ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Sonda pro sledování podmínek převozu orgánů

Organ Transportation Conditions Sensoring

Diplomová práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Studijní obor: Elektronika

Vedoucí práce: Ing. Vít Záhlava, CSc.

Bc. Jiří Valek

Praha 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. V A L E K Jiří**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Elektronika

Název tématu: **Sonda pro sledování podmínek převozu orgánů**

Pokyny pro vypracování:

1.Prostudujte problematiku biologikých podmínek převozu orgánů a s tím souvisejících elektronických čidel a sezorů.
2. Navrhněte obvodové elektrické schéma zapojení sondy s vybranými senzory.
3. Navrhněte desku plošného spoje.
4. Realizujte funkční obvod.
5. Navrhněte potřebné programové vybavení.

Seznam odborné literatury:

[1] Vobecký J., Záhlava V.: Elektronika – součástky a obvody, principy a příklady, Třetí rozšířené vydání, Grada Publishing, Praha 2005
[2] Záhlava, V. : OrCAD 10, Grada Publishing, Praha 2004
[3] Záhlava, V. : Návrh a konstrukce desek plošných spojů, BEN, Praha 2011
[4]Katalogové a aplikační listy příslušných elektronických součástek

Vedoucí: **Ing. Vít Záhlava, CSc.**

Platnost zadání: 31. 8. 2015

L.S.

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 29. 1. 2014

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Vítu Záhlavovi, CSc za odborné vedení, pomoc a trpělivost při psaní diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a blízkým za podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze literaturu uvedenou v přiloženém seznamu. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 12. března 2014 . . . . . .

Abstrakt

V této diplomové práci se zabývám návrhem a následnou konstrukcí obvodu sondy pro sledování podmínek převozu orgánů. Mým cílem bylo sestrojit zařízení, které bude monitorovat důležité veličiny pro zajištění životaschopnosti orgánů. Základními požadavky jsou snadná manipulace, minimální rozměry, spolehlivost měření a zasílání údajů.

Klíčová slova

Sledovací sonda, senzor, mikrokontrolér, orgán, měření

Abstract

In this diploma thesis, i am looking into a design and following construction of organ transportation condition sensoring unit. My aim was to create device that will monitor variables important for organs viability. The basic requirements are, it`s easy control, minimum dimensions, reliability of measurements and data sending.

Keywords

Conditions sensoring, sensor, microcontroller, organ, measurement

Obsah

Seznam symbolů a zkratek **8**
Seznam obrázků **10**
Seznam tabulek **11**
1 Úvod **12**
2 Teoretická část **13**
2.1 Transplantační program v ČR 13
2.2 Podmínky převozu lidských orgánů 14
2.2.1 Životaschopnost jednotlivých orgánů 15
2.3 Mikrokontrolér 16
2.3.1 Systém hodinového taktu 16
2.3.2 Paměťový prostor 17
2.3.3 Moduly mikrokontoléru: 19
2.3.4 Vstupně/ výstupní porty 21
2.4 Mikrosystémy 22
2.4.1 Základní parametry mikrosystémů 22
2.4.1.1 Statické parametry 23
2.4.1.2 Dynamické parametry 24
2.4.2 Mikro-elektro-mechanické systémy (MEMS) 25
2.4.2.1 Akcelerometry 25
2.4.2.2 Tlakové senzory 27
3 Praktická část **29**
3.1 Přehledový výběr hlavních součástek 30
3.2 Mikrokontrolér v praxi 33
3.2.1 Využití a nastavení systému hodinového taktu 34
3.2.2 Využití a nastavení modulů mikrokontoléru: 34
3.3 Li-pol akumulátor 37
3.4 Obvod nabíjení akumulátoru 38
3.5 Napájecí zdroj 39
3.5.1 Obvod ovládání napájení senzorů 40
3.6 Měřící část 41
3.6.1 Obvod měření napětí akumulátoru 41
3.6.2 Senzor měření atmosférického tlaku LPS331 42
3.6.3 Senzor měření osvětlení APDS 9300 43
3.6.4 Senzor měření vlhkosti a teploty SHT25 45
3.6.5 Akcelerometr LSM303 46
3.7 Blok GPS 47
3.7.1 GPS modul 47
3.7.2 Nízkošumový vysokofrekvenční zesilovač (LNA) 48
3.7.3 Anténa 49
3.8 GSM/GPRS modul 50
3.8.1 Napájení a komunikace s MCU 51
3.8.2 SIM karta 52
3.8.3 Anténa pro GSM 52
3.9 Návrh a výroba desky plošných spojů 53
3.9.1 Osazení součástkami 55
3.9.2 Programování mikrokontroléru 55
3.9.3 Program pro mikrokontrolér 56
4 Oživení a ověření funkčnosti **59**

