBAT1, RBAT2}^2 + \xi_{RBAT2}^2} = \sqrt{0,078^2 + 0,1^2} \cong 0,127 \text{ \%} \quad (4.15)$$

Výsledný převodní poměr včetně chyby je stanoven jako:

$$V_{ADC} = V_{BAT} \left(\frac{R_{BAT2}}{R_{BAT1} + R_{BAT2}} \pm \xi_{RDIV} \right) = V_{BAT} \left(0,267 \pm \frac{0,127}{100} \right) \text{ [V]} \quad (4.16)$$

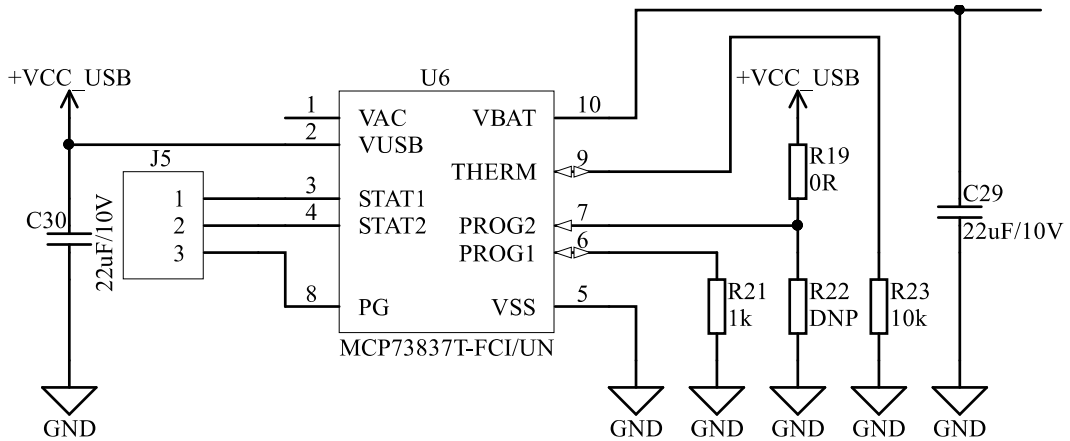
4.7.5 Externí napájení, nabíjení akumulátoru

IO MCP73837 patří do rodiny kompaktních integrovaných nabíječů Li-Ion/Li-Pol akumulátorů [56]. Malé rozměry pouzdra (DFN s půdorysem 3 mm × 3 mm, MSOP s 10 vývody) spolu s nízkým počtem dalších součástek předurčují použití obvodu v mobilních aplikacích. IO umí automaticky vybírat zdroj energie, ze kterého nabíjí baterii a případně i napájí systém. V případě, že jsou napájecí adaptér a USB připojeny současně, dojde k automatickému napájení/nabíjení z adaptéru.

Velikost proudu, který je odebírán z adaptéru, je stanovena hodnotou rezistoru R_{21} mezi pinem PROG1 a zemí. Proud z USB portu může být buď 100 mA (pin PROG2 na zem) nebo 500 mA (pin PROG2 na napájecí napětí USB sběrnice). O požadavek na větší proudový odběr (500 mA) se při enumeraci USB zařízení stará IO FT230XS použitý pro drátovou komunikaci a programování mikrokontroléru, viz kapitola 4.3.2. Nabíječ je možné zakoupit ve čtyřech provedeních koncové nabíjecí napěťové úrovně a to: 4,2 V; 4,35 V; 4,4 V; 4,5 V. Pro nabíjení akumulátoru byla zvolena varianta 4,2 V. Pin THERM slouží pro připojení NTC (záporný teplotní součinitel) termistoru, který často bývá integrován v akumulátoru a má hodnotu 10 k Ω . Použitý akumulátor L903450 nemá pin s NTC termistorem vyveden a tak je funkce teplotní ochrany vyřazena připojením 10 k Ω rezistoru proti zemi. Pin PG indikuje přítomnost napájecího napětí a je typu otevřený kolektor. Kombinace logických stavů na pinech STAT1, STAT2 signalizuje různé stavy jako standby režim, přednabíjení akumulátoru, režim rychlého nabíjení, atd.

Akumulátor je nabíjen ve třech základních fázích: přednabíjení, rychlonabíjení, regulace na konstantní napětí. Přednabíjení probíhá, pokud je napětí baterie nižší než 3 V a hodnota konstantního proudu je v tomto případě 10 % z proudu v režimu rychlonabíjení (zde tedy 50 mA). Po překročení hranice 3 V dochází k přechodu do režimu rychlonabíjení konstantním proudem (500 mA) a tento režim trvá do dosažení 4,2 V na akumulátoru. Zařízení následně přechází do udržovacího režimu, kdy je akumulátor regulován na konstantní napětí 4,2 V. Je-li v udržovacím režimu splněna podmínka přetečení bezpečnostního časovače (6 hodin) nebo je-li proud odebíraný z nabíječe menší než 7,5 % (37,5 mA), je proces nabíjení považován za dokončený. Nabíjení je znovu zahájeno v okamžiku, kdy napětí akumulátoru poklesne pod 96,5 % jmenovitého napětí (tedy 4,05 V).

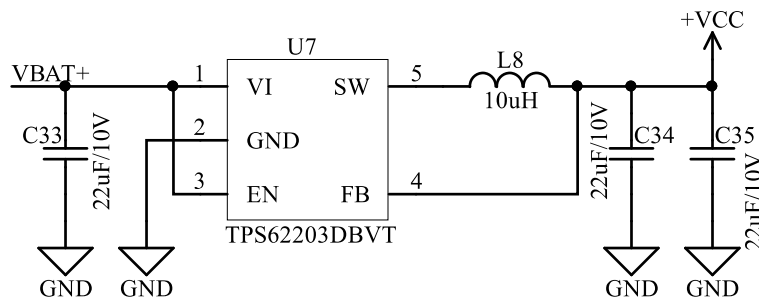
Jelikož nabíječ funguje jako lineární regulátor, může docházet k jeho značnému ohřevu ztrátovým teplem a IO tedy vhodně integruje funkci teplotní ochrany. Dále pak obsahuje bezpečnostní funkci dokončení procesu nabíjení, kdy odběr baterky (případně včetně odběru paralelně napájeného systému) musí klesnout pod 10 % nabíjecího proudu v režimu rychlonabíjení v době kratší než 6 hodin. V opačném případě je další nabíjení akumulátoru zastaveno a je nutno provést reset nabíječe (odpojení a připojení baterie nebo odpojení a připojení napájecích zdrojů).



Obr. 30 Zapojení nabíječe akumulátoru MCP73837

4.7.6 Snižující měnič

IO TPS62203 patří do rodiny synchronních snižujících měničů s vysokou účinností (až 95 %) a díky malým rozměrům je vhodný do mobilních zařízení [57]. Dokáže pracovat se vstupním napětím v rozsahu 2,5 V až 6 V. Jmenovitý výstupní proud je udáván jako 300 mA. Regulace interního P-MOSFET tranzistoru je prováděna PWM modulací s nosným kmitočtem 1 MHz. Typická hodnota klidového proudu je 15 µA. Měnič je vybaven interním soft start obvodem pro potlačení vlivu skokové změny odběru proudu při rozběhu – rozběh probíhá po krocích (60 mA, 120 mA, 240 mA) a omezuje vznik rušení. Při nízkém proudovém odběru přejde měnič do režimu šetření energie, ve kterém používá redukovanou spínací frekvenci v režimu pulzně frekvenční modulace. Obvod je dodáván v pouzdře SOT23-5.



Obr. 31 Zapojení snižujícího měniče TPS62203

4.7.7 Energetická bilance

Přehled proudových odběrů jednotlivých částí systému, jejich součinitel využití a podmínky provozu shrnuje Tab. 5. Součinitel využití je zde definován jako hodnota mezi 0 a 1 (respektive mezi 0 až 100 %) vyjadřující střidu aktivity systémové části v definovaných podmínkách. Hodnoty proudových odběrů byly převzaty z katalogových listů jednotlivých součástek (u integrovaných obvodů), případně dopočteny na základě obvodového zapojení. Stanovení součinitelů využití bylo o poznání problematictější, jelikož je přímo svázáno s odhadovanou mírou aktivity jednotlivých komponent.

Tab. 5 Proudové odběry jednotlivých částí zařízení

Lokace	Obvod	Popis	Podmínky	Součinitel využití [%]	Proudový odběr [μ A]	Počet kusů	Průměrný odběr [μ A]
DPS s kap. tlačítka	AT42QT1010	Vyhod. dotyku	3,3 V	100	38	2	76,00
	Červená LED	Signalizace dotyku	3,3 V; detekce	0,01	7 500	2	1,50
	Červená LED	Diagnostická LED	3,3 V; diagnostika	0,001	7 500	1	0,08
Hlavní DPS	TSL2561T	Senzor osvětlení	3,3 V; aktivní režim	0,03	240	1	0,07
			3,3 V; režim spánku	99,97	3,2	1	3,20
	M25PX80	FLASH paměť	3,3 V; pohot. režim	99,6	30	1	29,88
			3,3 V; aktivní režim	0,4	4 000	1	16,00
	CC3200	Mikrokontrolér	3,3 V; 2 min. vys. cykly	100	111	1	111,00
	TPS62203	Snižující měnič	$>3,3$ V; 3,8 V pro výpoč.	85	50	1	42,50
			$\leq 3,3$ V	15	15	1	2,25
	MCP73837	Nabíječ baterie	USB odpojeno	100	0,6	1	0,60
	BQ25504	IO - sběr energie	UV nebo OV režim	50	0,5	1	0,25
SHT21	RH a T senzor	3,3 V; aktivní režim	0,8	300	1	2,40	
		3,3 V; režim spánku	99,2	0,15	1	0,15	
SN74LVC1T45	Převod. log. úrovní	3,3 V	100	2	2	4,00	
Displej	1,8" Adafruit	LCD displej	3,3 V; aktivní režim	0,3	30 000	1	90,00
			3,3 V; režim spánku	99,7	50	1	49,85

DPS s kapacitními tlačítka vykazuje kontinuální odběr 76 μ A s občasným nárůstem při detekci prstu (či jiného detekovatelného předmětu) v blízkosti snímacích elektrod. Aktivita detekčních LED, spolu s diagnostickou diodou, by měla být v průměru velmi nízká, čemuž odpovídají součinitele využití ve zlomcích procenta.

Na hlavní DPS má nezanedbatelný proudový odběr v aktivním režimu senzor RH a T společně se senzorem intenzity osvětlení. Jejich využití bylo definováno na základě přibližně pětiminutových provozních cyklů a době převodu měřených veličin. Po odměření přecházejí senzory do režimu spánku a snižují tak svůj proudový odběr na zanedbatelnou úroveň. Průměrný proudový odběr a součinitel využití mikrokontroléru byl převzat z příkladu výpočtu životnosti zařízení na bateriové napájení, který je uveden v [58]. V tomto příkladu jsou předpokládány dvouminutové cykly, ve kterých dochází k připojení zařízení k přístupovému bodu a iniciování síťového provozu. Používání zařízení pro logování dat s frekvencí jejich vysílání v řádu jednotek minut je mimořádně vhodné kvůli minimalizaci průměrného proudového odběru, jelikož proudový odběr síťového procesoru se pohybuje v okamžiku vysílání mezi 160 mA a 272 mA.

Velký kontinuální proudový odběr má LCD displej a to přibližně 30 mA při zohlednění regulace jasu podsvětlení. Jeho odhadovaná průměrná denní aktivita je 5 minut.

Na základě hodnot v *Tab. 5* lze předpokládaný průměrný proudový odběr stanovit jako:

$$I_{\text{PRŮM}} = \sum_{i=1}^{17} (\text{součinitel využití}_i \times \text{proudový odběr}_i \times \text{počet kusů}_i) \text{ [A]} \quad (4.17)$$

Konkrétní hodnota průměrného proudového odběru je:

$$I_{\text{PRŮM}} = 429,72 \mu\text{A} \quad (4.18)$$

Při zanedbání samovybití akumulátoru, předpokladu provozu zařízení při pokojové teplotě a jmenovité kapacitě (udávané pro proudový odběr 440 mA) 1600 mAh lze provoz zařízení bez dobíjení akumulátoru, ať už solárním článkem či USB kabelem, vypočítat jako:

$$t_{\text{ŽIVOTA}} = \frac{Q_{\text{AKUM.}}}{I_{\text{PRŮM}}} \text{ [h]} \quad (4.19)$$

$$t_{\text{ŽIVOTA}} = 3\,723 \text{ h} \quad (4.20)$$

Pro hodnotu kapacity akumulátoru $Q_{\text{AKUM.}} = 1\,600 \text{ mAh}$ vychází doba života jako 3 723 h, což odpovídá přibližně 155 dnům. Výpočtem získanou dobu životnosti dále při praktickém provozu prodlužuje systém sběru energie, který dobíjí akumulátor ze solární energie. Praktické výsledky měření proudového odběru a schopnost solárního panelu dobíjet akumulátor popisuje kapitola 9.

4.8 EMC problematika

Aby zařízení fungovalo ve svém elektromagnetickém prostředí vyhovujícím způsobem, je třeba řešit nejen otázku elektromagnetické odolnosti, ale i otázku elektromagnetického vyzařování. Ačkoli finální výrobek nebyl testován v EMC (elektromagnetická kompatibilita) laboratoři, byly při jeho návrhu použity zásady a doporučení výrobců součástek, které by měly výrazně vylepšit odolnost, snížit míru vyzařování do okolí a zamezit ovlivňování citlivých analogových signálů uvnitř zařízení (senzory s analogovým výstupem).

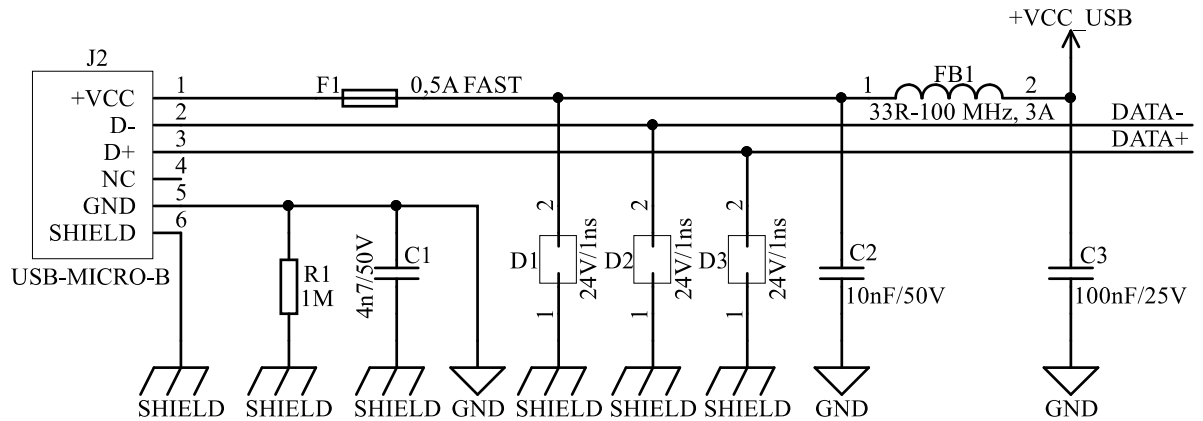
Z hlediska galvanické vazby zde potenciální problémy mohou nastat skrze komunikační/napájecí USB rozhraní a solární panel (možná nekvalitní krycí vrstva či nedostatečná elektrická pevnost krycího materiálu). Způsoby eliminace galvanických interferenčních jevů jsou uvedeny v kapitolách 4.8.1 a 4.8.2.

Další problém může nastat u citlivého kapacitního tlačítka, které by mohlo vnější rušivé vlivy vyhodnocovat jako stisk a při nevhodném návrhu motivu plošného spoje by dosahovalo velmi nízké citlivosti. Z tohoto důvodu jsou zásady návrhu doporučené výrobcem, a schéma zapojení zvyšující odolnost proti rušení, popsány v kapitole 4.8.3.

Obvod pro sběr energie (zvyšující měnič) pracuje se spínacím kmitočtem 1 MHz, z čehož plynou nároky odpovídající umístění vstupních/výstupních filtračních kondenzátorů a tlumivek. Výrobce opět poskytl kvalitní podklady pro aplikaci integrovaných obvodů v podobě vzorových layoutů. Doporučené zásady pro návrháře jsou shrnuty v kapitolách 4.8.4 a 4.8.5.

Zbylé části zařízení jsou navrženy s využitím obecných zásad pro návrh odolného zařízení s nízkým vyzařováním. Pro snížení vyzařování a minimalizaci impedance v napájecích cestách byla při konstrukci zařízení použita čtyřvrstvá deska plošných spojů s obecně doporučovanou skladbou, která je podrobně popsána v kapitole 5.3. Dále bylo dbáno na minimalizaci proudových smyček a na kvalitní blokování (použití pouze keramických kondenzátorů s velmi malým ekvivalentním sériovým odporem, vhodné umístění blokovacích filtračních a lokálních kondenzátorů) [59].

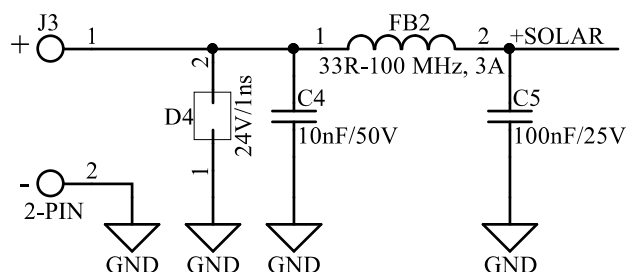
4.8.1 USB rozhraní



Obr. 32 Ochrana USB rozhraní

Pro ochranu napájecího vodiče USB rozhraní je doporučena omezovací dioda spolu s π -článkem v podobě 10 nF a 100 nF keramických kondenzátorů a feritové perly s impedancí 33 Ω při frekvenci 100 MHz [60]. Pro datové vodiče D+ a D- je vhodné použít rovněž omezovací diody, ovšem doplněné RC filtry s keramickými kondenzátory 47 pF a rezistory 27 Ω , viz kapitola 4.3.2. Z hlediska ochrany je vhodnější použít větší hodnoty kapacit i odporů, nicméně použitý RC článek má časovou konstantu úměrnou jmenovitým hodnotám pasivních součástek, což vede ke snížení strmosti hran u logických signálů. Před přímým svázáním vodiče země se stíněním USB kabelu varuje literatura [61] z důvodu možného vzniku parazitní proudové smyčky. Je proto vhodné použít paralelní kombinaci 1 M Ω rezistoru spolu s 4,7 nF kondenzátorem.

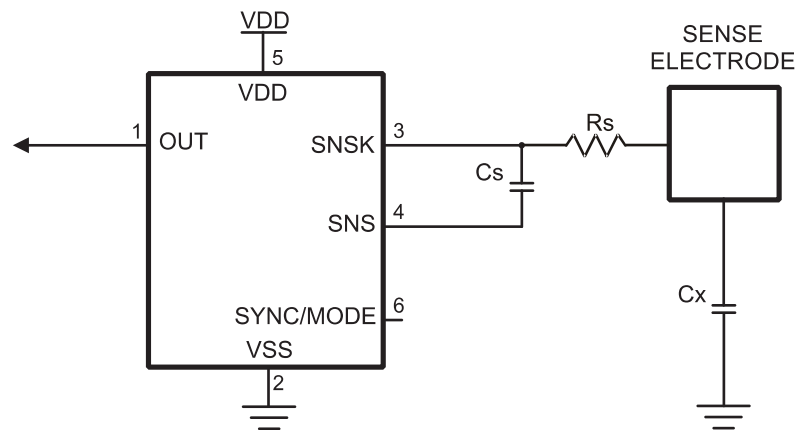
4.8.2 Připojení solárního panelu



Obr. 33 Ochrana připojení solárního panelu

Pro návrh ochrany vstupu ze solárního panelu byla použita stejná doporučení jako pro ochranu napájecího vodiče USB rozhraní. Na vstupu do DPS je zařazena omezovací dioda následovaná π -článkem tvořeným dvěma kondenzátory a feritovou perlou.

4.8.3 Kapacitní tlačítka

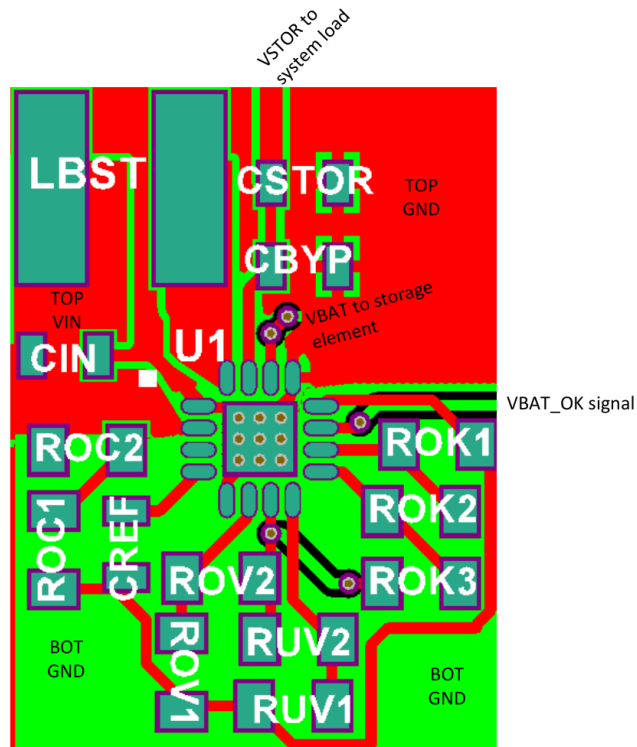


Obr. 34 Typické aplikační zapojení obvodu AT42QT1010 [48]

Potlačení vlivů elektrostatických výbojů a EMC efektů lze dle výrobce docílit zapojením sériového rezistoru R_S mezi pin SNS_K a snímací elektrodu. Vhodnou hodnotou je $10\text{ k}\Omega$ [62]. Kondenzátor C_S a rezistor R_S by měly být umístěny co nejbližší k integrovanému obvodu. Okolí rezistoru R_S a snímací elektrody nesmí být obklopeno zemním potenciálem z důvodu zvýšení kapacitní vazby. Dále výrobce uvádí standardní požadavky na lokální blokovací kondenzátor o hodnotě 100 nF umístěný v minimální vzdálenosti mezi piny V_{DD} a V_{SS} .