5 Závěr **64**
Použitá literatura **65**
Přílohy ..... **I**
Příloha A - Celkové schéma zapojení sondy I
Příloha B - Filmy DPS V
Příloha C - Fotografie zařízení X
Příloha D - Naměřené průběhy XII
Příloha E – Seznam použitých součástek XIII

Seznam symbolů a zkratek

A/D	analogově digitální
CD	compact disc
CMOS	complementary metal oxide semiconductor
DCO	digitally controlled oscillator
DPS	deska plošných spojů
EEPROM	electrically erasable programmable read-only memory
ESD	electrostatic discharge
FLASH	elektricky programovatelná paměť s libovolným přístupem
FLL	frequency locked loop
FN	fakultní nemocnice
g	gravitační zrychlení (9,823 m·s-2)
GND	ground
GPS	global positioning systém
GSM	global system for mobile communications
I/O	input/output
I2C	inter integrated circuit
IKEM	institus klinické a experimentální medicíny
ISP	in system programming
JTAG	join test actio group
LED	light emitting diode
LGA	land grid array
Li-pol	lithium-polymerový akumulátor
LNA	low noise amplifier
MCU	microcontroller unit
MEMS	micro electro mechanical systém
MOSFET	metal oxide semiconductor field effect transistor
NiCd	nikl-kadmiový akumulátor
NiMH	nikl-metal hydridový akumulátor
PC	personal computer
PCB	printed circuit board
PLL	phase-locked loop

RAM	random access memory
RH	relative humidity
RISC	reduced instruction set computer
ROM	read-only memory
SAR	successive approximation
SIM	subscriber identity module
SMD	surface mount device
SMS	smart messaging system
SMT	surface mount technology
SPI	seriál peripheral interface
THT	through hole technology
TTL	transistor-transistor-logic
UART	universal asynchronous receiver/transmitter
USB	universal seriál bus
VF	vysokofrekvenční