4.8.4 Obvod pro sběr energie

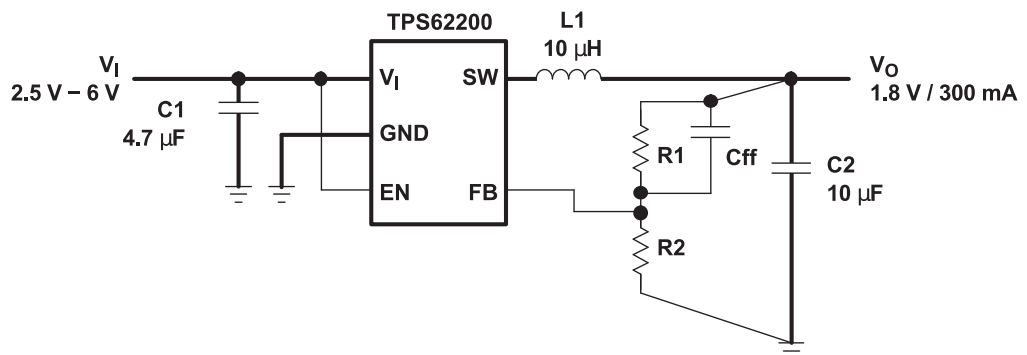
Pro IO BQ25504 je k dispozici doporučený motiv plošného spoje a zásady pro bezproblémový provoz zařízení. Kvůli integrovanému zvyšujícímu měničů se spínací frekvencí 1 MHz a vysokým špičkovým proudům je návrh layoutu v tomto případě klíčovým krokem k stabilnímu chodu a minimalizaci vyzařování. Nejvyšší prioritou při umísťování součástek má kondenzátor C_{BYP} (100 nF) mezi svorkami V_{STOR} a V_{SS} , lokální blokovací kondenzátor na výstupu ze zvyšujícího měniče, přičemž následuje paralelně připojený C_{STOR} , který slouží pro ukládání energie (minimálně $10\text{ }\mu\text{F}$) před tím, než je uložena v baterii či odebrána zatěžujícím obvodem. Dále je vhodné umístit blízko vstupních pinů kondenzátor C_{IN}/C_{HVR} , který filtruje napětí ze solárního článku. Jako poslední je třeba zapojit cívku zvyšujícího měniče L_{BST} mezi piny L_{BOOST} a V_{IN_DC} . Schematické zapojení je uvedeno v kapitole 4.7.1.



Obr. 35 Doporučená kresba plošného spoje pro obvod BQ25504 [51]

4.8.5 Snižovací měnič

Pro snižovací měnič TPS62203 uvádí výrobce doporučené schéma zapojení se zvýrazněním fyzického propojení při návrhu DPS [57]. Dodržení uvedených zásad by mělo zaručit stabilitu provozu a minimalizovat elektromagnetické vyzařování. Vstupní a výstupní kondenzátory spolu s cívkou by měly být umístěny co možná nejbližší k IO. Obvod zpětné vazby je nutné zapojit přímo na vývody výstupního filtračního kondenzátoru.



Obr. 36 Schéma zapojení pro měnič TPS62203 se zásadami pro layout [57]

5 Realizace obvodového řešení

5.1 Návrhový systém

Jako návrhový systém byl zvolen program Altium Designer (AD) ve verzi 16.0.8 od společnosti Altium Ltd. [63]. AD integruje schopnosti, jako jsou: hierarchický návrh, simulace signálové integrity, výpočet impedance spojů, paralelní tažení diferenciálních párů a sběrnic, strukturovaný jazyk pro tvorbu návrhových pravidel, analýza elektronických obvodů s využitím SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) modelů [64], 3D vizualizace a možnost importu/exportu STEP (Standard for the Exchange of Product model data) modelů [65]. Zmíněná možnost práce se STEP modely byla velmi užitečná při návrhu mechanické konstrukce, kdy bylo možné z AD exportovat modely jednotlivých DPS, importovat je do SolidWorksu a odhalit tak případné kolize krabičky a plošných spojů.

5.2 Montážní technologie a pouzdra součástek

Vzhledem k vysoké míře integrace klíčových komponent byla jako hlavní montážní technologie zvolena povrchová montáž, nicméně pro větší mechanickou odolnost konektorů bylo při konstrukci zařízení využito i technologie vsazované montáže. Velká část použitých integrovaných obvodů je na trhu dostupná v pouzdrech typu QFN či DFN, která se vyznačují minimálními rozměry, ovšem pro ruční osazování nejsou příliš vhodná. Z tohoto důvodu byla v případě dostupnosti zvolena alternativní vývodová pouzdra – SSOP, SOIC (Small Outline Integrated Circuit), SOT23, atd. [32]. Pro pasivní čipové součástky byla zvolena velikost 0603 jako přijatelný kompromis mezi velikostí součástek a komfortem při ručním osazování (s použitím odporové hrotové páječky a horkovzdušné stanice).

5.3 Parametry plošného spoje



Název vrstvy	Typ	Materiál	Tloušťka [mm]	Materiál dielektrika	Dielektrická konstanta
Horní potisk	Potisk				
Horní maska	Nepájjivá maska	Povrchový mat.	0,01016	Rezist	3,5
Horní vrstva mědi	Signálová vrstva	Měď	0,03556		
Dielektrikum 1	Dielektrikum		1,5	FR-4	4,2
Spodní vrstva mědi	Signálová vrstva	Měď	0,03556		
Spodní maska	Nepájjivá maska	Povrchový mat.	0,01016	Rezist	3,5
Spodní potisk	Potisk				

Obr. 37 Skladba vrstev pro dvouvrstvou DPS [63]

Skladba dvouvrstevných DPS (kapacitní tlačítka, USB rozhraní) nebyla pro parametry výsledného zařízení klíčová, a tak byl zvolen obvyklý sklo-epoxidový laminát FR-4 o tloušťce 1,5 mm [66]. Tloušťka základního plátování mědi je 18 μm , přičemž k zesílení dochází při následných galvanických procesech (dalších až 20 μm).



Název vrstvy	Typ	Materiál	Tloušťka [mm]	Materiál dielektrika	Dielektrická konstanta
Horní potisk	Potisk				
Horní maska	Nepájivá maska	Povrchový mat.	0,01016	Rezist	3,5
Horní vrstva mědi	Signálová vrstva	Měď	0,035		
Dielektrikum 1	Dielektrikum	Prepreg	0,13	Isola IS400	4,1
Vnitřní vrstva 1	Napájecí vrstva	Měď	0,035		
Dielektrikum 3	Dielektrikum	Jádro	1,2	Isola IS400	4,1
Vnitřní vrstva 2	Napájecí vrstva	Měď	0,035		
Dielektrikum 2	Dielektrikum	Prepreg	0,13	Isola IS400	4,1
Spodní vrstva mědi	Signálová vrstva	Měď	0,035		
Spodní maska	Nepájivá maska	Povrchový mat.	0,01016	Rezist	3,5
Spodní potisk	Potisk				

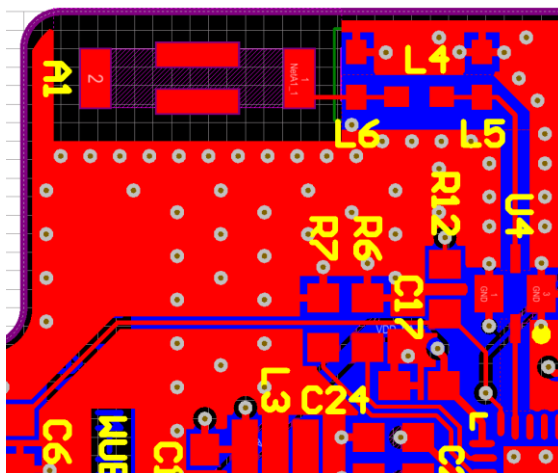
Obr. 38 Skladba vrstev pro čtyřvrstvou DPS [63]

Hlavní deska klade, především díky použití čipové antény, větší požadavky na skladbu DPS. Použití dvouvrstvé DPS standardní tloušťky 1,5 mm je nevyhovující, jelikož pro impedanční přizpůsobení VF (vysokofrekvenční) části na 50 Ω vychází tloušťka čáry propojující anténu, VF pásmovou propust a mikrokontrolér kolem 2 mm (tedy podstatně více, než rozměry padů použitých součástek). Z důvodu impedančního přizpůsobení, chlazení (mikrokontrolér a čip pro sběr energie se chladí pomocí prokůvů do vnitřní vrstvy s rozlitym zemním potenciálem) a dosažení nízké impedance napájecích cest součástek, bylo zvoleno řešení v podobě čtyřvrstvé DPS. Umístění signálů a napájení v jednotlivých vrstvách respektuje doporučení pro omezení kapacitních vazeb (použití kritických signálů ve vnějších vrstvách - microstrip) a nízkoimpedančního rozvodu napájení po desce (GND jako první interní vrstva, +VCC jako druhá interní vrstva s lokálními polygony pro rozvod napájení s jiným potenciálem než +VCC) [59].

Všechny tři desky (kapacitní tlačítka, USB rozhraní i hlavní deska) jsou opatřeny oboustrannou zelenou nepájivou maskou a jednostranným bílým servisním potiskem pro pohodlné osazování součástek a dobrou orientaci při zapojování konektorů a měření. Z důvodu dlouhodobé stability povrchu, vynikající rovinnosti a pájitelnosti byla zvolena povrchová úprava tvořená niklem a zlatem [67].

5.4 Specifické vlastnosti návrhu

5.4.1 Návrh antény



Obr. 39 Layout antény

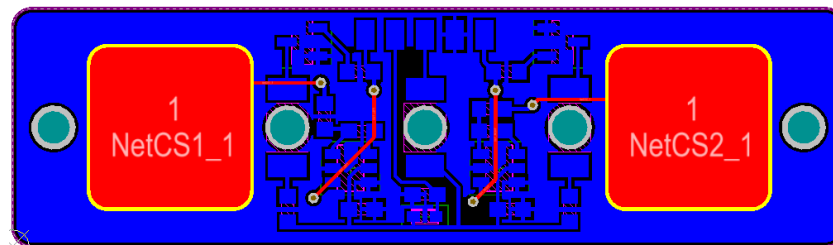
K použité čipové anténě A_1 je od výrobce poskytnut doporučený motiv plošného spoje [36], který vymezuje pozici antény na okraj DPS, určuje odstup vodivého motivu ve všech vrstvách a definuje impedanci cesty od zdroje signálu jako 50Ω . Pozice pro indukčnosti L_4 , L_5 a L_6 jsou připraveny pro osazení π -článku nebo Γ -článku, který slouží jako impedanční přizpůsobení. Pásmová propust U_4 je také uzpůsobena na 50Ω a její layout zdůrazňuje především použití prokůvů do zemní vrstvy v bezprostřední blízkosti vývodů [37]. Výpočet tloušťky signálové cesty byl proveden v Altium Designeru, přičemž získané výsledky ($174 \mu\text{m}$ pro impedanci 50Ω se skladbou vrstev uvedenou v kapitole 5.3) by měly s drobnými odchylkami odpovídat realitě. Hlavní nejistota se skrývá v definici relativní permitivity ϵ_r materiálu Isola IS400 ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz až 2,5 GHz. Změna ϵ_r z 4,1 na hodnotu 3,9 odpovídá při dané tloušťce cesty impedanci 51Ω a změna na 4,3 odpovídá impedanci 49Ω . Poměr stojatých vln by tedy měl být (i se zahrnutím nejistoty hodnoty permitivity) blízký jedničce, což znamená optimální přenos výkonu.

5.4.2 Kapacitní tlačítka

Kapacitu C_X zobrazenou na Obr. 34 je možno chápat v podobě deskového kondenzátoru tvořeného snímací elektrodou na horní vrstvě (červená oblast na Obr. 40) a spodní vrstvou opatřenou polygonem s potenciálem země. Pro zachování detekčních schopností zařízení nesmí být v okolí snímací elektrody rozlit potenciál země a je vhodné vyvarovat se i blízkých signálních vodičů s odlišným potenciálem. Dále platí vztah:

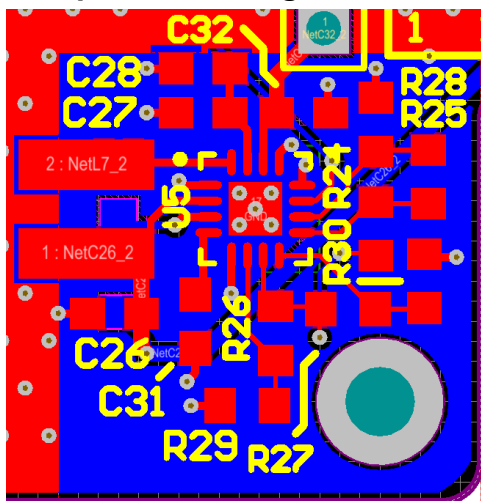
$$C_X = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} [\text{F}] \quad (5.1)$$

Z uvedeného vztahu plyne, že kapacita C_X je závislá na ploše snímací elektrody S , vzdálenosti mezi snímací elektrodou a polygonem s potenciálem země d , relativní permitivitě jádra plošného spoje ϵ_r , a permitivitě vakua ϵ_0 . Při volbě základního materiálu (FR-4) zůstává rázem jedinou volitelnou proměnnou velikost plochy snímací elektrody S , kterou lze ovlivňovat citlivost zařízení. Příliš malá plocha by mohla vést k chybnému vyhodnocování přítomnosti prstu, nicméně plocha znatelně větší, než je samotný prst, nevede k dalšímu zvýšení citlivosti a zbytečně zvětšuje rozměry a cenu zařízení.



Obr. 40 Layout DPS s kapacitními tlačítky

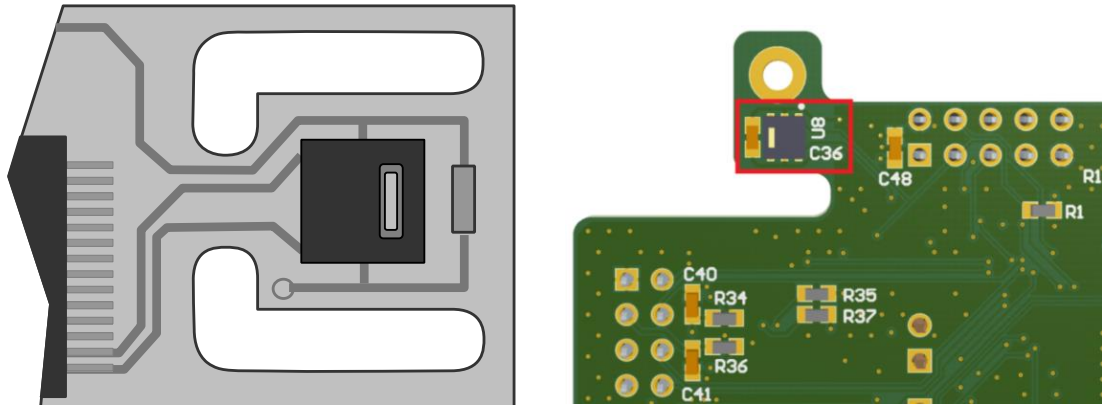
5.4.3 Odporová síť obvodu pro sběr energie



Obr. 41 Layout systému pro sběr energie

Vzhledem k velmi vysokým hodnotám odporů (až $6,04 \text{ M}\Omega$) v odporové síti nastavující napěťové úrovně pro hlídání stavu baterie je nutné omezit velikost plazivých proudů. Toho lze částečně dosáhnout omezením polygonu se zemním potenciálem v horní vrstvě DPS. Použitý layout dále respektuje zásady z hlediska umístění součástek a EMC kompatibility shrnuté v kapitole 4.8.4.

5.4.4 Senzor teploty a relativní vlhkosti



Obr. 42 Doporučený layout senzoru SHT21 (vlevo), navržený layout (vpravo) [41]

Zásady pro návrh správného motivu DPS zohledňuje Obr. 42. Pro minimalizaci přestupu tepla je vhodné provést vnitřní frézování a omezit rozlití polygonů či napájecích vrstev s libovolným potenciálem v blízkosti senzoru. Z důvodu omezení technologických možností při výrobě DPS (nízkonákladová prototypová výroba) byl senzor SHT21 umístěn na okraj desky. Přestup tepla nevodivými vrstvami je omezen speciálním tvarem vnějšího obrysového frézování a přestup tepla vodivými vrstvami je omezen absencí rozlité mědi pod senzorem a v jeho těsné blízkosti.

5.4.5 Chlazení integrovaných obvodů

Mikrokontrolér CC3200 a IO pro sběr energie BQ25504 mají z důvodu možných velkých tepelných ztrát zvýšené nároky na chlazení. V místech, kde se nacházejí zmíněné integrované obvody je DPS opatřena hustou sítí prokovů spojených se zemním potenciálem ve spodní vrstvě a s interní napájecí vrstvou. Prokovy jsou připájeny na hlavní chladicí plošky QFN pouzder.

5.4.6 Praktická realizace DPS

Výsledná podoba DPS s kapacitními tlačítky, DPS s USB rozhraním a hlavní DPS je na fotografiích zobrazena v příloze W.

6 Mechanická konstrukce

Vzhledem k dostupnosti pokročilých výrobních technologií je v současné době kladen mimořádný důraz na estetické provedení, které často rozhoduje o komerčním úspěchu či neúspěchu produktu. Pozitivní vizuální dojem a zaujetí uživatele by ovšem mělo být doplněno propracovanou ergonomií umožňující pohodlné ovládání, manipulaci s objektem a hlavně přirozené mapování ovládacích prvků na jednotlivé funkce zařízení [68].

6.1 Použitý materiál a technologie výroby

Při iteračním procesu vývoje zařízení bylo nejdříve nutno vymezit klíčové funkce, od kterých se odvíjí umístění jednotlivých komponent a potřebný tvar krabičky. Komponenty, které musely být umístěny, jsou následující: hlavní elektronická deska, elektronická deska s kapacitními tlačítky, elektronická deska s USB konektorem, přepínač odpojující akumulátor od systému, solární panel, displej, akumulátor, a rovněž bylo nutno zohlednit potřebný prostor pro sensorový modul a dostatečný styk senzorů s okolím (tzn. umístění a tvar perforací). Po vymezení tvaru krabičky a odhadu přibližné velikosti následoval výběr vhodného materiálu pro zpracování. Díky přítomnosti antény pro bezdrátovou komunikaci bylo použití kovu vyloučeno a dřevo (i přes svoji vynikající obrobitelnost) nepřicházelo z estetických důvodů v úvahu. Použitým materiálem se stalo čiré akrylátové sklo (plexisklo) s tloušťkou 3 mm (krycí sklo displeje má tloušťku 2 mm). Plexisklo se nechá velmi přesně řezat a gravírovat laserem a v omezené míře i formovat ohybem. Proces laserového řezání je zde použit pro výrobu konstrukčních otvorů i perforací pro chlazení a výměnu vzduchu. Gravírováním je zhotoveno logo univerzity a ohraničení pole detekce kapacitních tlačítek. Návrh mechanické konstrukce byl vytvořen v nástrojích Altium Designer a SolidWorks [69].

6.2 Ergonomie designu

Solární panel umístěný na vrchní straně krabičky by měl být schopen zachytávat sluneční energii při vhodném umístění zařízení v prostoru (u okna). Displej zobrazující informace o průběhu měřených veličin je umístěn na čelní straně a jeho jas je řízen na základě informací ze senzoru intenzity okolního osvětlení. Tím je zabezpečen uživatelský komfort, kdy (například při obsluze ve špatně osvětlených prostorách) nedochází k oslnění uživatele. Kapacitní tlačítka, nacházející se pod displejem, jsou mapována na funkce, jejichž stručný popis je vždy uveden v pravém či levém spodním rohu displeje. Vhodnou funkcí je potvrzení stisku jednotlivých tlačítek zablikáním odpovídající LED diodou, která uživateli poskytuje zpětnou vazbu o tom, zda byl stisk detekován. Diagnostická víceúčelová LED dioda, umístěná uprostřed elektronické desky s kapacitními tlačítky, je použita pro signalizaci chybových

stavů a událostí. Na boční stěně je upevněna DPS s USB konektorem, kde i trvale zapojený napájecí kabel nepůsobí žádné omezení při ovládání či provozu zařízení. Přepínač pro odpojení akumulátoru od systému je připevněn na spodní straně, jelikož se nepředpokládá jeho časté používání (jen při dlouhodobé odstávce zařízení, jeho převozu či demontáži).

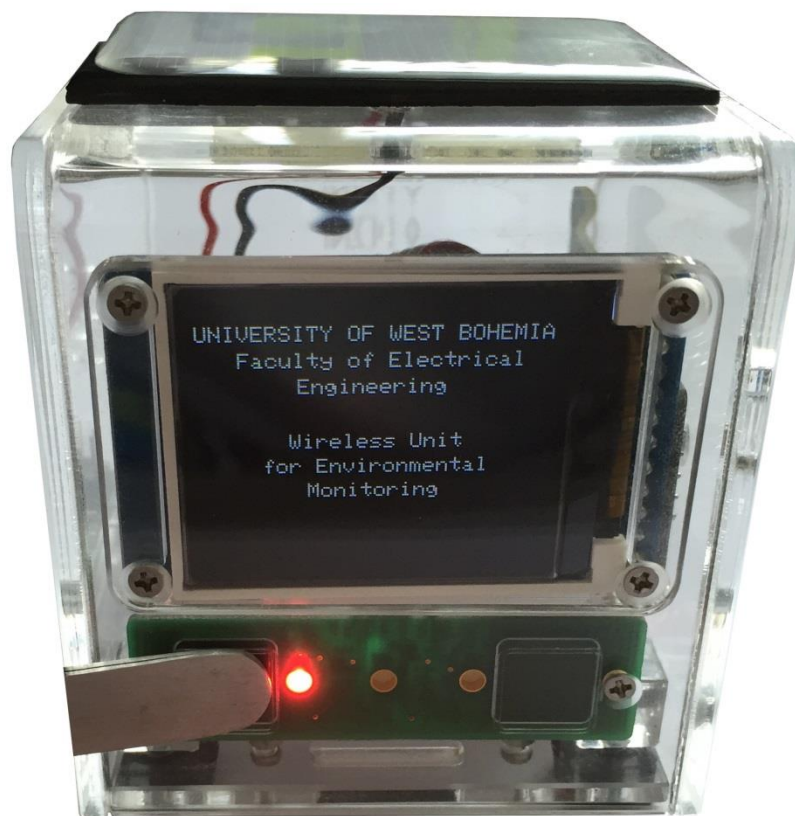
Speciální pozornost byla věnována snadné rozebiratelnosti při výměně sensorového modulu, přičemž výsledkem je možnost rozdělení zařízení do dvou částí po vyšroubování čtyř šroubů. Spodní část je tvořena dnem krabičky, na kterém je přišroubována hlavní DPS a připevněn akumulátor. Zbylé konstrukční i elektronické prvky tvoří horní část. Rozhraní mezi oběma díly je nepohyblivé a je realizováno dvouřadým konektorem, který se nachází na USB elektronické desce (na tuto desku je přiveden displej, solární panel i kapacitní tlačítka). Při rozebírání/skládání zařízení tedy není nutno jakkoli manipulovat s kabely – stačí jen vysunout/zasunout pevně umístěný konektor.