Seznam obrázků

Obr. 1: Rozmístění transplantačních center v ČR (zdroj [22]) 13
Obr. 2: Rozdělení adresového prostoru u řady MSP430 a MSP430X (zdroj [12]) 17
Obr. 3: Znázornění vstupních kanálů a jádra A/D převodníku (zdroj [12]) 20
Obr. 4: Princip činnosti akcelerometrů a jeho ekvivalentní schéma (zdroj [4]) 26
Obr. 5: Princip činnosti akcelerometrů a jeho ekvivalentní schéma (zdroj [4]) 28
Obr. 6: Blokové schéma obvodů řízení a jejich napojení na výkonovou část 30
Obr. 7: Závislost maximální frekvence hodinového signálu na napájecím napětí (zdroj [12]) 34
Obr. 8: Blokové znázornění navrhnuté I^2C sběrnice 35
Obr. 9: Vstupní obvody USB sběrnice 37
Obr. 10: Graf závislosti energetické hustoty na hmotnosti a objemu akumulátorů (zdroj [21]) 38
Obr. 11: Doporučená nabíjecí charakteristika Li-pol akumulátorů (zdroj [21]) 39
Obr. 12: Obvod ovládání napájecího napětí senzorů 40
Obr. 13: Obvod měření napětí akumulátoru 42
Obr. 14: Spektrální citlivost obou kanálů senzoru (zdroj [13]) 43
Obr. 15: Spektrální citlivost lidského oka (zdroj [23]) 44
Obr. 16: Vnitřní uspořádání GPS přijímače (zdroj [19]) 48
Obr. 17: Směrové charakteristiky antény (zdroj [17]) 50
Obr. 18: Vnitřní uspořádání GSM modulu (zdroj [18]) 51
Obr. 19: Návrh vedení o impedanci 50Ω v aplikaci AppCAD 54
Obr. 20: Vývojový diagram základního programu 57
Obr. 21: Vývojový diagram podprogramu přerušení 58
Obr. 22: Záznam teploty senzorem SHT25 60
Obr. 23: Záznam relativní vlhkosti vzduchu senzorem SHT25 60
Obr. 24: Záznam tlaku vzduchu senzorem LPS331 61
Obr. 25: Měření lineárního zrychlení akcelerometrem LSM303 61
Obr. 26: Zobrazení údajů z GPS přijímače 63
Obr. A.1: Celkové schéma zapojení (strana 1) I
Obr. A.2: Celkové schéma zapojení (strana 2) II
Obr. A.3: Celkové schéma zapojení (strana 3) III
Obr. A.4: Celkové schéma zapojení (strana 4) IV
Obr. B.1: Osazovací plán DPS strana TOP V

Obr. B.2: Osazovací plán DPS strana BOTTOM V
Obr. B.3: Filmy spojů a pájecích plošek strany TOP VI
Obr. B.4: Filmy spojů a pájecích plošek strany BOTTOM VI
Obr. B.5: Filmy nepájivé masky strany TOP VII
Obr. B.6: Filmy nepájivé masky strany BOTTOM VII
Obr. B.7: Filmy pro nanášení pájecí pasty TOP VIII
Obr. B.8: Filmy pro nanášení pájecí pasty BOTTOM VIII
Obr. B.9: Filmy servisního potisku strany TOP IX
Obr. C.1: Fotografie sondy v provozu X
Obr. C.2: Fotografie zadní strany DPS X
Obr. C.3: Fotografie z výroby XI
Obr. C.4: Fotografie osazovaní DPS pomocí manipulátoru XI
Obr. D.1: Měření na sběrnici UART (komunikace s GPS) XII
Obr. D.2: Měření na sběrnici I^2C XII

Seznam tabulek

Tab. 1: Shrnutí požadovaných parametrů 29
Tab. 2: Porovnání parametrů senzorů tlaku 31
Tab. 3: Porovnání parametrů senzorů osvětlení 31
Tab. 4: Porovnání parametrů senzorů vlhkosti a teploty 32
Tab. 5: Porovnání parametrů GPS modulů 33
Tab. 6: Porovnání parametrů GSM modulů 33
Tab. 7: Přehled maximální spotřeby obvodů 39
Tab. 8: Naměřené údaje senzorem APDS-9300 62

Tab. E.1: Seznam použitých součástek XIV

1 Úvod

Ve firmě Papouch s.r.o., kde pracuji, se objevil požadavek na vývoj zařízení, které by mělo sledovat přepravní box s orgány a monitorovat parametry nezbytné k zajištění životaschopnosti biologického materiálu. Zjištěné údaje by měly být odesílány příslušné osobě, která převoz orgánů bude sledovat. Tento projekt mně velmi zaujal, a proto jsem se rozhodl, že na zařízení budu pracovat.

Prostudoval jsem způsob a biologické podmínky převozu orgánů. Všechny parametry zařízení jsem dodatečně konzultoval se zadavatelem.

Jelikož od zařízení je požadováno velké množství funkcí, velmi nízká spotřeba a minimální rozměry, rozhodl jsem se pro řízení chodu využít mikrokontrolér. Při jeho výběru a následném programování mi velmi pomohl povinný předmět Mikroprocesory a mikropočítače (A2M99MAM). Dále bude nutné navrhnout obvodové schéma sondy a také desku plošných spojů. Pravidla návrhu plošných spojů jsou značně náročná, proto jsem si zapsal volitelný předmět Principy a pravidla elektronického návrhu (A0B34PPN), kde bych se měl s touto problematikou seznámit.