6.3 Praktické provedení



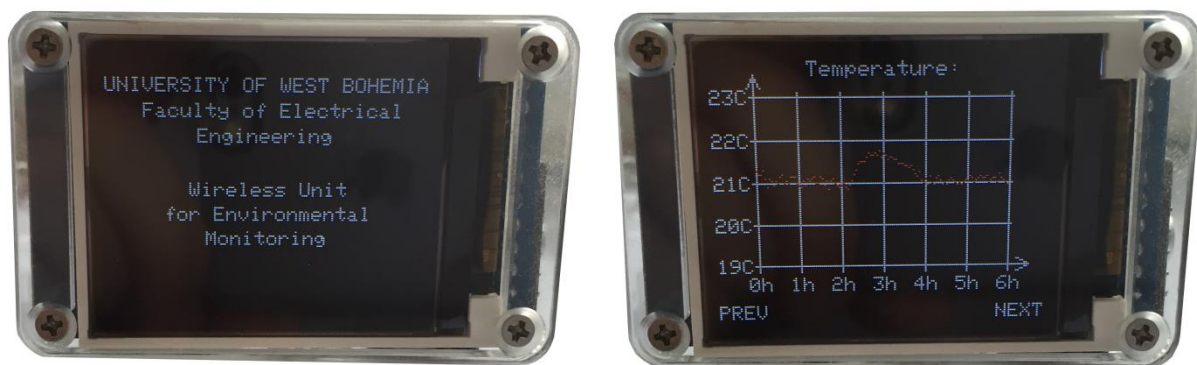
Obr. 43 Výsledná podoba zařízení

6.4 Uživatelské rozhraní



Obr. 44 Aktivní displej a detekce stisku kapacitního tlačítka

Indikace stisku kapacitního tlačítka a aktivita LCD displeje jsou zobrazeny na Obr. 44.



Obr. 45 Výběr obrazovek displeje: úvodní obrazovka (vlevo), záznam měření teploty (vpravo)

Výběr dvou obrazovek displeje je uveden na Obr. 45. Vlevo je zobrazena úvodní obrazovka objevující se po zapnutí bezdrátové jednotky. Vpravo se pak nachází vývoj teploty v čase a navigační text určující funkci kapacitních tlačítek. Obrazovky s jednotlivými veličinami jsou uspořádány do kruhu. Volba PREV (předchozí) znamená přechod vlevo, volba NEXT (následující) pak přechod vpravo.

7 Výběr komunikačního protokolu

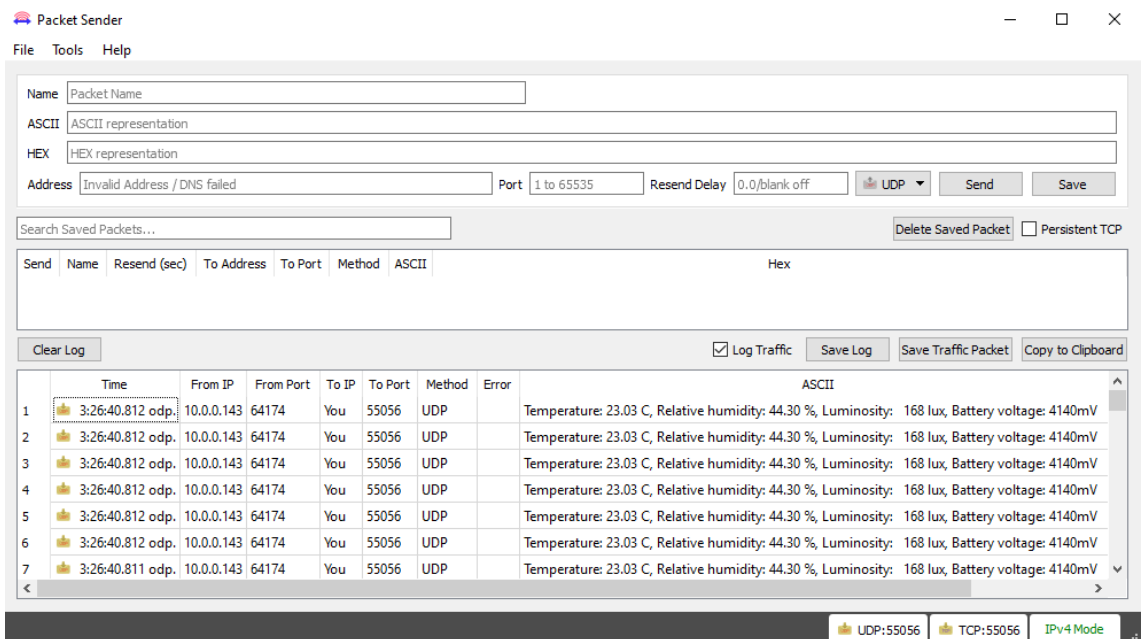
7.1 Drátová komunikace

Pro drátový přenos s využitím rozhraní UART byl zvolen formát dat v následujícím složení: start bit, 8 datových bitů, stop bit. Komunikační rychlost je stanovena jako 57,6 kBd, respektive 57,6 kbit/s.

7.2 Bezdrátová komunikace

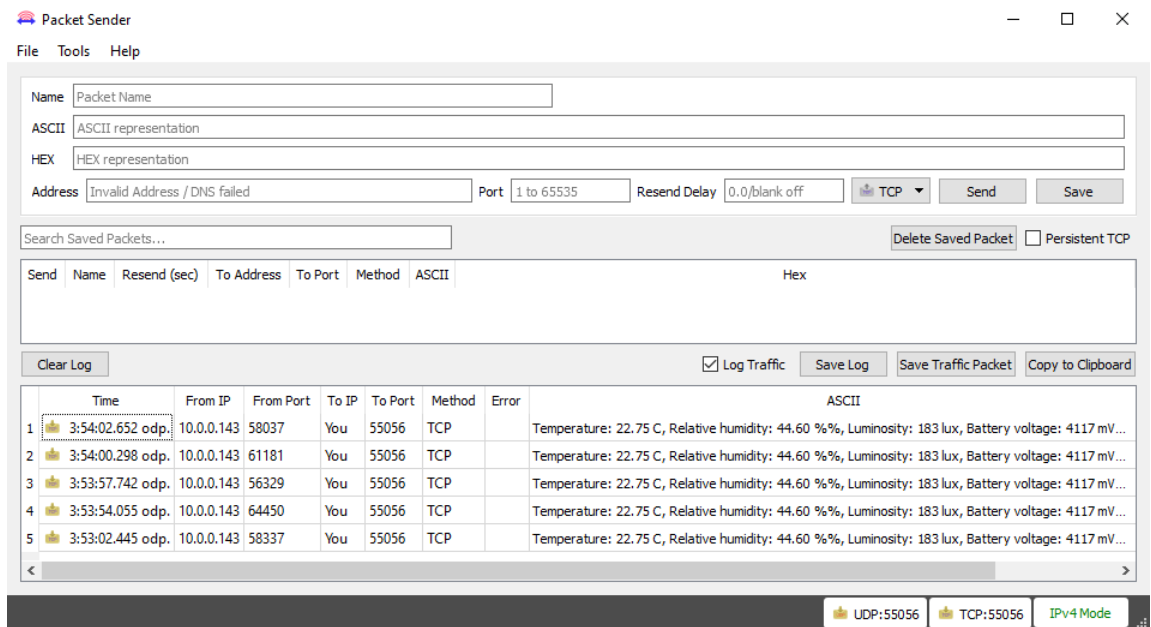
S odkazem na strukturu referenčního modelu ISO/OSI (Mezinárodní organizace pro standardizaci/Propojení otevřených systémů) je na síťové vrstvě použit IP protokol poskytující datagramové služby [70], [71]. Transportní vrstvu je možno pokrýt buď protokolem TCP nebo UDP (User Datagram Protocol) [72], [73].

Vzhledem k tomu, že UDP protokol nezaručuje doručení datagramu do požadovaného cíle (případně nevyklučuje jeho vícenásobné doručení), je vhodný do aplikací, kde částečná ztráta dat výrazně neovlivní probíhající činnost. Mezi tyto aplikace patří například online hry a VoIP (Voice over Internet Protocol) telefonie. Jeho výhodou je jednodušší implementace, navázání spojení a následně i menší rozsah hlavičky nutný pro přenos datagramu. V případě trvale dostupné cesty mezi bezdrátovou jednotkou a cílovou stanicí je použití UDP protokolu (s občasnými výpadky dat, která lze nahradit aproximací vzhledem k rychlosti změny mikroklimatu) možné, ale jeho spolehlivost je diskutabilní. Přesto byl protokol implementován a úspěšné přijetí paketů zobrazuje Obr. 46.



Obr. 46 Výpis přijatých UDP paketů [74]

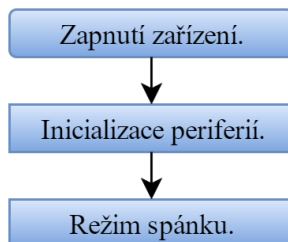
TCP protokol je v síti internet nejpoužívanějším protokolem v transportní vrstvě. Jednotlivé uzly sítě (respektive běžící aplikace) mohou použitím TCP vytvořit spojení pro obousměrný přenos dat. Protokol zabezpečuje doručení všech paketů ve správném pořadí a nedochází zde (na rozdíl od UDP) ke ztrátě dat. TCP také dokáže adresovat data konkrétním aplikacím provozovaným na jednom uzlu. TCP byl po implementaci zvolen jako hlavní protokol pro transportní vrstvu. Přijetí naměřených dat je zobrazeno na Obr. 47.



Obr. 47 Výpis přijatých TCP paketů [74]

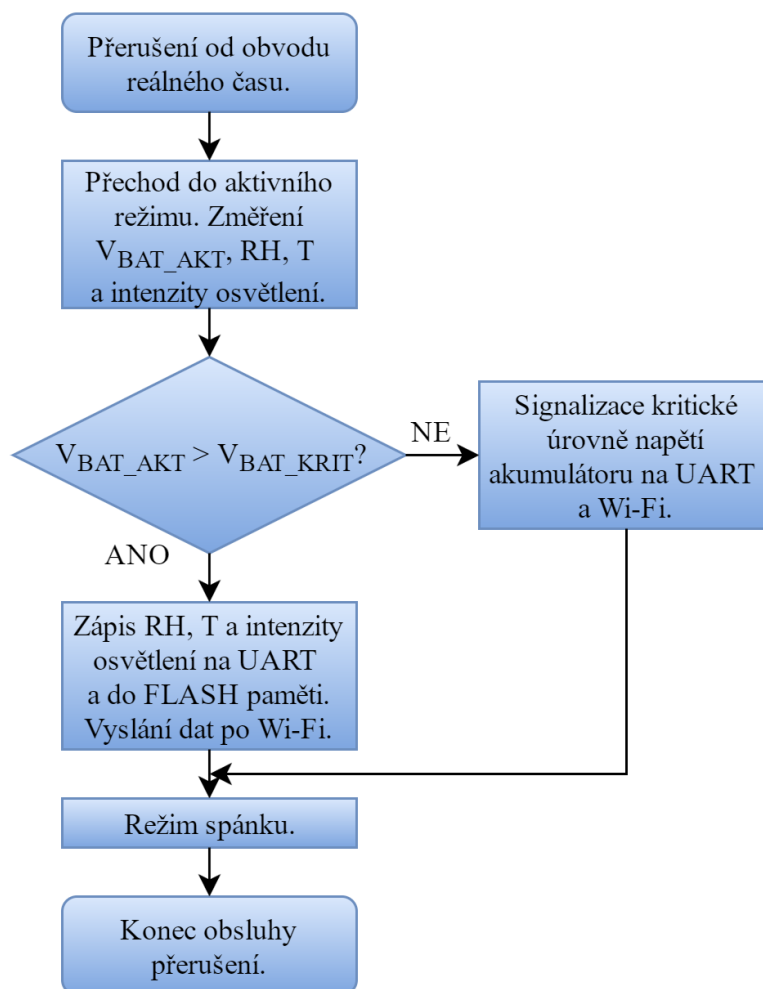
8 Firmware a vývojový diagram

Firmware vytvořený v CCS je koncipován jako projekt s moduly na obsluhu jednotlivých periférií a funkcí. Tato struktura, ve formě separátních hlavičkových a zdrojových souborů, vede k usnadnění orientace v projektu.



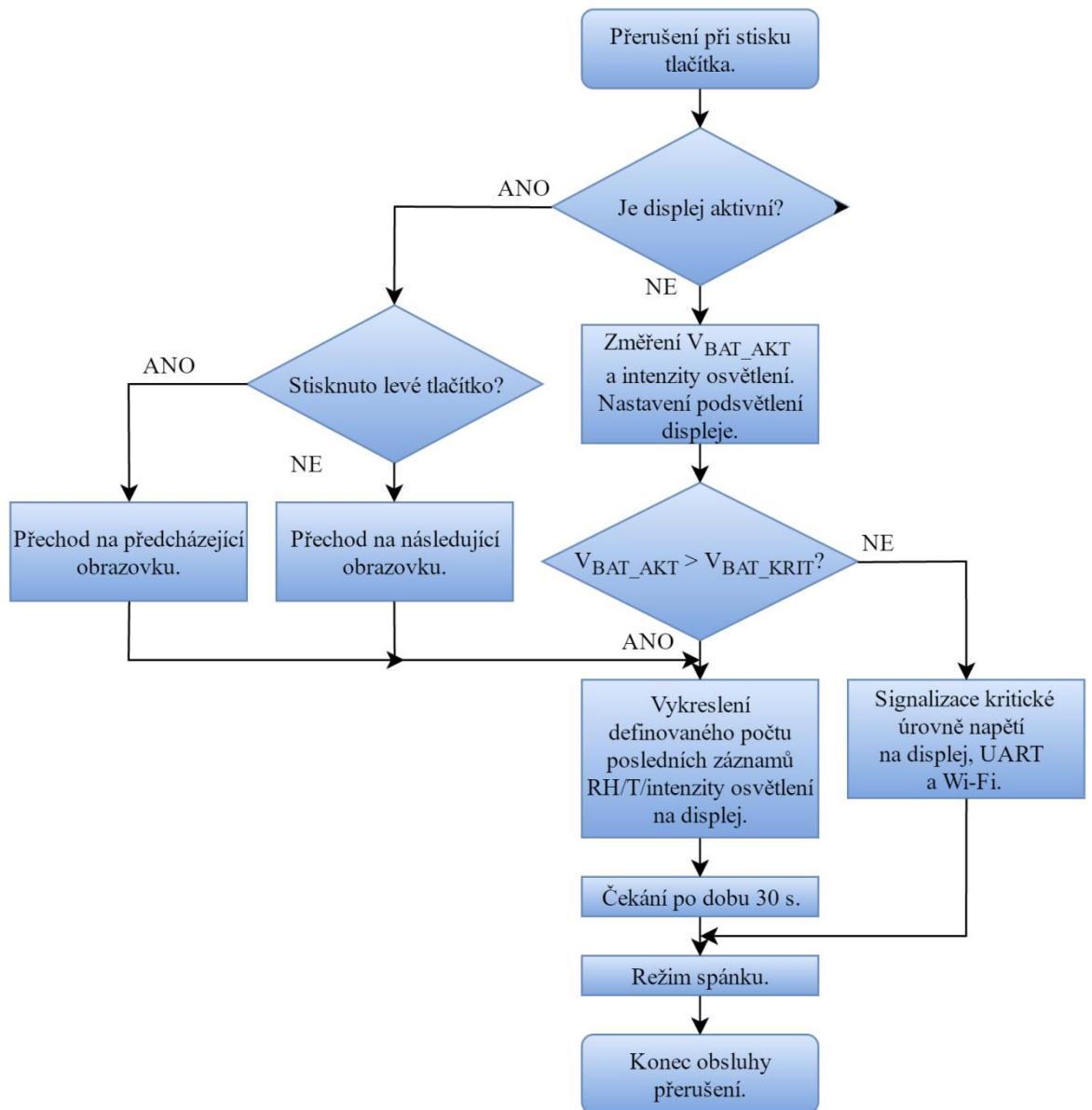
Obr. 48 Vývojový diagram hlavní větve programu

Dle Obr. 48 dochází po zapnutí napájení k inicializaci jednotlivých periférií a následně zařízení přejde do režimu spánku, ve kterém setrvává do doby, kdy je detekováno přerušení z obvodu reálného času nebo z kapacitních tlačítek.



Obr. 49 Vývojový diagram obsluhy přerušení od obvodu reálného času

Obr. 49 popisuje rutinu pro obsluhu přerušení od zdroje reálného času. Po uplynutí definovaného časového intervalu dojde k probuzení mikroprocesoru z režimu spánku a přechodu do aktivního režimu. Následně A/D převodník změří napětí na akumulátoru, relativní vlhkost, teplotu a intenzitu osvětlení. Změřená úroveň napětí na akumulátoru je porovnána s prahovou úrovní a v případě, že je aktuální hodnota nižší, dojde k signalizaci stavu na rozhraní UART a rovněž k vyslání informace do WLAN sítě. Při dostatečné úrovni napětí akumulátoru je proveden zápis změřených hodnot na UART, do externí FLASH paměti a k vyslání dat bezdrátovou komunikací. Mikrokontrolér přechází do režimu spánku.



Obr. 50 Vývojový diagram pro obsluhu přerušení při detekci stisku tlačítka

Obr. 50 zobrazuje obslužnou rutinu při detekci přerušení, které je vyvoláno stiskem jednoho z kapacitních tlačítek. První podmínkou je zjištění, zda je LCD displej už rozsvícený či ne. V závislosti na výsledku může jít při stisku tlačítka buď o probuzení zařízení z režimu spánku, nebo o posun mezi obrazovkami. V případě probuzení zařízení dojde ke změření napětí akumulátoru a intenzity osvětlení. Na základě těchto dvou údajů je regulován jas displeje a případně reportován nízký stav energie pro napájení systému. Jedná-li se při stisku tlačítka o přesun mezi obrazovkami nebo je-li zařízení právě probuzeno a energie v systému je dostatečná, přichází na řadu vykreslení definovaného počtu posledních hodnot jedné z měřených veličin. Následuje třicetisekundový interval, po jehož uplynutí dojde k přechodu zařízení do režimu spánku a ukončení obsluhy servisní rutiny.

9 Měření a provozní testy

Mezi funkce, které bylo třeba ověřit, patří: měření teploty, relativní vlhkosti, intenzity osvětlení a napětí akumulátoru; příjem dat na rozhraní UART a přes Wi-Fi, zobrazovací funkce displeje, ovládání, nabíjení akumulátoru z USB a systému pro sběr energie.

9.1 Senzor teploty a relativní vlhkosti

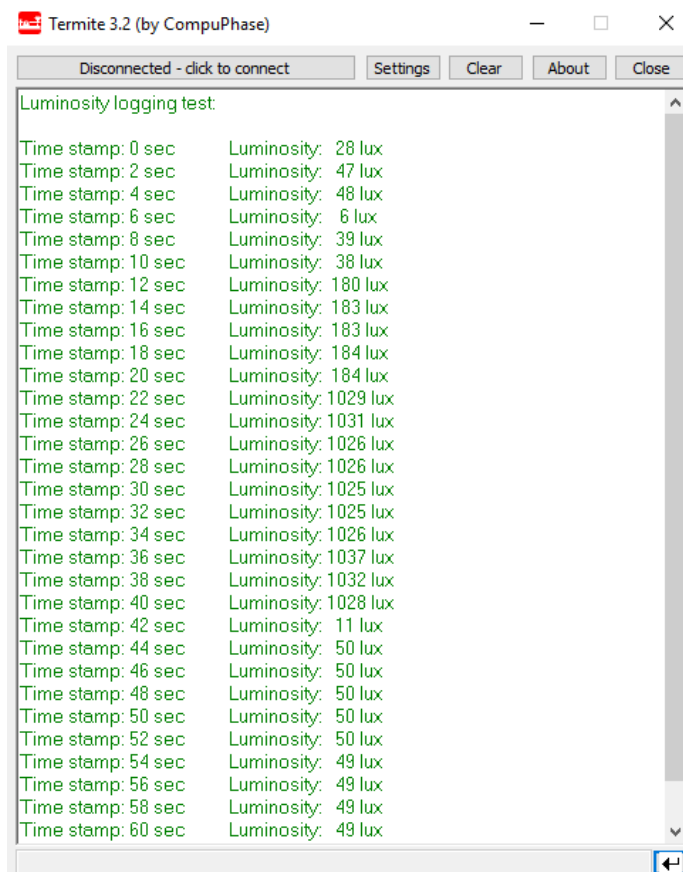
Funkce kombinovaného senzoru pro měření teploty a relativní vlhkosti byla ověřena vystavením senzoru proudu horkého vzduchu z plynové páječky. V průběhu 60 vteřin byl sledován vzestupný trend u teploty, který reflektuje přibližování a oddalování hořáku. Relativní vlhkost je za těchto podmínek neměřitelná.

Temperature and relative humidity logging test:		
Time stamp: 0 sec	Temperature: 26.75 °C	Relative humidity: 27.05 %
Time stamp: 2 sec	Temperature: 26.66 °C	Relative humidity: 27.24 %
Time stamp: 4 sec	Temperature: 27.35 °C	Relative humidity: 33.64 %
Time stamp: 6 sec	Temperature: 28.12 °C	Relative humidity: 40.47 %
Time stamp: 8 sec	Temperature: 29.16 °C	Relative humidity: 44.60 %
Time stamp: 10 sec	Temperature: 30.45 °C	Relative humidity: 44.47 %
Time stamp: 12 sec	Temperature: 31.57 °C	Relative humidity: 41.62 %
Time stamp: 14 sec	Temperature: 32.69 °C	Relative humidity: 37.48 %
Time stamp: 16 sec	Temperature: 33.46 °C	Relative humidity: 32.17 %
Time stamp: 18 sec	Temperature: 33.89 °C	Relative humidity: 26.21 %
Time stamp: 20 sec	Temperature: 34.50 °C	Relative humidity: 25.44 %
Time stamp: 22 sec	Temperature: 36.64 °C	Relative humidity: 27.70 %
Time stamp: 24 sec	Temperature: 38.46 °C	Relative humidity: 26.84 %
Time stamp: 26 sec	Temperature: 39.93 °C	Relative humidity: 23.41 %
Time stamp: 28 sec	Temperature: 41.90 °C	Relative humidity: 20.71 %
Time stamp: 30 sec	Temperature: 41.98 °C	Relative humidity: 9.83 %
Time stamp: 32 sec	Temperature: 41.39 °C	Relative humidity: 2.49 %
Time stamp: 34 sec	Temperature: 40.70 °C	Relative humidity: 0.50 %
Time stamp: 36 sec	Temperature: 39.93 °C	Relative humidity: -0.45 %
Time stamp: 38 sec	Temperature: 39.14 °C	Relative humidity: -0.66 %
Time stamp: 40 sec	Temperature: 38.37 °C	Relative humidity: 0.07 %
Time stamp: 42 sec	Temperature: 37.69 °C	Relative humidity: 0.83 %
Time stamp: 44 sec	Temperature: 37.00 °C	Relative humidity: 2.11 %
Time stamp: 46 sec	Temperature: 36.30 °C	Relative humidity: 3.55 %
Time stamp: 48 sec	Temperature: 35.79 °C	Relative humidity: 4.47 %
Time stamp: 50 sec	Temperature: 35.27 °C	Relative humidity: 5.51 %
Time stamp: 52 sec	Temperature: 34.84 °C	Relative humidity: 6.38 %
Time stamp: 54 sec	Temperature: 34.41 °C	Relative humidity: 7.24 %
Time stamp: 56 sec	Temperature: 33.97 °C	Relative humidity: 8.15 %
Time stamp: 58 sec	Temperature: 33.63 °C	Relative humidity: 9.06 %
Time stamp: 60 sec	Temperature: 33.29 °C	Relative humidity: 10.04 %

Obr. 51 Ověření funkce kombinovaného senzoru pro měření teploty a RH [75]

V relativně stálém okolním prostředí byla po dobu 30 minut sledována měřená teplota a porovnávána se stupnicí kapalinového lihového teploměru a teplotním údajem meteostanice s deklarovanou přesností měření ± 1 °C. Z dat zobrazených v příloze X plyne, že střední hodnota teploty byla v tomto intervalu 22,84 °C. Kapalinový teploměr udával teplotu přibližně 22,75 °C a meteostanice 22 °C. Měření relativní vlhkosti nebylo podrobeno porovnání s údaji jiného měřiče RH, nicméně při vystavení zařízení do blízkosti vroucí vody byla detekována značná změna v měřených údajích.

9.2 Senzor intenzity osvětlení



Obr. 52 Ověření funkce senzoru intenzity osvětlení [75]

Záznam hodnot intenzity osvětlení při ověřování funkčnosti senzoru zobrazuje

Obr. 52. Změna intenzity respektuje stav osvětlení prostředí měnící se ve fázích:

- denní světlo
- osvit bezdrátové jednotky světelným zdrojem (výkon 30 W, vzdálenost 30 cm) přes list kancelářského papíru
- plné odkrytí světelného zdroje
- vypnutí světelného zdroje

9.3 Drátová a bezdrátová komunikace, uživatelské rozhraní

Schopnost drátové komunikace přes rozhraní UART byla ověřena při výpisu změřených hodnot teploty, relativní vlhkost a intenzity osvětlení. Funkčnost bezdrátové komunikace popisuje kapitola 7.

Zobrazování dat na displeji a reakce na stisk kapacitních tlačítek jsou zdokumentovány v kapitole 6.4.

9.4 Nabíjení a měření napětí akumulátoru

Možnost měření napětí akumulátoru A/D převodníkem byla ověřena společně s nabíjením přes USB rozhraní. Na začátku procedury byl akumulátor od systému odpojen a vybitý proudem 0,5C (tedy 800 mAh) na napětí 3,9 V. Po opětovném připojení akumulátoru do systému byla bezdrátová jednotka připojena k PC a přes USB rozhraní započal proces nabíjení, v jehož průběhu byl A/D převodníkem sledován trend napětí, které se nakonec ustálilo na 4,165 V.

Nabíjení akumulátoru ze systému pro sběr energie bylo zkoumáno opět při jeho částečném vybití (tentokrát na 3,8 V). Jelikož sledovat napěťový přírůstek na svorkách akumulátoru by bylo při využití solárního panelu časově velmi náročné, bylo provedeno pouze měření ověřující, zda systém pro sběr energie dodává do akumulátoru proud. V tomto okamžiku byly také změřeny poměry na solárním panelu. Napětí na vstupu systému pro sběr energie dosahovalo hodnoty 1,03 V, proud pak velikosti 7 mA. Akumulátor byl dobíjen proudem 1,6 mA. Měření probíhalo dne 3. 5. 2016 v pět hodin odpoledne – polojasno, venkovní teplota 17 °C. Bezdrátová jednotka byla umístěna na okenním parapetu s orientací na severozápad.

9.5 Měření spotřeby

9.5.1 Pracovní režimy

Ideálním případem pro vyhodnocování spotřeby je zařízení s identickými pracovními cykly (deterministická spotřeba). V tomto případě lze z časového záznamu proudového odběru za dobu jedné periody integrací získat střední hodnotu proudu podle vzorce:

$$I_{\text{STR}} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \text{ [A]} \quad (10.1)$$

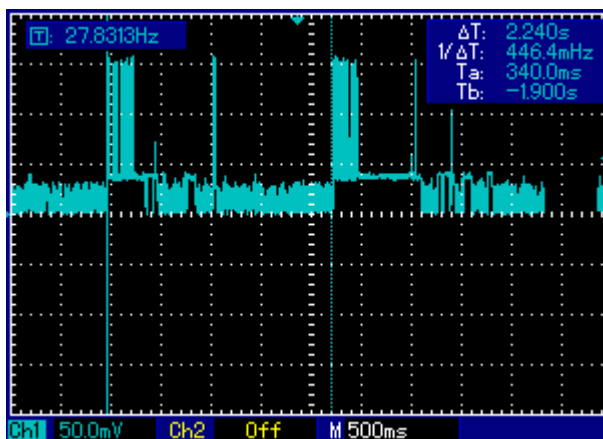
Okamžitá hodnota proudu je zde označena jako $i(t)$ a periodu pracovního cyklu vyjadřuje T . Dále stačí získanou střední hodnotu proudu I_{STR} dosadit do vzorce 10.2 společně s napětím systému V_{SYS} a získat tak průměrnou spotřebu:

$$P_{\text{PRŮM}} = V_{\text{SYS}} I_{\text{STR}} \text{ [W]} \quad (10.2)$$

Alternativou k režimu práce v identických pracovních cyklech je stochastický provoz zařízení. Obvykle účinnou metodou určení průměrné spotřeby je pak dlouhodobé monitorování proudového odběru a následná stejná metodika zpracování naměřených údajů jako při definovaném pracovním cyklu. Přesnost výsledku však silně závisí na reprezentativnosti provozu po dobu měření.

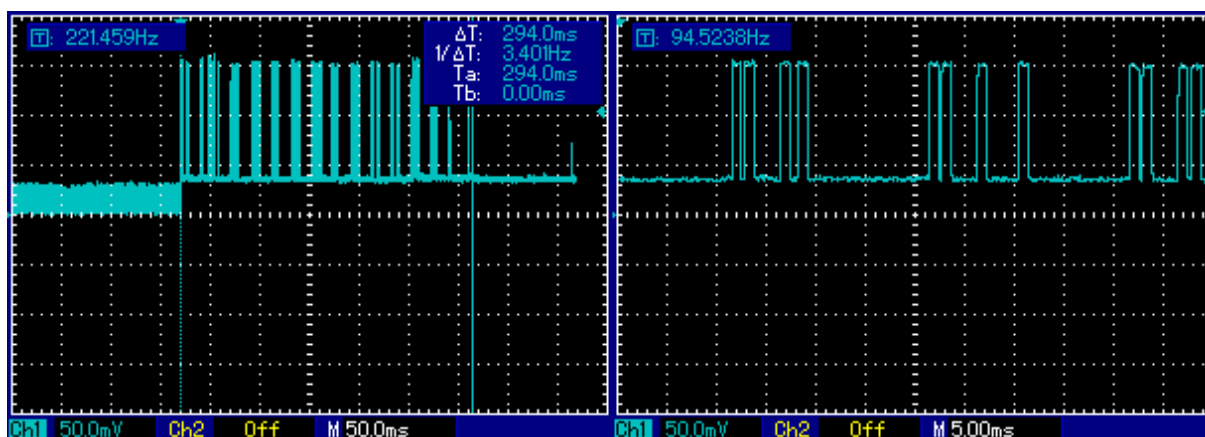
9.5.2 Měření dynamické spotřeby

Při provozu bezdrátové jednotky by v případě absence uživatelského rozhraní bylo možno použít deterministický model, jelikož pracovní cyklus by byl přesně definován ve stylu: vyčkat na pokyn od obvodu reálného času, probudit se, provést měření, odeslat data, přejít do režimu spánku. Průběh pracovního cyklu, který se skládá vždy z navázání spojení s TCP serverem a odeslání jednoho paketu a následného přechodu do režimu spánku, se nachází na *Obr. 53*.



Obr. 53 Průběh pracovního cyklu (režim spánku, vyslání jednoho TCP paketu)

Doba trvání zobrazeného cyklu je přibližně 2,24 s. Záznam vznikl snímáním napěťového úbytku na rezistoru s hodnotou 0,6 Ω , který byl vřazen do cesty proudu tekoucímu z akumulátoru do systému. Špičkový proudový odběr se tedy podle *Obr. 53* pohybuje kolem 260 mA, což odpovídá hodnotám předeslaným v kapitole 4.3.2.



Obr. 54 Detail navázání spojení a odeslání paketu

Detail časového průběhu proudového odběru při navázání spojení s TCP serverem a odeslání paketu zobrazuje *Obr. 54*.

9.5.3 Měření statické spotřeby

Kromě měření dynamické spotřeby, při pracovních cyklech zahrnujících vysílání paketů, byla provedena i řada měření statické spotřeby, kdy mikrokontrolér vykonával konkrétní činnost či se nacházel v jednom ze stavů pro snížení spotřeby. Výsledky těchto měření (prováděných s vřazeným odporem o hodnotě 10 Ω) shrnuje *Tab. 6*.

Tab. 6 Statická spotřeba bezdrátové jednotky v různých režimech mikrokontroléru

Režim	Napětí na měřicím odporu [mV]	Proudový odběr [mA]
Aktivní režim	134	13,4
Režim spánku	104	10,4
Režim hlubokého spánku	73	7,3
Aktivní režim a LCD displej (50 % jas)	215	21,5
Aktivní režim a LCD displej (20 % jas)	174	17,4

Spotřebu v hibernačním režimu bylo třeba měřit s větším vřazeným odporem (hodnota 100 Ω). Napěťový úbytek na odporu dosahoval 18 mV, což odpovídá proudovému odběru 180 μ A.

Spotřeba mikrokontroléru je v aktivním režimu maximální. V režimu spánku jsou hodiny mikroprocesoru odepnuty do doby, kdy je detekováno přerušení. Probuzení je okamžité a proudový odběr je redukován oproti aktivnímu režimu o 3 mA (viz *Tab. 6*). V režimu hlubokého spánku je navíc vypnut i fázový závěs a odběr oproti aktivnímu režimu klesá o 5 mA. Z hlediska minimalizace spotřeby zařízení je nejzajímavější režim hibernace, kdy proudový odběr dosahuje dle referenčního manuálu hodnoty 4 μ A [16]. V tomto režimu je aktivní pouze oscilátor s hodinkovým krystalem pro řízení obvodu reálného času, který je schopen mikroprocesor opět nastartovat. Jelikož při hibernaci není udržován obsah SRAM (kde se obvykle nachází vykonávaný program), dosahuje latence při přechodu do aktivního režimu přibližně 10 ms.

9.5.4 Vyhodnocení

V rámci pětiminutového měřicího/vysílacího cyklu je přibližně 300 ms věnováno na komunikaci s TCP serverem. V tomto intervalu je průměrný proudový odběr 109,5 mA (s uvažovanou střídou maximálního odběru 1:3, viz *Obr. 54*). Na měření připadá 500 ms, kdy proudová spotřeba dosahuje nanejvýš 14 mA. Při předpokládaném využití displeje 5 minut denně připadá na jednu měřicí/vysílací periodu 1,04 s, ve kterých proudový odběr systému dosahuje 21,5 mA (při 50% podsvětlení). Integrací takto zapsaného průběhu proudu lze za dobu jedné periody vypočítat střední hodnotu jako:

$$I_{\text{STŘ}} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt, \text{ kde } T = 300 \text{ s}, i(t) = \begin{cases} 109,5 \text{ mA pro } t \in (0; 0,3) \text{ s} \\ 14 \text{ mA pro } t \in (0,3; 0,8) \text{ s} \\ 180 \text{ } \mu\text{A pro } t \in (0,8; 298,8) \text{ s} \\ 21,5 \text{ mA pro } t \in (298,8; 300) \text{ s} \end{cases} \quad (10.3)$$

Po dosazení a výpočtu:

$$I_{\text{STŘ}} = 386,17 \text{ } \mu\text{A} \quad (10.4)$$

Vypočtený průměrný proudový odběr vychází lépe, než odběr stanovený na základě katalogových listů v kapitole 4.7.7, kde byla výsledná hodnota 429,72 μA . V naměřených hodnotách není zohledněna aktivita LED diod, kapacitních tlačítek při detekci a také čtení z externí FLASH paměti. Při uvažování těchto faktů se reálná a teoreticky odhadnutá hodnota proudového odběru velmi dobře shodují. Pro průměrný proudový odběr 386,17 μA se výdrž zařízení (při možném vyčerpání kapacity akumulátoru 1 600 mAh) pohybuje kolem 172 dnů. Se zahrnutím výsledků systému pro sběr energie (viz kapitola 9.4), který v pozdních odpoledních hodinách dobíjel akumulátor proudem 1,6 mA, lze považovat zařízení za energeticky soběstačné.

Závěr

První část práce se zabývá vymezením pozice bezdrátové vyhodnocovací jednotky v kontextu trhu. Výběr vhodného řídicího a komunikačního čipu je následován několika kapitolami popisujícími senzory vybrané k implementaci na hlavní desce, rozhraní pro externí sensorové moduly a stručný přehled dalších senzorů vhodných pro monitorování parametrů okolního prostředí. Převážná část práce se zabývá podrobným návrhem a realizací elektronické části zařízení. Mimořádná péče byla věnována problematice návrhu plošných spojů a elektromagnetické kompatibility. Z autorovy iniciativy byl doplněn požadavek na prodlouženou životnost, respektive energetickou soběstačnost, což vedlo k dovybavení zařízení o systém pro sběr solární energie. Návrh obvodů je podložen výpočty a odhady spotřeby. Pro dosažení uživatelského komfortu a reprezentativního vzhledu se práce zabývá i estetikou, ergonomií a kompletním návrhem mechanické konstrukce. Zvolená komunikační technologie je doplněna příkladem implementace obvykle používaných protokolů. Funkčnost a spotřeba zařízení jsou zhodnoceny na základě provedených měření a provozních testů.

Výsledkem snažení je hybridní zařízení kombinující některé z vlastností ověřovacích měřičů parametrů okolního prostředí, monitorovací domácí jednotky spadající do komplexní sítě internetu věcí a laboratorního přístroje. Bezdrátová jednotka dokáže ve své základní konfiguraci měřit okolní teplotu, relativní vlhkost a intenzitu osvětlení. Naměřená data může prostřednictvím USB rozhraní poslat do PC nebo s využitím technologie Wi-Fi předat do lokální sítě TCP/UDP serveru. Univerzální rozhraní pro externí sensorové moduly zajišťuje rozšiřitelnost o možnost měření dalších veličin. Provedená měření spotřeby naznačují, že by zařízení mělo být energeticky soběstačné, nicméně toto tvrzení by bylo vhodné podložit dalšími měřeními většího rozsahu. Při testování jednotky nebyly zjištěny žádné chyby v HW konfiguraci ani kolize v mechanické konstrukci.

Z čistě funkčního hlediska tedy zařízení obstálo, nicméně jeho stavba je velmi nákladná (elektronika odhadem 3 000 Kč, mechanická konstrukce 6 000 Kč) a při úvahách o nasazení na trh by bylo velmi vhodné provést cenovou optimalizaci. Při tomto procesu by mohl být zohledněn koncept levného řídicího mikrokontroléru a dedikovaného čipu pro bezdrátovou komunikaci, jelikož cena použitého mikrokontroléru se i při odběru 1000 ks pohybuje kolem 10 USD. Náhrada displeje za některou z levnějších variant by také mohla znamenat značnou úsporu. Použitý LCD stojí orientačně kolem 25 USD. Zbylé elektronické součástky nepatří k nákladným a cenu elektroniky ovlivnila hlavně výroba prototypových desek plošných spojů. Zvolená realizace mechanické konstrukce je vhodná pro výrobu prototypu, ale při sériové výrobě by bylo vhodnější provedení ve formě vstřikovaného plastu.

Programové vybavení zařízení plně zprostředkovává základní funkce, nicméně pro komerční úspěch produktu je vhodné uvažovat o vývoji webového rozhraní, či aplikace pro PC nebo chytré telefony. S vývojem obslužného software a vylepšení firmware zařízení je možné ještě značně pokročit a dostat tak bezdrátovou jednotku do podoby zajímavé pro trh.

Použitá literatura

- [1] Internet of Things. *Wikipedia*. [cit. 19.10.2015]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_Things
- [2] The Weather Station for Smartphone. *Netatmo*. [cit. 19.10.2015]. Dostupné z: <https://www.netatmo.com/product>
- [3] Technical Data Sheet. *KIMO instruments*. [cit. 21.10.2015]. Dostupné z: <http://www.trinstruments.cz/data/files/hq-210-1754.pdf>
- [4] Přístroj pro měření parametrů okolního prostředí KIMO HQ210. *TR Instruments spol. s.r.o.* [cit. 21.10.2015]. Dostupné z: <http://www.trinstruments.cz/pristroj-pro-mereni-parametru-okolního-prostredi-kimo-hq210>
- [5] Hygro-Thermo-Anemometer-Light-Sound Meter. *EXTECH instruments*. [cit. 21.10.2015]. Dostupné z: <http://www.mericitechnika.cz/data/files/en300-993.pdf>
- [6] Měřič parametrů prostředí EXTECH EN300. *TR Instruments spol. s.r.o.* [cit. 21.10.2015]. Dostupné z: <http://www.mericitechnika.cz/en300>
- [7] Netatmo Weather Station. *Specifications*. [cit. 21.10.2015]. Dostupné z: https://www.netatmo.com/en-US/product/weather-station/specifications#/specs_view_0
- [8] Netatmo Wind Gauge. *Shop Netatmo*. [cit. 21.10.2015]. Dostupné z: https://shop.netatmo.com/eur_en/wind-gauge-for-netatmo-weather-station.html
- [9] Sortiment v kategorii Domácnost. *CZC.CZ*. [cit. 21.10.2015]. Dostupné z: https://www.czc.cz/domacnost_2/produkty
- [10] Comparison of wireless data standards. *Wikipedia*. [cit. 3.11.2015]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_wireless_data_standards
- [11] Smíšená topologie. *Wikipedia*. [cit. 3.11.2015]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sm%C3%AD%C5%A1en%C3%A1_topologie
- [12] Wi-Fi. *Wikipedia*. [cit. 3.11.2015]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>
- [13] MCU with built in WiFi. *Wikipedia*. [cit. 3.11.2015]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/MCU_with_built_in_WiFi
- [14] ESP8266EX. *Espressif*. [cit. 3.11.2015]. Dostupné z: <http://espressif.com/en/products/hardware/esp8266ex/overview>
- [15] ESP32. *Espressif*. [cit. 3.11.2015]. Dostupné z: <http://espressif.com/en/products/hardware/esp32/overview>
- [16] CC3200. *Texas Instruments*. [cit. 3.11.2015]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/CC3200>
- [17] NL6621. *Nufront*. [cit. 3.11.2015]. Dostupné z: <http://www.nufrontsoft.com/index.php/project/index/id/30.html>

- [18] MT7681. *MediaTek Labs*. [cit. 3.11.2015]. Dostupné z: http://labs.mediatek.com/site/global/developer_tools/mediatek_7681/whatis_7681/index.gsp
- [19] Electret Microphone Amplifier - MAX4466 with Adjustable Gain. *Adafruit*. [cit. 9.11.2015]. Dostupné z: <https://www.adafruit.com/products/1063>
- [20] CMA-4544PF-W datasheet. *Adafruit*. [cit. 9.11.2015]. Dostupné z: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/CMA-4544PF-W.pdf>
- [21] MAX4465 datasheet. *Adafruit*. [cit. 9.11.2015]. Dostupné z: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MAX4465-MAX4469.pdf>
- [22] Hluk. *Wikipedia*. [cit. 9.11.2015]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hluk>
- [23] MPL3115A2. *NXP*. [cit. 9.11.2015]. Dostupné z: http://cache.nxp.com/files/graphic/product_freescalar/P22755_MPL3115A2_PROD_.jpg
- [24] MPL3115A2 datasheet. *NXP*. [cit. 9.11.2015]. Dostupné z: http://www.nxp.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPL3115A2.pdf
- [25] SprintIR Fast 20-100% CO2 Sensor. *CO2meter.com*. [cit. 12.11.2015]. Dostupné z: <http://www.co2meter.com/products/sprintir-100-percent-co2-sensor>
- [26] SprintIR Wide Range CO2 Sensor datasheet. *CO2meter.com*. [cit. 12.11.2015]. Dostupné z: <http://www.co2meters.com/Documentation/Datasheets/SprintIR-Wide-Range-Datasheet.pdf>
- [27] FT prog. *FTDI Chip*. [cit. 20.12.2015]. Dostupné z: http://www.ftdichip.com/Support/Utilities.htm#FT_PROG
- [28] SimpleLink Wi-Fi CC3200 LaunchPad. *Texas Instruments*. [cit. 20.12.2015]. Dostupné z: <http://www.ti.com/tool/cc3200-launchxl>
- [29] Code Composer Studio (CCS) Integrated Development Environment (IDE). *Texas Instruments*. [cit. 20.12.2015]. Dostupné z: <http://www.ti.com/tool/ccstudio>
- [30] Pin Mux Tool. *Texas Instruments*. [cit. 20.12.2015]. Dostupné z: <http://www.ti.com/tool/PINMUXTOOL>
- [31] Uniflash Standalone Flash Tool for TI Microcontrollers (MCU), Sitara Processors & SimpleLink devices. *Texas Instruments*. [cit. 20.12.2015]. Dostupné z: <http://www.ti.com/tool/uniflash>
- [32] SKOČIL, Vlastimil, MACH, Pavel, URBÁNEK, Jan. *Montáž v elektronice. 1. vyd.* Praha: ČVUT, 2001. 440 s. ISBN 80-01-02392-3.
- [33] SN74LVC1T45 datasheet. *Texas Instruments*. [cit. 15.1.2016]. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/405/sn74lvc1t45-556134.pdf>
- [34] 2450AT43B100E ANTENNA, BLUETOOTH, 2.4GHZ. *Farnell*. [cit. 18.1.2016]. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/johanson-technology/2450bp15e0100e/filter-bandpass-2-4ghz/dp/2148528>

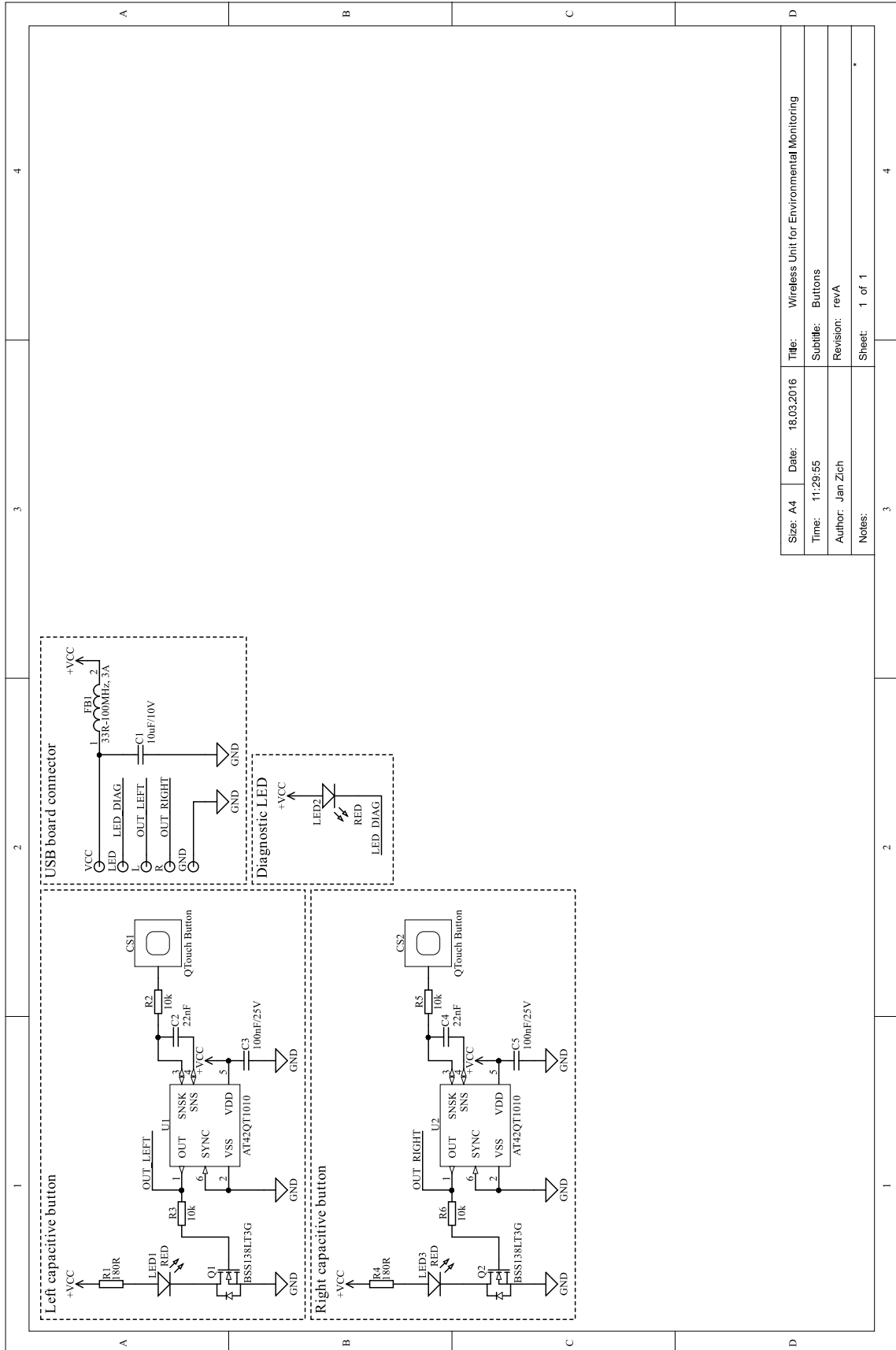
- [35] 2450BP15E0100E FILTER, BANDPASS, 2.4GHZ. *Farnell*. [cit. 18.1.2016]. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/johanson-technology/2450at43b100e/antenna-bluetooth-2-4ghz/dp/2148524>
- [36] 2450AT43B100E datasheet. *Johanson Technology*. [cit. 18.1.2016]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1860765.pdf>
- [37] 2450BP15E0100E datasheet. *Johanson Technology*. [cit. 18.1.2016]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1640997.pdf>
- [38] TSL2561T. *Farnell*. [cit. 19.1.2016]. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/ams/tsl2561t/sensor-light-digital-converter/dp/1226888>
- [39] TSL2561T datasheet. *AMS*. [cit. 19.1.2016]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1701992.pdf>
- [40] SHT21. *Farnell*. [cit. 19.1.2016]. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/sensirion/sht21/sensor-humidity-temp-3x3mm-2/dp/1855468>
- [41] SHT21 datasheet. *Sensirion*. [cit. 19.1.2016]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1780639.pdf>
- [42] LMP91000 datasheet. *Texas Instruments*. [cit. 28.1.2016]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp91000.pdf>
- [43] Pellistor. *Wikipedia*. [cit. 28.1.2016]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pellistor>
- [44] CH-A3 datasheet. *Alphasense*. [cit. 28.1.2016]. Dostupné z: <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2015/04/CHA3.pdf>
- [45] Pelistorové senzory. *VŠCHT. Ústav fyziky a měřicí techniky*. [cit. 28.1.2016]. Dostupné z: <https://vscht.cz/ufmt/cs/vyzkum/pelistorove-senzory.html>
- [46] 1,8“ color TFT display. *Adafruit*. [cit. 2.2.2016]. Dostupné z: <https://www.adafruit.com/products/358>
- [47] ST7735R datasheet. *Sitronix*. [cit. 2.2.2016]. Dostupné z: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/ST7735R_V0.2.pdf
- [48] AT42QT1010. *Atmel*. [cit. 7.2.2016]. Dostupné z: http://www.atmel.com/images/atmel-9541-at42-qtouch-bsw-at42qt1010_datasheet.pdf
- [49] KA-3528SURCKT-09. *Farnell*. [cit. 7.2.2016]. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/kingbright/ka-3528surckt-09/led-red-350mcd-630nm-smd/dp/2426191>
- [50] Lithium-polymerový akumulátor. *Wikipedia*. [cit. 9.2.2016]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-polymerov%C3%BD_akumul%C3%A1tor
- [51] BQ25504 datasheet. *Texas Instruments*. [cit. 9.2.2016]. Dostupné z: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/bq25504.pdf>
- [52] BL65-45. *Amazon*. [cit. 9.2.2016]. Dostupné z: <http://www.amazon.com/240mA-Energy-Courtyard-Charger-BL65-45/dp/B00K831490>

- [53] L903450. *Mixtrónica*. [cit. 9.2.2016]. Dostupné z: <http://www.mixtronica.com/electronica-baterias-energia-pilhas-litio-outros/9853-mx903450-bateria-recarregavel-li-po-3-7v-1600mah-9x34x50m-mx903450-L903450.html>
- [54] L903450 datasheet. *Cellevia Batteries*. [cit. 9.2.2016]. Dostupné z: http://www.tme.eu/cz/details/accu-lp903450_cl/akumulatory/cellevia-batteries/l903450/
- [55] IRLML6344 datasheet. *International Rectifier*. [cit. 9.2.2016]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irlml6344pbf.pdf>
- [56] MCP73837/8. *Microchip*. [cit. 13.2.2016]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22071B.pdf>
- [57] TPS62003 datasheet. *International Rectifier*. [cit. 13.2.2016]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps62200.pdf>
- [58] CC3100/CC3200 Wi-Fi Internet-on-a-chip Networking Sub-system Power Management. *Texas Instruments*. [cit. 15.2.2016]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/swra462/swra462.pdf>
- [59] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce DPS. 1. vyd.* Praha: BEN, 2011. 128 s. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [60] USB Hardware Design Guidelines for FTDI ICs. *FTDI Chip*. [cit. 13.2.2016]. Dostupné z: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/AppNotes/AN_146_USB_Hardware_Design_Guidelines_for_FTDI_ICs.pdf
- [61] Atmel AVR1017: XMEGA - USB Hardware Design Recommendations. *Atmel*. [cit. 20.2.2016]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc8388.pdf>
- [62] Standalone Momentary Capacitive Touch Sensor Breakout - AT42QT1010. *Adafruit*. [cit. 20.2.2016]. Dostupné z: <https://www.adafruit.com/products/1374>
- [63] Altium Designer Overview. *Altium*. [cit. 26.2.2016]. Dostupné z: <http://www.altium.com/altium-designer/overview>
- [64] SPICE. *Wikipedia*. [cit. 26.2.2016]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/SPICE>
- [65] ISO 10303-21. *Wikipedia*. [cit. 26.2.2016]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/ISO_10303-21
- [66] FR-4. *Wikipedia*. [cit. 1.3.2016]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/FR-4>
- [67] Electroless nickel immersion gold. *Wikipedia*. [cit. 1.3.2016]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electroless_nickel_immersion_gold
- [68] NORMAN, Donald. A. *Design pro každý den. 1. vyd.* Praha: Dokořán, 2010. 271 s. ISBN 978-80-7363-314-1.
- [69] SOLIDWORKS Standard. *Solidworks*. [cit. 4.3.2016]. Dostupné z: <http://www.solidworks.cz/produkty/3d-cad/balicky/solidworks-standard/>
- [70] Referenční model ISO/OSI. *Wikipedia*. [cit. 10.4.2016]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Referen%C4%8Dn%C3%AD_model_ISO/OSI

- [71] Internet Protocol. *Wikipedia*. [cit. 10.4.2016]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Internet_Protocol
- [72] Transmission Control Protocol. *Wikipedia*. [cit. 10.4.2016]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Transmission_Control_Protocol
- [73] User Datagram Protocol. *Wikipedia*. [cit. 10.4.2016]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/User_Datagram_Protocol
- [74] Packet Sender. *PacketSender*. [cit. 10.4.2016]. Dostupné z:
<https://packetsender.com/download>
- [75] Terminate: a simple RS232 terminal. *CompuPhase*. [cit. 10.4.2016]. Dostupné z:
http://www.compuphase.com/software_termite.htm

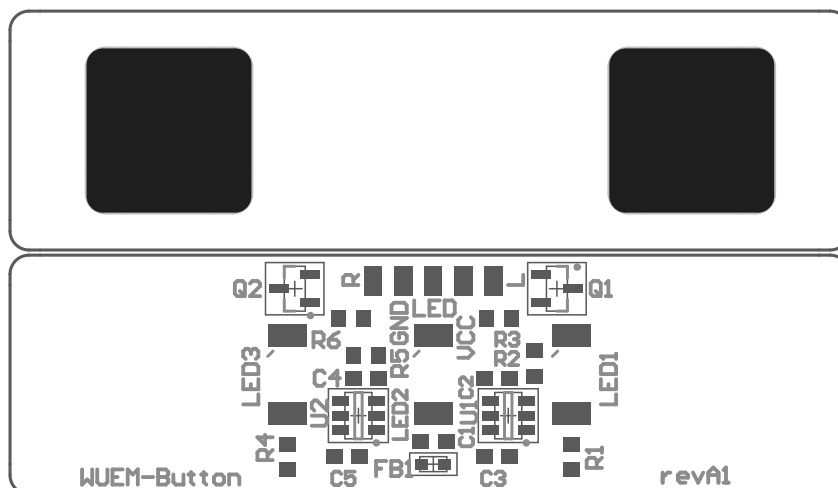
Přílohy

Příloha A – Schéma DPS s kapacitními tlačítky



Size: A4	Date: 18.03.2016	Title: Wireless Unit for Environmental Monitoring
Time: 11:29:55	Subfile: Buttons	
Author: Jan Zich	Revision: revA	
Notes:	Sheet: 1 of 1	

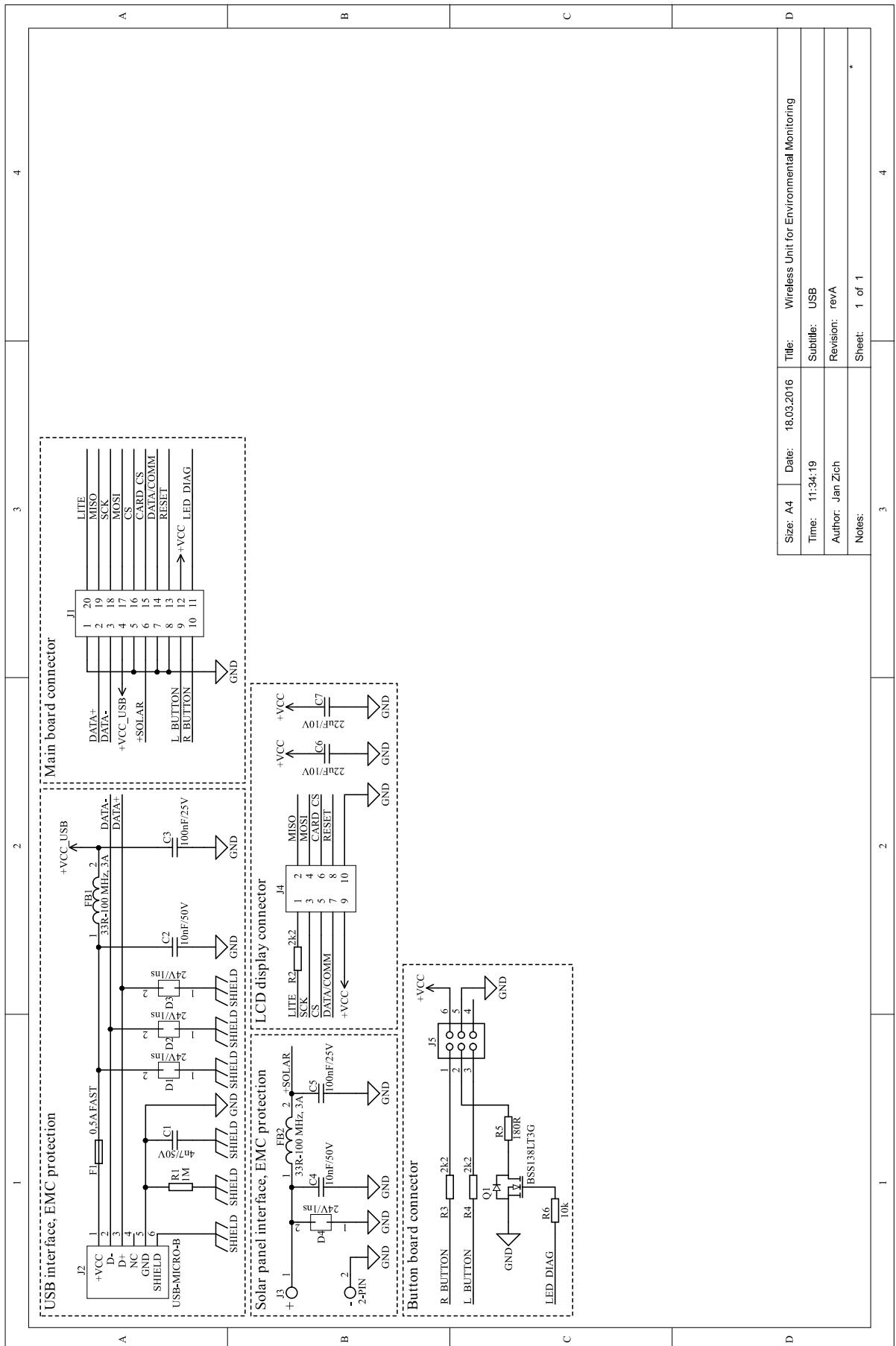
Příloha B – Osazovací výkresy pro DPS s kapacitními tlačítky (formát 2:1)



Příloha C – Kusovník pro DPS s kapacitními tlačítky

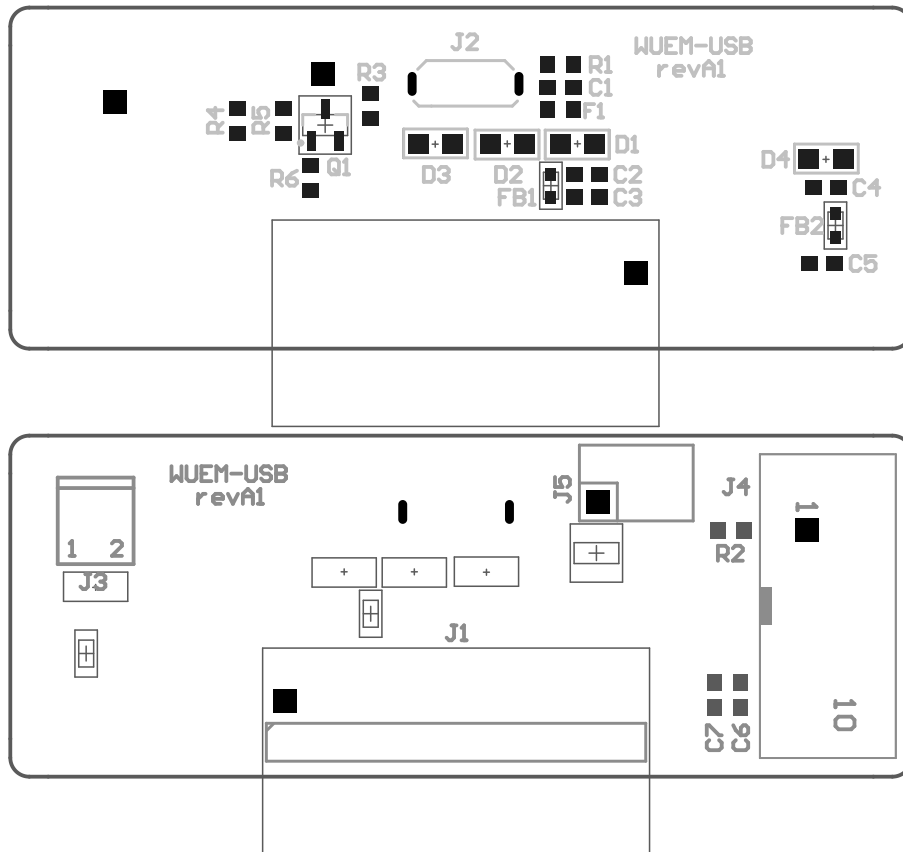
Název součástky	Hodnota	Distributor	Obj. číslo	Pouzdro	Množství
C1	10uF/10V	Farnell	2456110	0603	1
C2, C4	22nF	Farnell	1759027	0603	2
C3, C5	100nF/25V	Farnell	432210	0603	2
CS1, CS2	QTouch Button	Farnell		QTouch	2
FB1	33R-100MHz, 3A	Farnell	1515742	0603	1
GND, L, LED, R, VCC	SMD PAD	Farnell		SMD PAD	5
LED1, LED2, LED3	RED	Farnell	2426191	3,2 mm × 2,8 mm	3
Q1, Q2	BSS138LT3G	Farnell	2101819	SOT23	2
R1, R4	180R	Farnell	9233288	0603	2
R2, R3, R5, R6	10k	Farnell	2502802	0603	4
U1, U2	AT42QT1010	Farnell	1841593	SOT23-6	2

Příloha D – Schéma DPS s USB rozhraním



Size: A4	Date: 18.03.2016	Title: Wireless Unit for Environmental Monitoring
Time: 11:34:19		Subtitle: USB
Author: Jan Zich		Revision: revA
Notes:		Sheet: 1 of 1

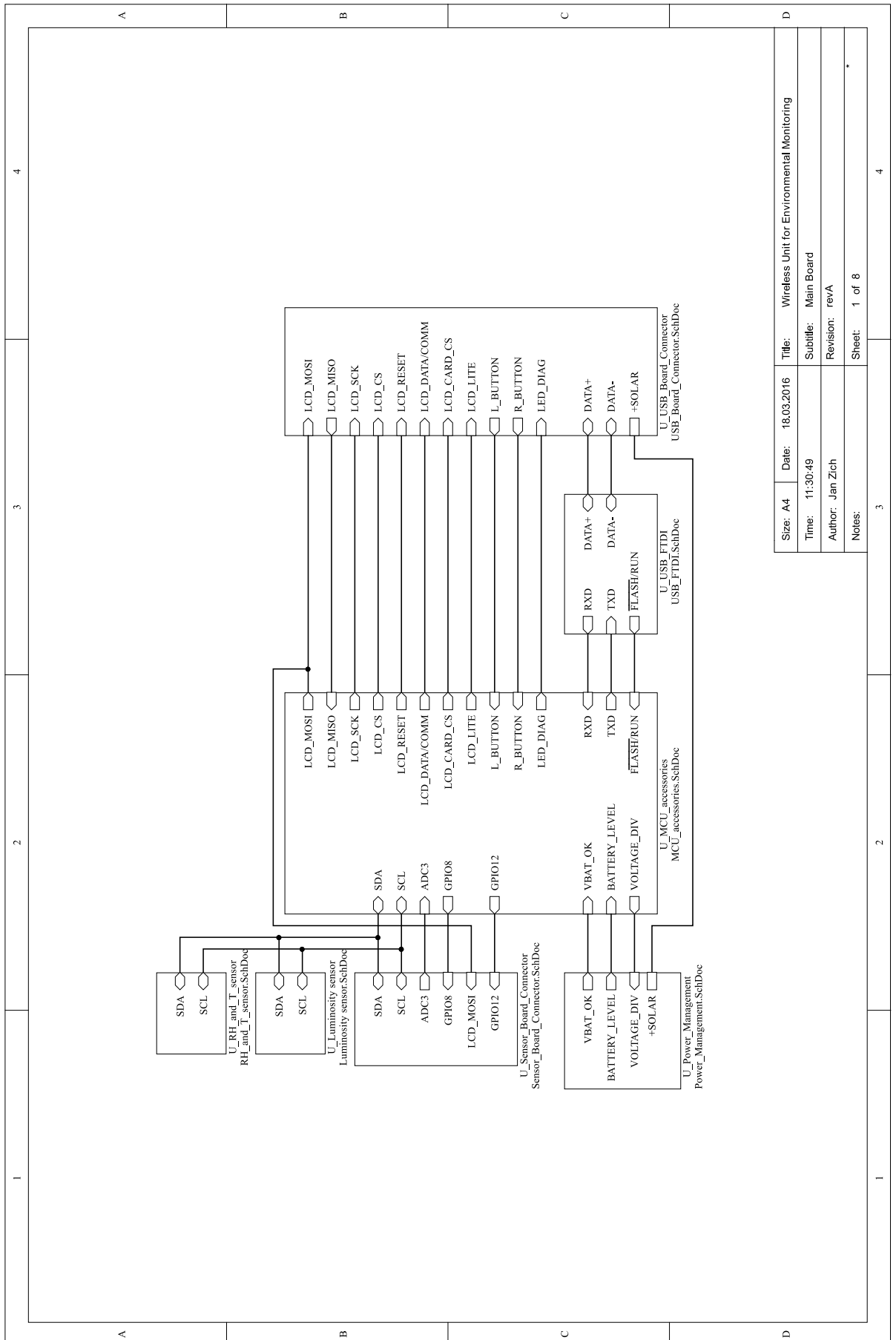
Příloha E – Osazovací výkresy pro DPS s USB rozhraním (formát 2:1)



Příloha F – Kusovník pro DPS s USB rozhraním

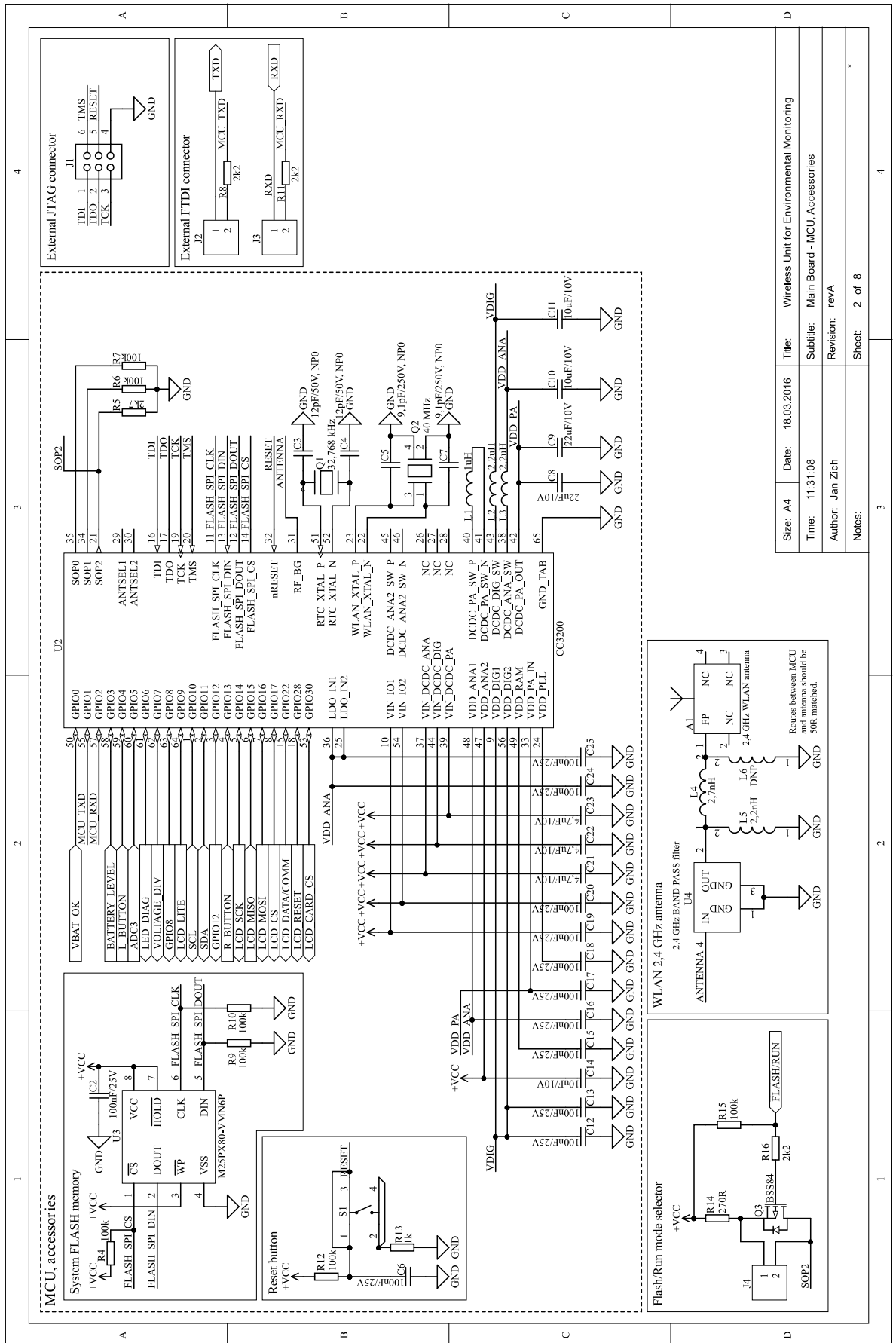
Název součástky	Hodnota	Distributor	Obj. číslo	Pouzdro	Množství
C1	4n7/50V	Farnell	1759098	0603	1
C2, C4	10nF/50V	Farnell	1759102	0603	2
C3, C5	100nF/25V	Farnell	2496833	0603	2
C6, C7	22uF/10V	Farnell	2426957	0603	2
D1, D2, D3, D4	24V/1ns	Farnell	1757240	0603	4
F1	0,5A FAST	TME	BSMD0603-SS0.5	0603	1
FB1, FB2	33R-100 MHz, 3A	Farnell	1515742	0603	2
J1	WE-2,54	Farnell	1593454	2,54 mm, 2 řady	1
J2	USB-MICRO-B	Farnell	2470821	MICRO-B-THT	1
J3	2-PIN	GES	GES06613882	2,54 mm	1
J4	WE-2,54mm	Farnell	2215304	2,54 mm, 2 řady	1
J5	WE-2,54 mm	Farnell	1593440	2,54 mm, 2 řady	1
Q1	BSS138LT3G	Farnell	2101819	SOT23	1
R1	1M	Farnell	9233741	0603	1
R2, R3, R4	2k2	Farnell	9238522	0603	3
R5	180R	Farnell	9233288	0603	1
R6	10k	Farnell	2502802	0603	1

Příloha G – Schéma hlavní DPS – propojení bloků

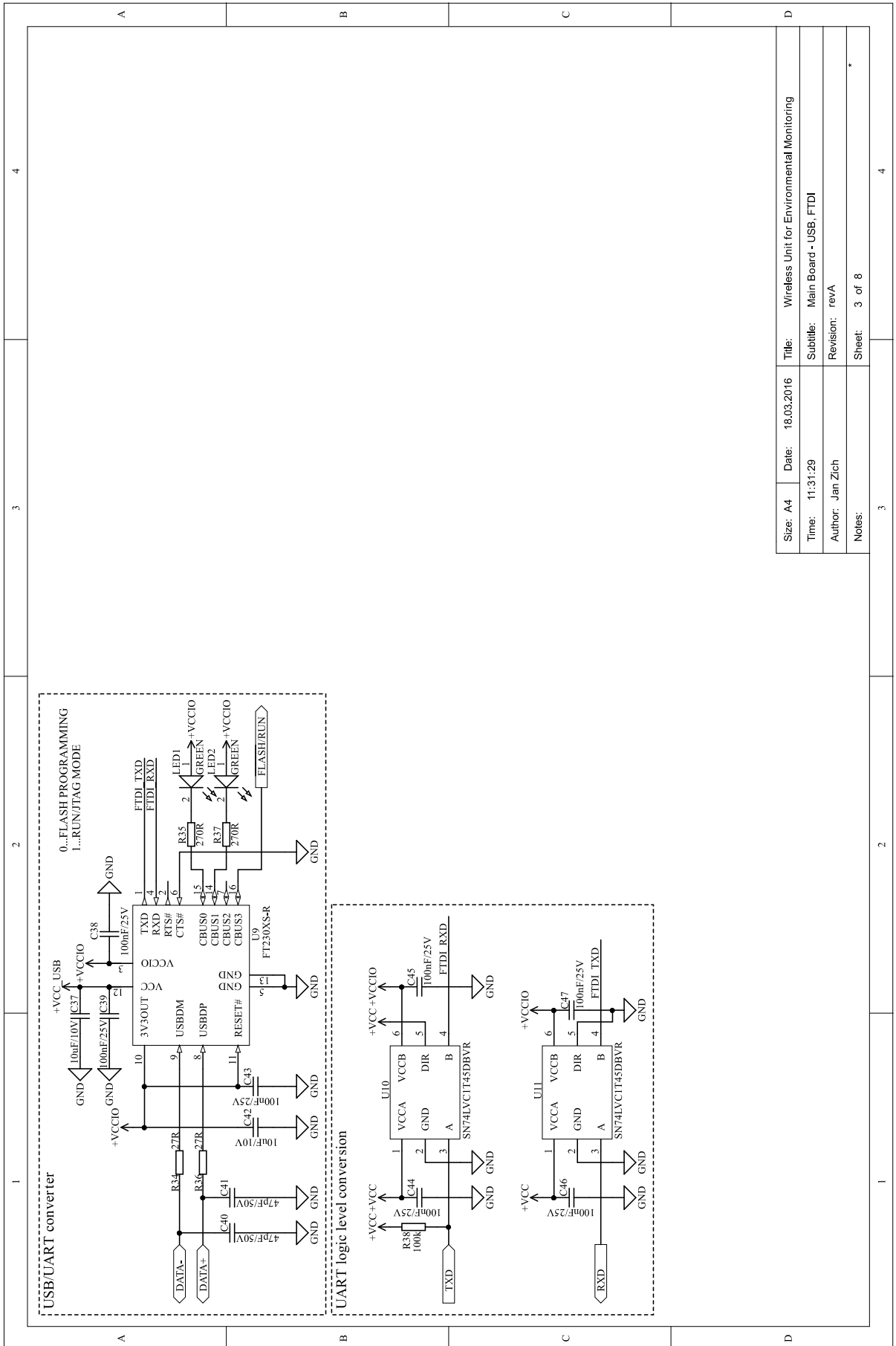


Size: A4	Date: 18.03.2016	Title: Wireless Unit for Environmental Monitoring
Time: 11:30:49	Author: Jan Zich	Subtitle: Main Board
Notes:	Revision: revA	
	Sheet: 1 of 8	

Příloha H – Schéma hlavní DPS – mikrokontrolér a jeho příslušenství

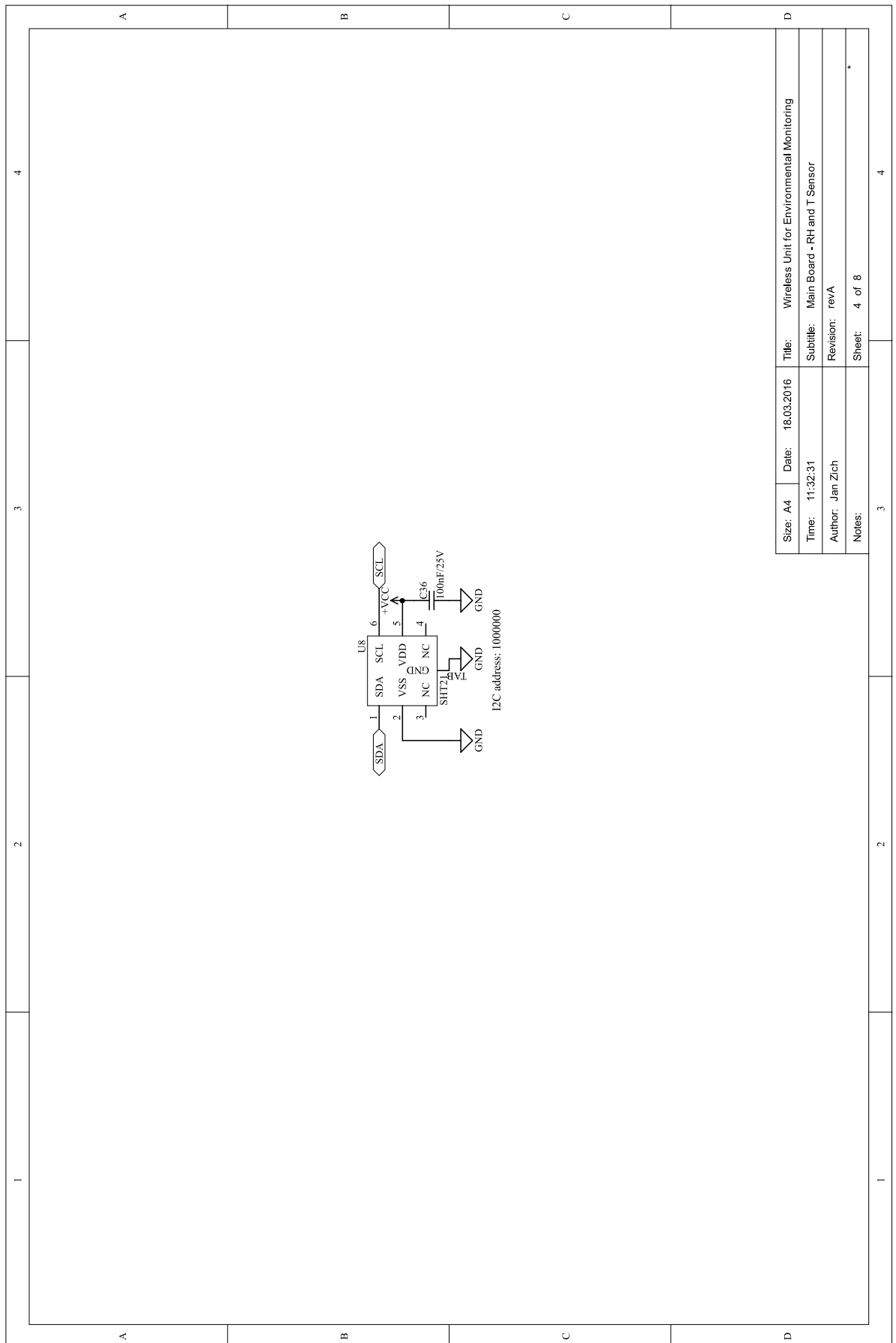


Příloha CH – Schéma hlavní DPS – USB/UART převodník

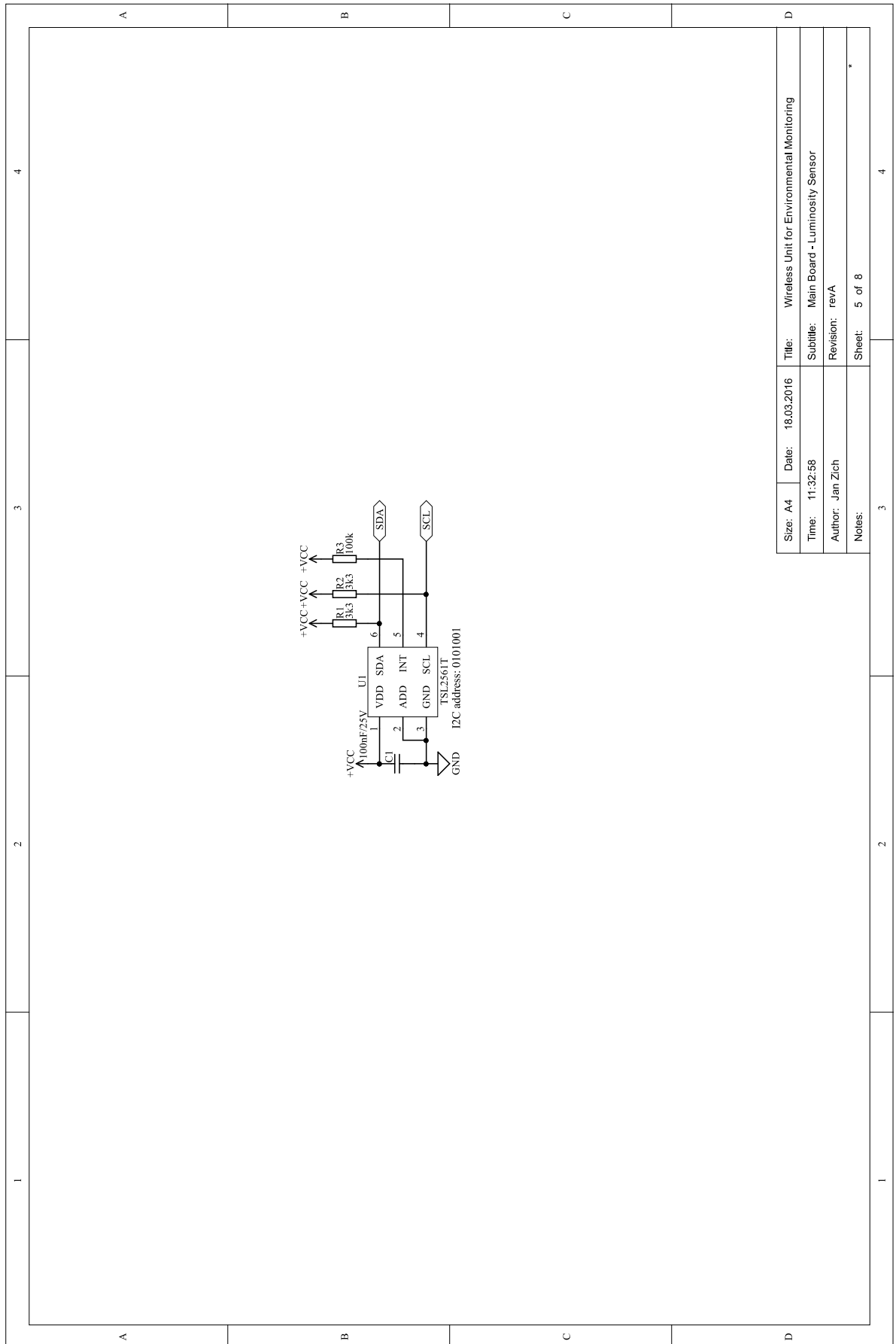


Size: A4	Date: 18.03.2016	Title: Wireless Unit for Environmental Monitoring
Time: 11:31:29	Author: Jan Zich	Subtitle: Main Board - USB, FTDI
Notes:	Revision: revA	Sheet: 3 of 8

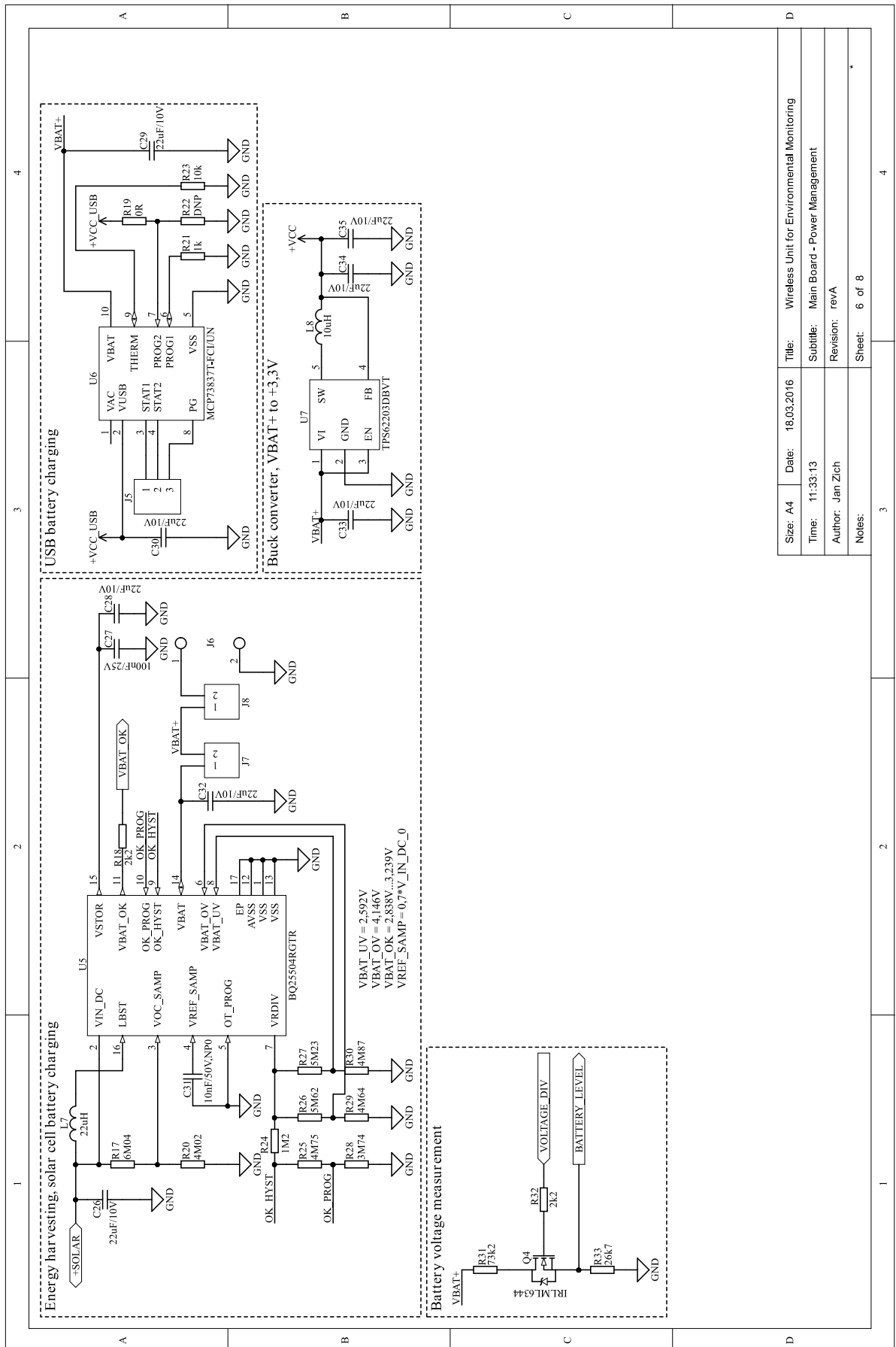
Příloha I – Schéma hlavní DPS – RH a T senzor



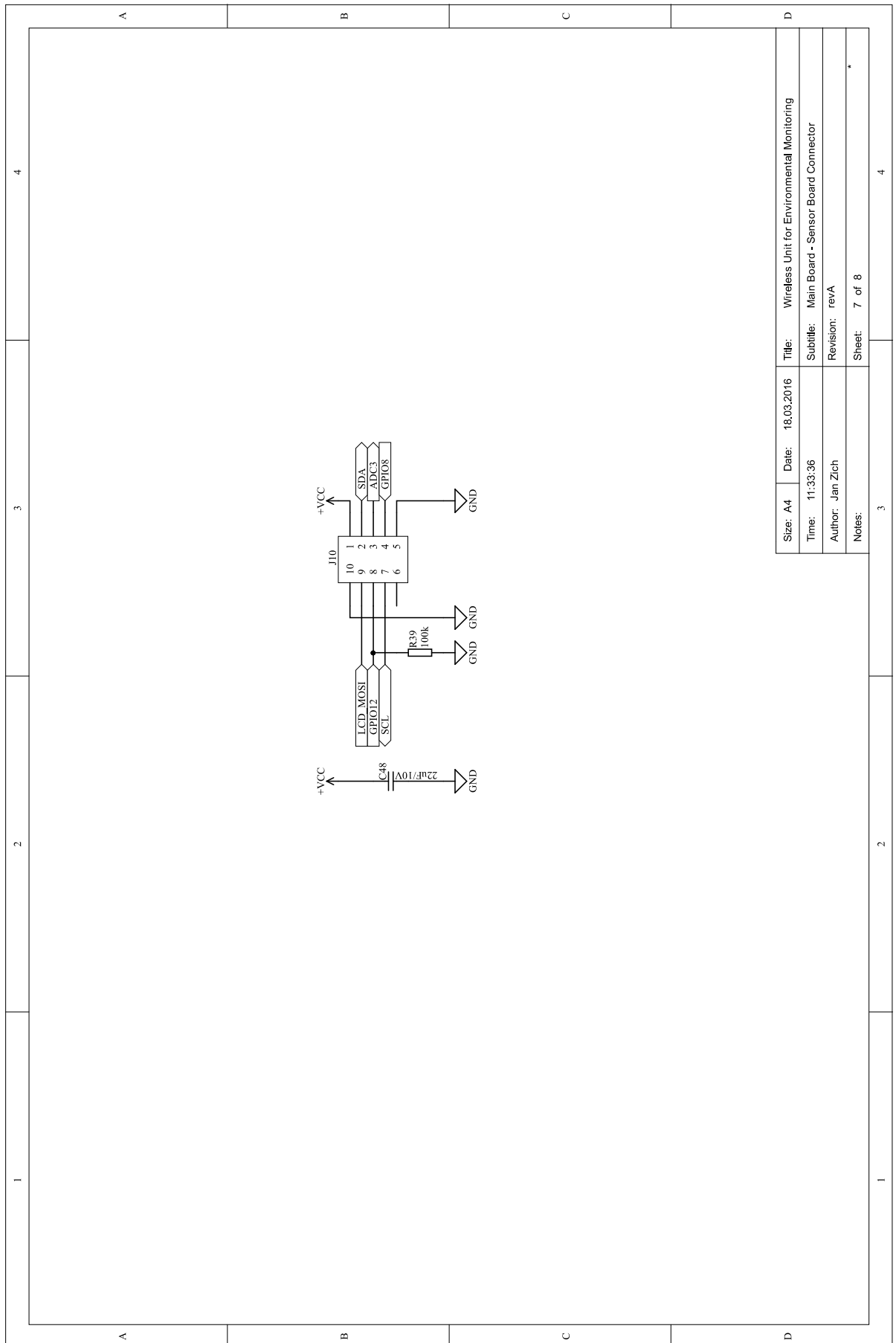
Příloha J – Schéma hlavní DPS – senzor intenzity osvětlení



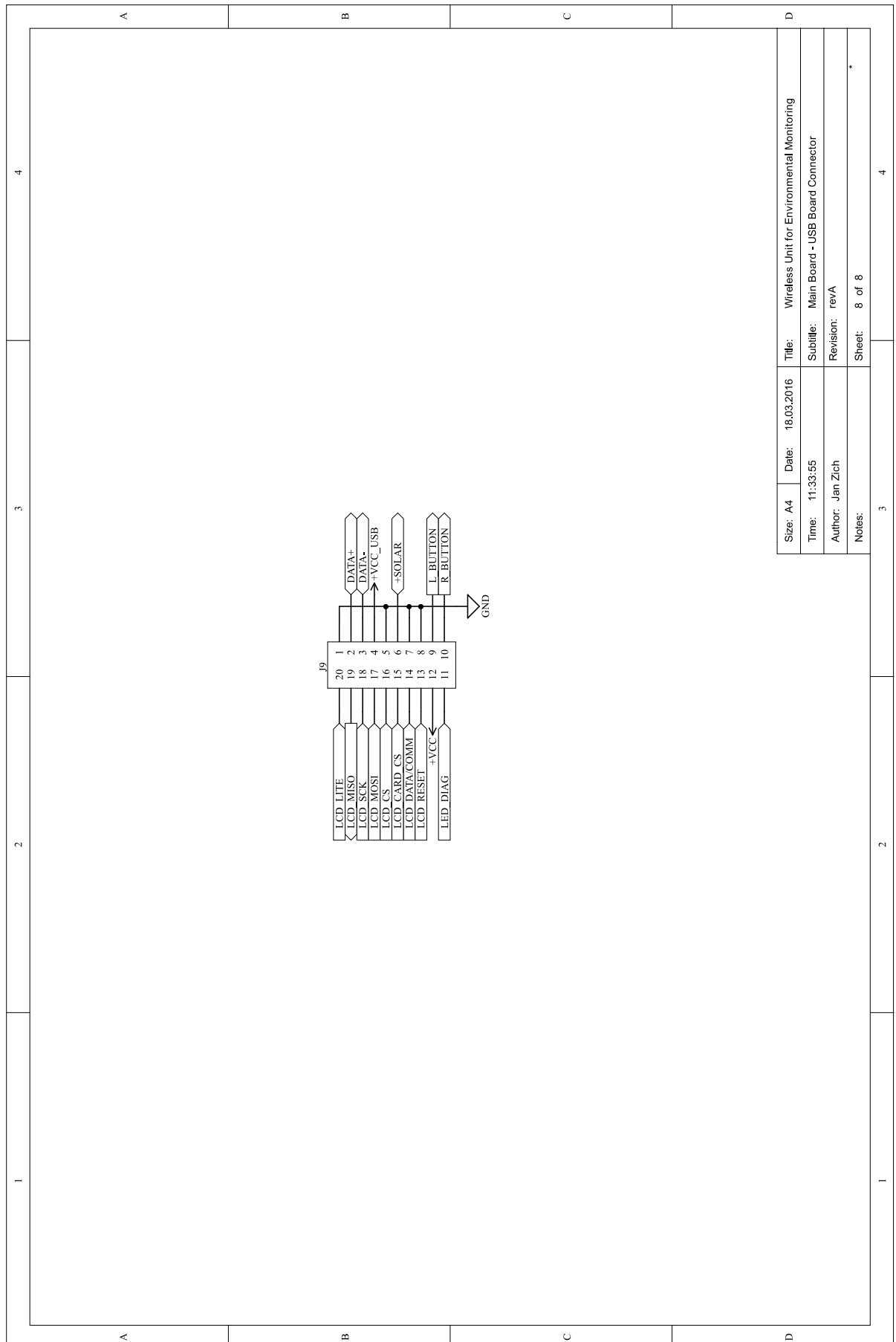
Příloha K – Schéma hlavní DPS – napájecí subsystém



Příloha L – Schéma hlavní DPS – připojení sensorové desky

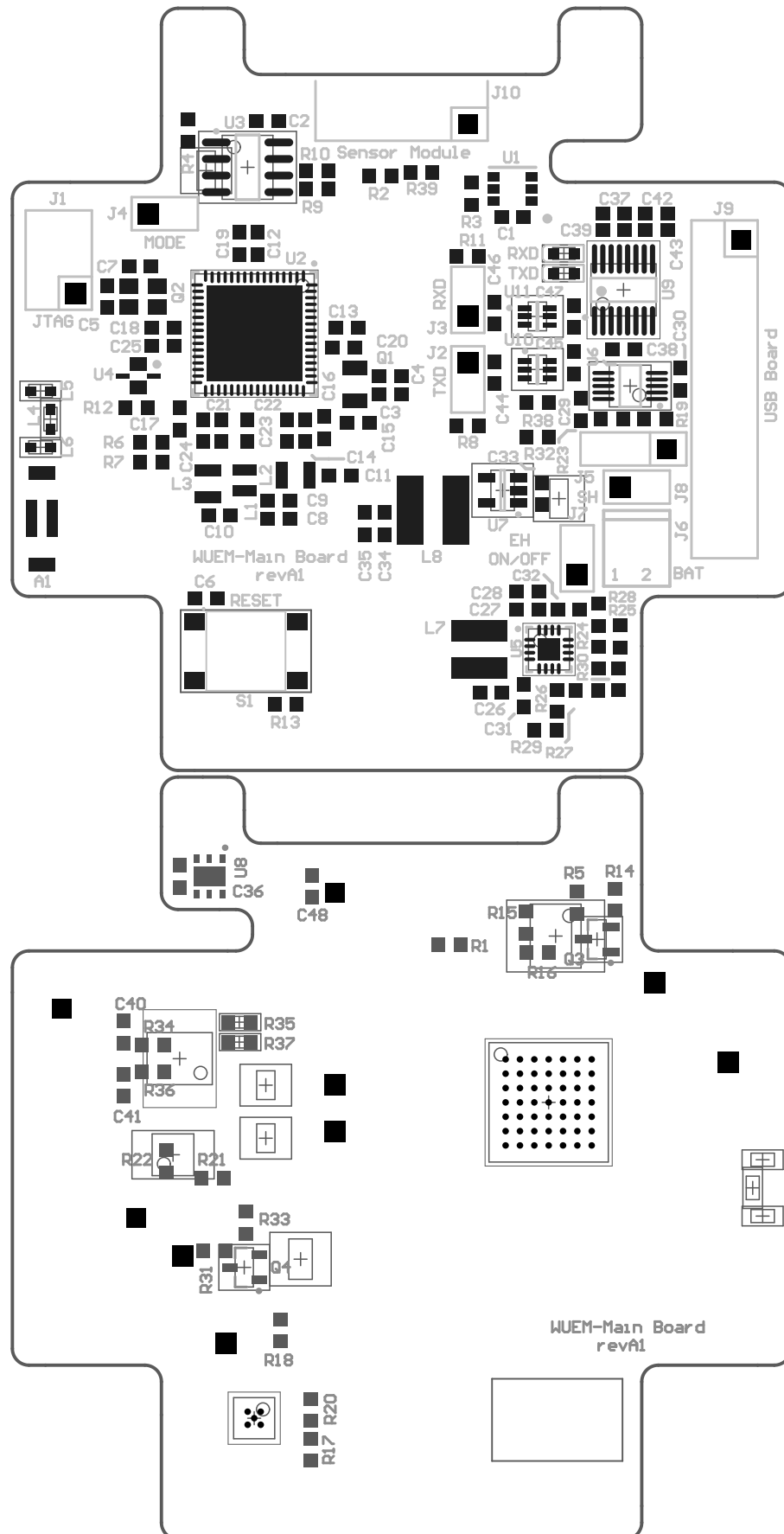


Příloha M – Schéma hlavní DPS – připojení desky s USB rozhraním



Size: A4	Date: 18.03.2016	Title: Wireless Unit for Environmental Monitoring
Time: 11:33:55		Subtitle: Main Board - USB Board Connector
Author: Jan Zich		Revision: revA
Notes:		Sheet: 8 of 8

Příloha N – Osazovací výkresy hlavní DPS (formát 2:1)



Příloha O – Kusovník hlavní DPS

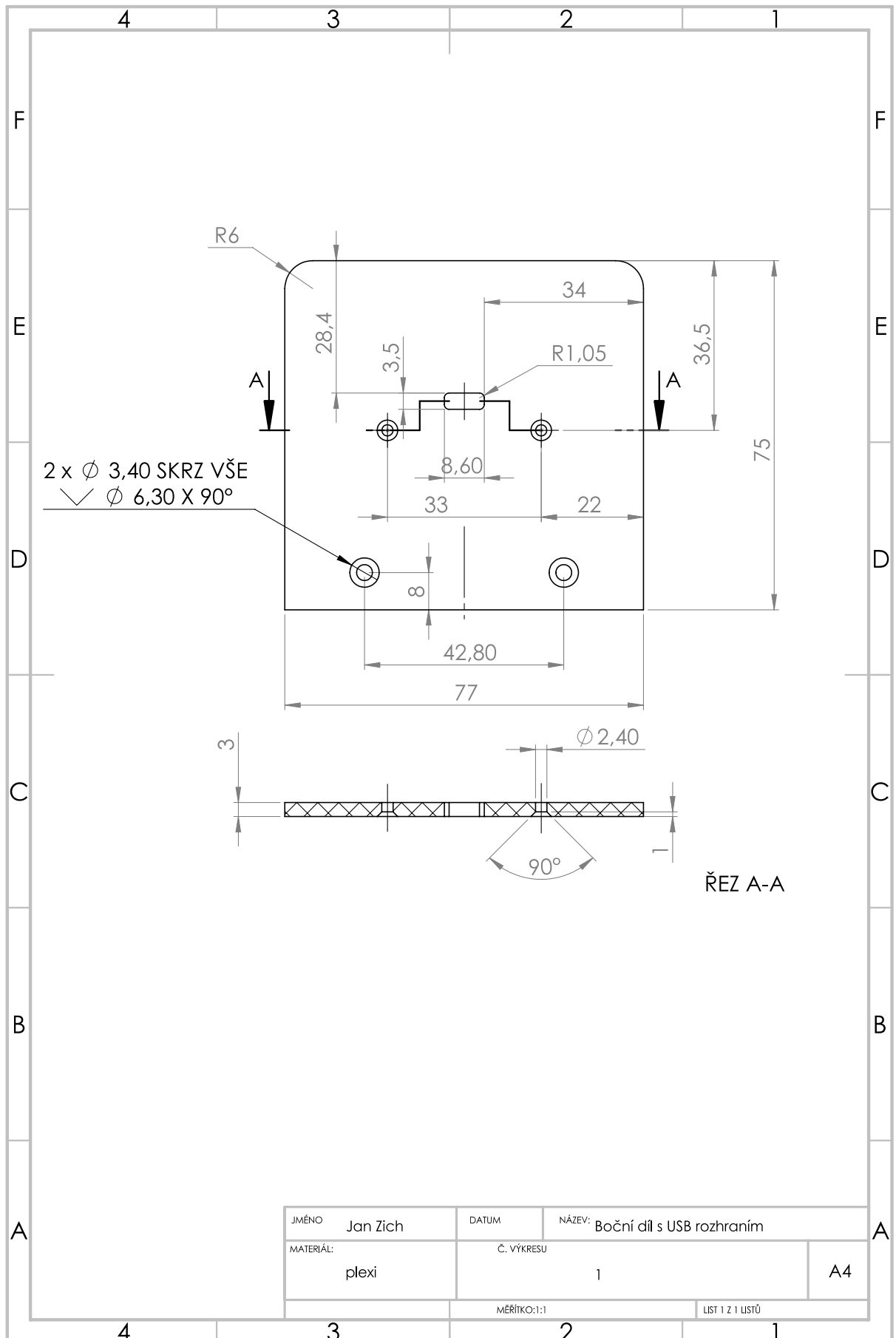
Název součástky	Hodnota	Distributor	Obj. číslo	Pouzdro	Množství
A1	2450AT43B100E	Farnell	2148524	2450AT43B100E	1
C1, C2, C6, C12, C13, C15, C16, C17, C18, C19, C20, C24, C25, C27, C36, C38, C39, C43, C44, C45, C46, C47	100nF/25V	Farnell	2496833	0603	22
C3, C4	12pF/50V, NP0	Farnell	1889232	0603	2
C5, C7	9,1pF/250V, NP0	Farnell	1885393	0603	2
C8, C9, C26, C28, C29, C30, C32, C33, C34, C35, C48	22uF/10V	Farnell	2426957	0603	11
C10, C11, C14, C37, C42	10uF/10V	Farnell	2456110	0603	5
C21, C22, C23	4,7uF/10V	Farnell	2320818	0603	3
C31	10nF/50V,NP0	Farnell	1759102	0603	1
C40, C41	47pF/50V	Farnell	1759062	0603	2
J1	WE-2,54 mm	Farnell	1593440	61300621121	1
J2, J3, J4, J7, J8	WE-2,54 mm	Farnell	1022247	61300211121	5
J5	WE-2.54 mm	Farnell	ZL201-03G	61300311821	1
J6	2-PIN	GES	GES06613882	2,54 mm	1
J9	WE-2,54 mm	TME	ZL262-20DG	61302021821	1
J10	WE-2.54 mm	TME	ZL262-10DG	61301021821	1
L1	1uH	Farnell	2451979	CPI0806J1R0R-10	1
L2, L3	2,2uH	Farnell	2451989	CPI1008J2R2R-10	2
L4	2,7nH	Farnell	1865789	0603	1
L5	2,2nH	Farnell	1865788	0603	1
L6	DNP	Farnell		0603	1
L7	22uH	Farnell	1890602	744031220 SMD	1
L8	10uH	Farnell	1635842	744042100	1
LED1, LED2	GREEN	Farnell	2099252	0603 GREEN	2
Q1	32,768 kHz	Farnell	2467865	ABS07 XTAL	1
Q2	40 MHz	Farnell	1712847	X1E0000210177	1
Q3	BSS84	Farnell	1094997	SOT23	1
Q4	IRLML6344	Farnell	1857299	SOT23	1
R1, R2	3k3	Farnell	2502448	0603	2
R3, R4, R6, R7, R9, R10, R12, R15, R38, R39	100k	Farnell	2502398	0603	10
R5	2k7	Farnell	2502439	0603	1
R8, R11, R16, R18, R32	2k2	Farnell	9238522	0603	5
R13, R21	1k	Farnell	2502396	0603	2
R14, R35, R37	270R	Farnell	9233300	0603	3
R17	6M04	Farnell	2138702	0603	1

R19	0R	Farnell	2447743	0603	1
R20	4M02	Farnell	2138679	0603	1
R22	DNP	Farnell	2502432	0603	1
R23	10k	Farnell	2502802	0603	1
R24	1M2	Farnell	2059682	0603	1
R25	4M75	Farnell	1652887	0603	1
R26	5M62	Farnell	2138698	0603	1
R27	5M23	Farnell	2138693	0603	1
R28	3M74	Farnell	2138675	0603	1
R29	4M64	Farnell	2141612	0603	1
R30	4M87	Farnell	2138689	0603	1
R31	73k2	Farnell	2059485	0603	1
R33	26k7	Farnell	1170929	0603	1
R34, R36	27R	Farnell	2502436	0603	2
S1	430152043826	Farnell	2065109	4301x20438x6	1
U1	TSL2561T	Farnell	1226888	TSL2561T	1
U2	CC3200	Farnell	2445382	QFN-64	1
U3	M25PX80-VMN6P	Farnell	2253722	SO8_N	1
U4	2,4 GHz BP FILTER	Farnell	2148528	2450BP15E0100E	1
U5	BQ25504RGTR	Farnell	2144306	RGT16	1
U6	MCP73837T	Farnell	1675426	MSOP-UN10_N	1
U7	TPS62203DBVT	Farnell	8458049	SOT-23-OT5_M	1
U8	SHT21	Farnell	1855468	sht21	1
U9	FT230XS-R	Farnell	2081321	SSOP-16_N	1
U10, U11	SN74LVC1T45	Farnell	2395908	SC70-LT6_M	2

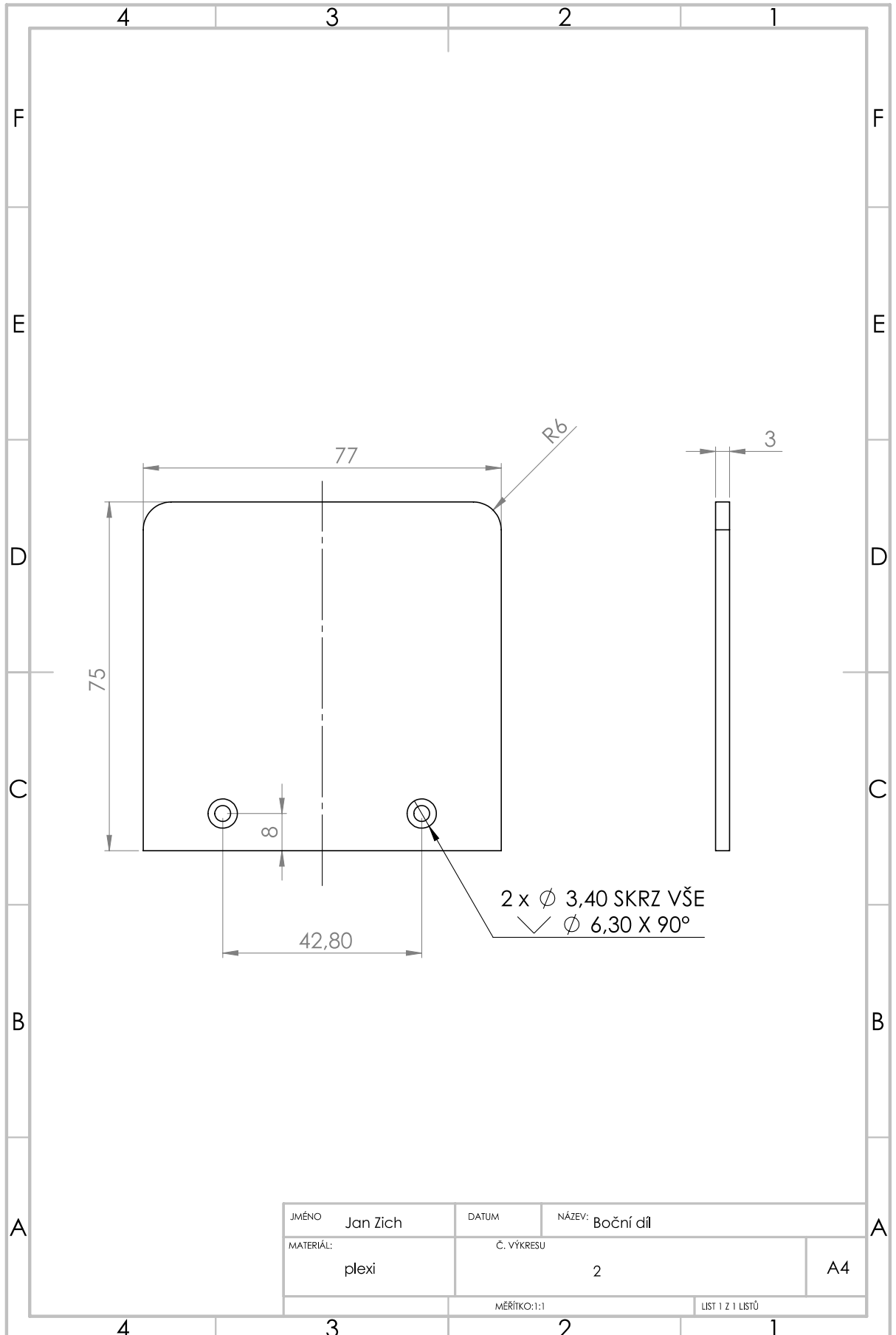
Příloha P – Kusovník elektroniky mimo DPS a mechanické konstrukce

Název součástky	Hodnota	Distributor	Obj. číslo	Množství
Akumulátor	1600 mAh, Li-Ion	TME	ACCU-LP903450	1
Přepínač	ON-ON	TME	5MS1S102BM1QE	1
Zástrčka	2-pin; 2,54 mm	TME	MX-22-01-3027	2
Kontakt	2,54 mm	TME	MX-4809-555T	4
Nožička	černá, gumová	TME	KM-NOGA-GUMA	4
Dist. sloupek	15 mm, M2	TME	TFF-M2X15/DR121	4
Matka	M2	TME	B2/BN628	14
Šroub	M2, válcový, 5 mm	TME	B2X5/BN660	10
Šroub	M2, válcový, 10 mm	TME	B2X10/BN660	4
Šroub	M2, záпустný, 8 mm	TME	B2X8/BN661	2
Šroub	M2, záпустný, 12 mm	TME	B2X12/BN661	4
Podložka	M2	TME	B2/BN1414	8

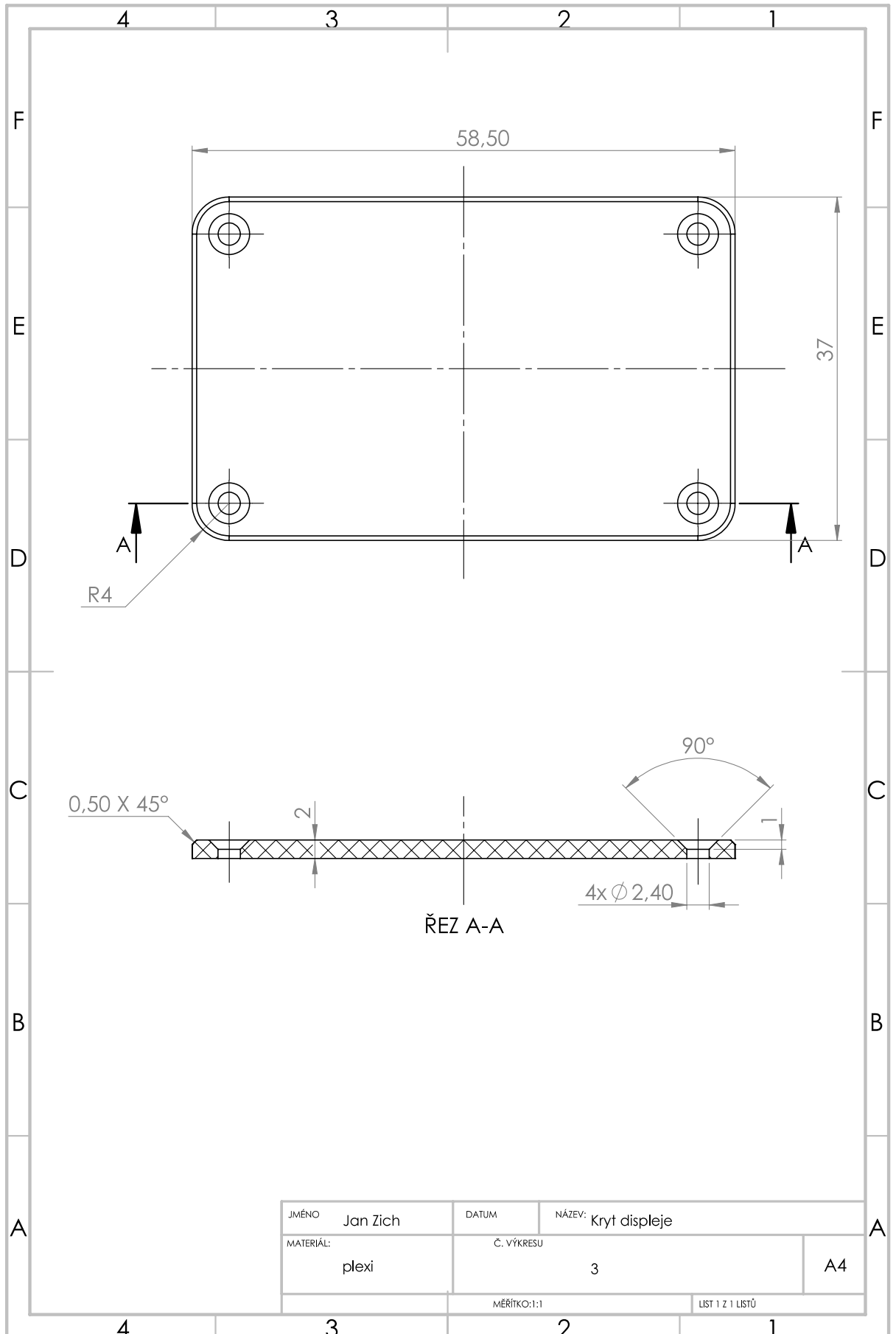
Příloha Q – Výkres bočního dílu s USB rozhraním



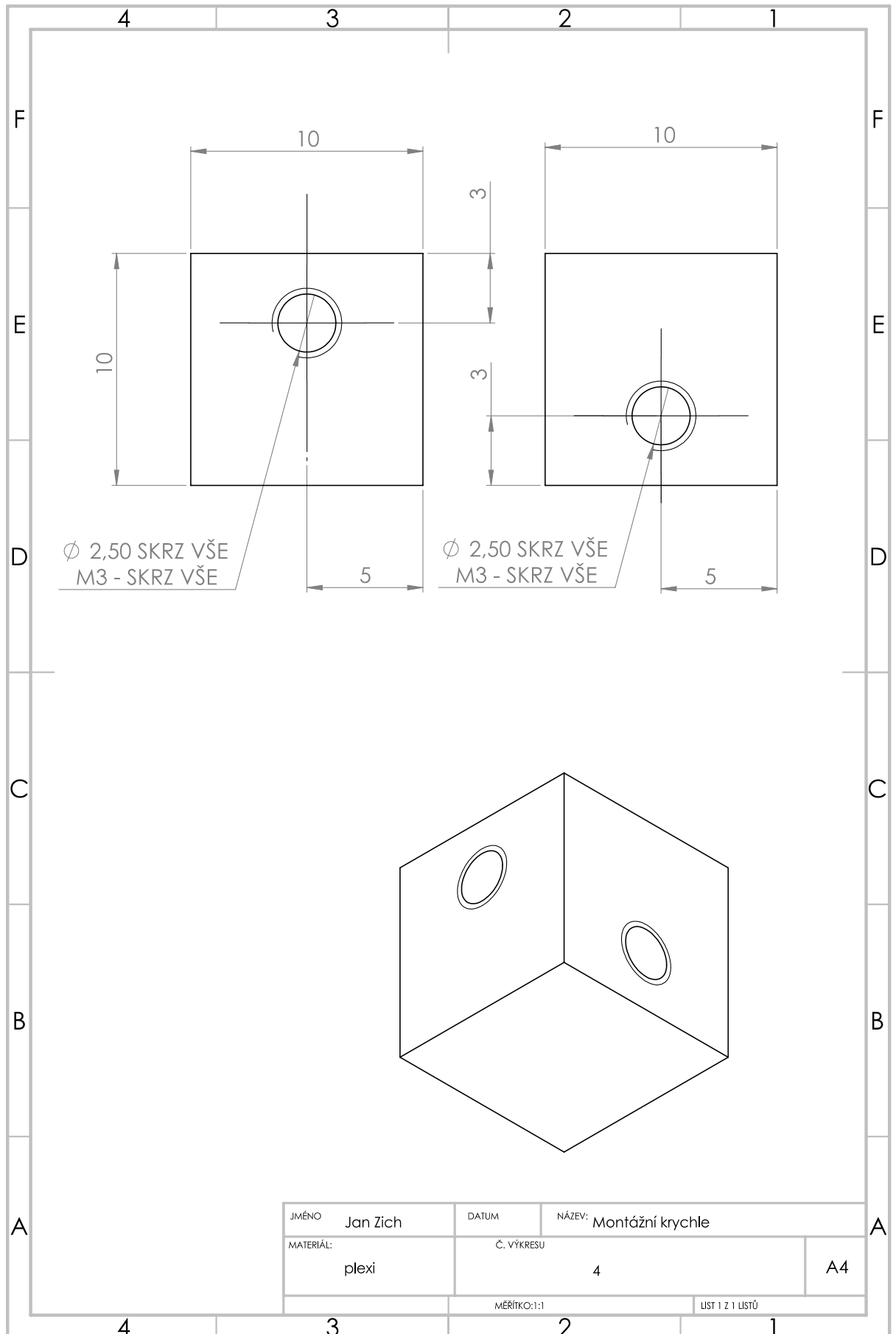
Příloha R – Výkres bočního dílu



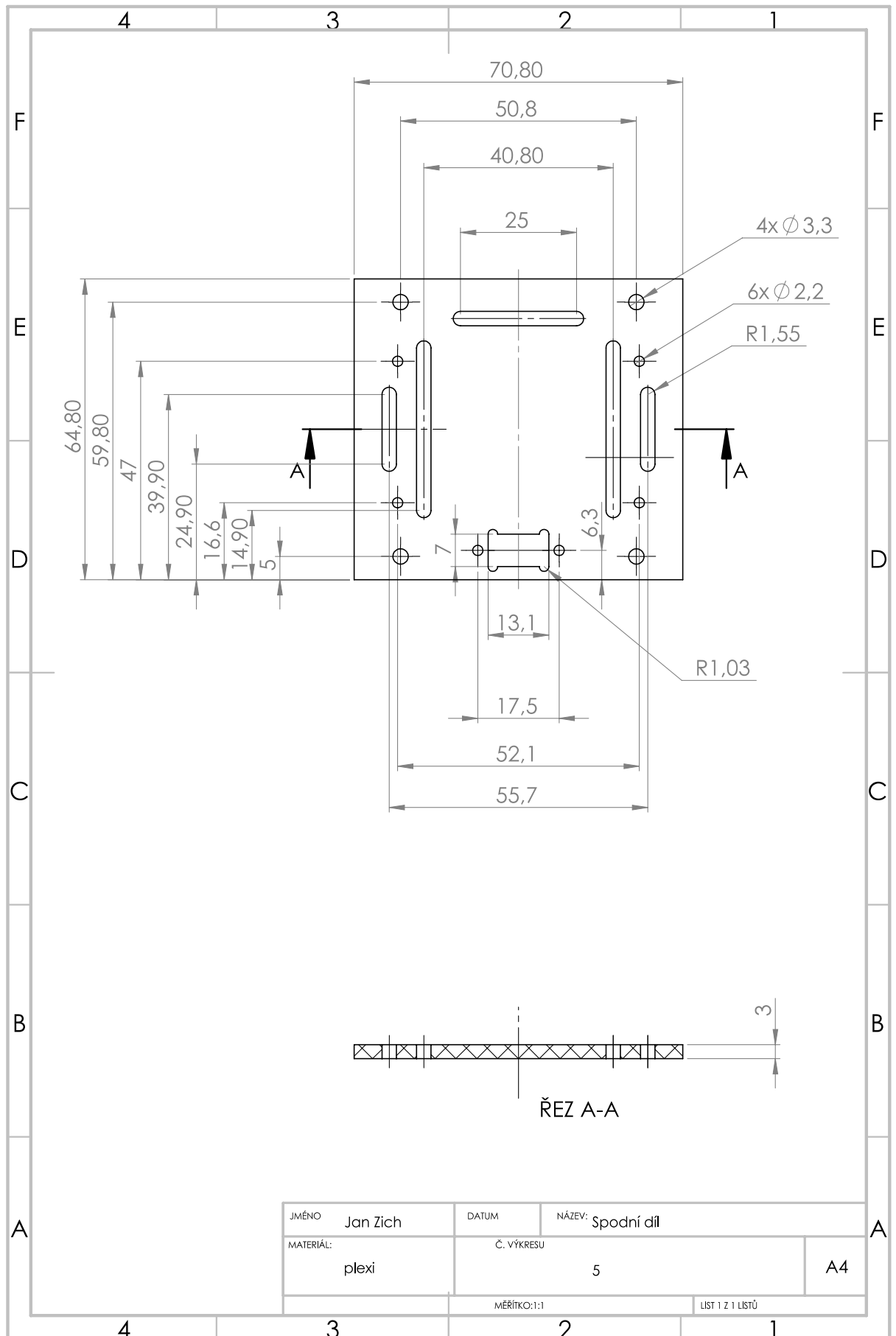
Příloha S – Výkres krytu displeje



Příloha T – Výkres montážní krychle

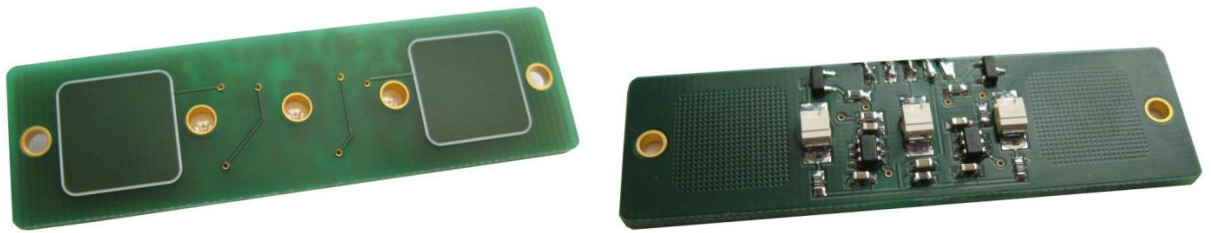


Příloha U – Výkres spodního dílu

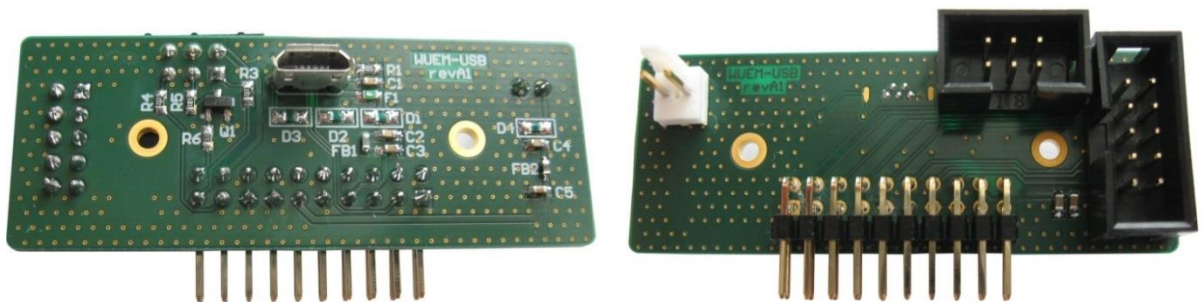


Příloha W – Desky plošných spojů

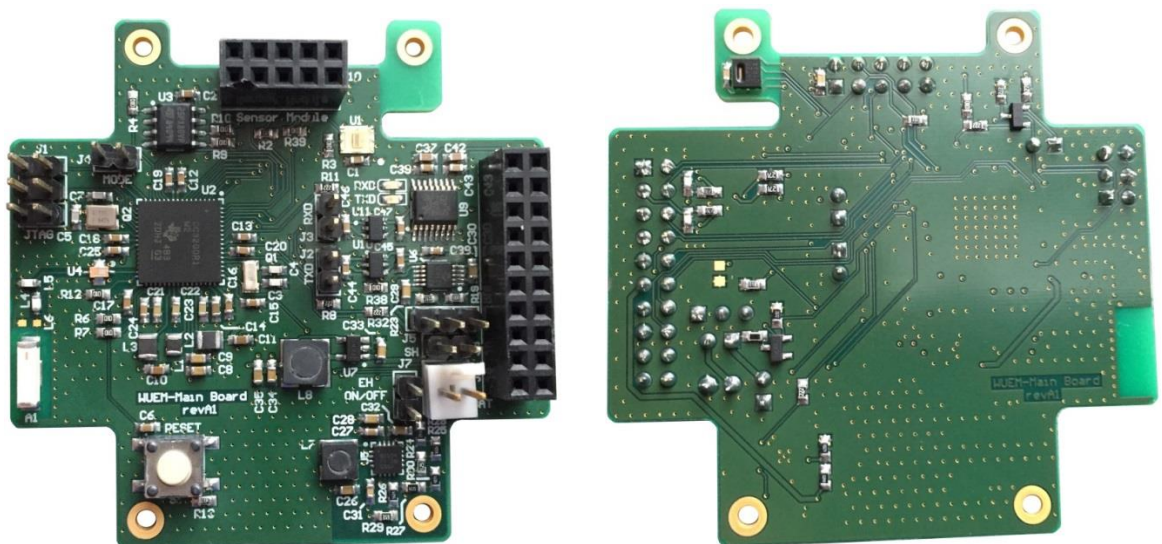
DPS s kapacitními tlačítky:

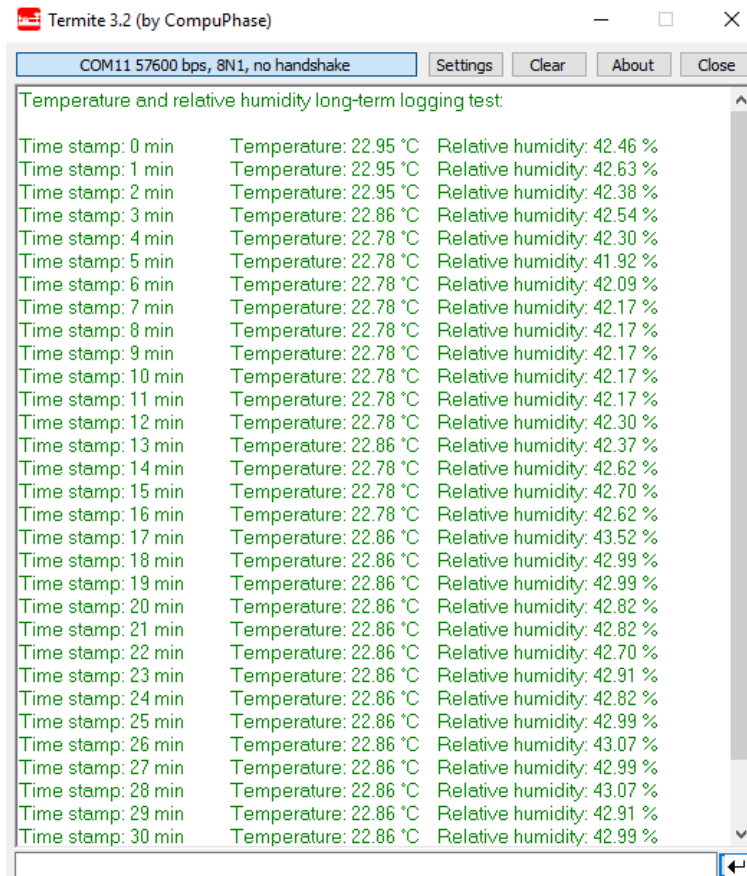


DPS s USB rozhraním:



Hlavní DPS:



Příloha X – Záznam naměřených hodnot

The screenshot shows a window titled "Termite 3.2 (by CompuPhase)". The window has a menu bar with "Settings", "Clear", "About", and "Close". Below the menu bar, there is a status bar that reads "COM11 57600 bps, 8N1, no handshake". The main area of the window displays a log titled "Temperature and relative humidity long-term logging test". The log contains 31 rows of data, each with a time stamp, temperature, and relative humidity.

Time stamp	Temperature	Relative humidity
0 min	22.95 °C	42.46 %
1 min	22.95 °C	42.63 %
2 min	22.95 °C	42.38 %
3 min	22.86 °C	42.54 %
4 min	22.78 °C	42.30 %
5 min	22.78 °C	41.92 %
6 min	22.78 °C	42.09 %
7 min	22.78 °C	42.17 %
8 min	22.78 °C	42.17 %
9 min	22.78 °C	42.17 %
10 min	22.78 °C	42.17 %
11 min	22.78 °C	42.17 %
12 min	22.78 °C	42.30 %
13 min	22.86 °C	42.37 %
14 min	22.78 °C	42.62 %
15 min	22.78 °C	42.70 %
16 min	22.78 °C	42.62 %
17 min	22.86 °C	43.52 %
18 min	22.86 °C	42.99 %
19 min	22.86 °C	42.99 %
20 min	22.86 °C	42.82 %
21 min	22.86 °C	42.82 %
22 min	22.86 °C	42.70 %
23 min	22.86 °C	42.91 %
24 min	22.86 °C	42.82 %
25 min	22.86 °C	42.99 %
26 min	22.86 °C	43.07 %
27 min	22.86 °C	42.99 %
28 min	22.86 °C	43.07 %
29 min	22.86 °C	42.91 %
30 min	22.86 °C	42.99 %

Příloha Y – Kompaktní disk s firmwarem, dokumentací a elektronickou verzí práce