Pro realizaci výrobku bych rád využil součástky SMD, protože je to dnes nejrozšířenější technologie pro sériovou výrobu. Takto se velmi zmenší rozměry výsledného zařízení a urychlí se osazování a celková výroba.

Na závěr úvodu bych rád nastínil strukturu mé diplomové práce. V teoretické části rozeberu převoz orgánů, biologické podmínky a životaschopnost jednotlivých orgánů. Dále se zaměřím na mikromechanické senzory, které ve své práci využiji. Popíši jejich funkci, vnitřní strukturu a také výhody a nevýhody. V praktické části se budu zabývat návrhem obvodů sondy a poté realizací celého zařízení. Také zde zmíním důležité parametry použitých součástek. Nakonec zařízení oživím, otestuji a ověřím jeho funkci v praxi.

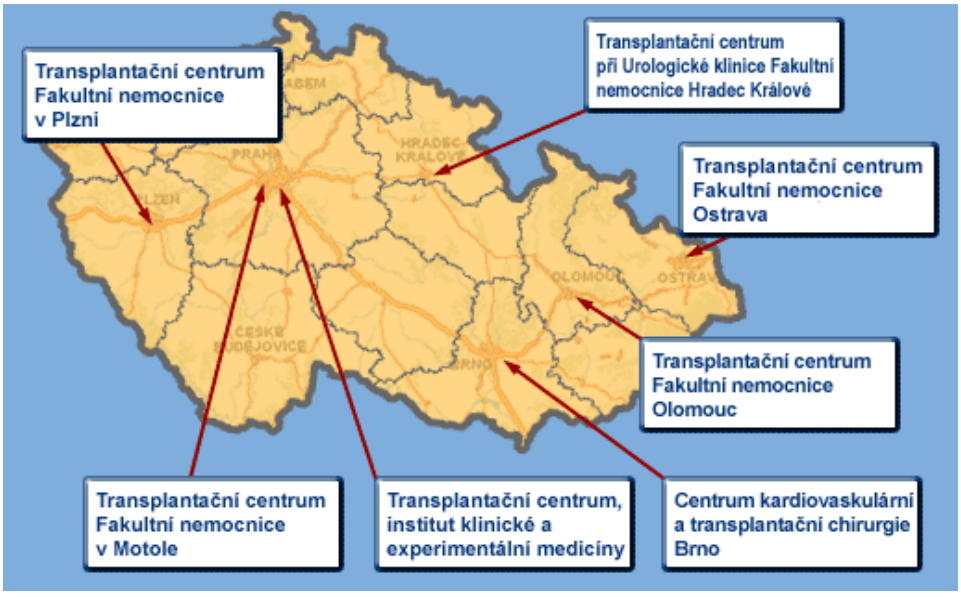
2 Teoretická část

V této části práce popíši podmínky a způsob převozu lidských orgánů. Zaměřím se na parametry pro udržení jejich životaschopnosti. Dále budou zmíněny základní typy mikromechanických senzorů, jejich princip a také vlastnosti. Také popíši použitý mikrokontrolér.
Informace byly čerpány z [4], [5], [6], [12], atd.

2.1 Transplantační program v ČR

Transplantační program je v ČR organizován na klasickém regionálním principu s centrálním koordinačním střediskem. V současné době je u nás sedm Transplantačních center, mezi které patří:

- IKEM Praha (transplantace ledvin, srdce, jater, slinivky břišní),
- FN Motol Praha (transplantace dětských ledvin, plic),
- FN Plzeň (transplantace ledvin),
- FN Hradec Králové (transplantace ledvin),
- FN Ostrava (transplantace ledvin),
- FN Olomouc (transplantace ledvin),
- CKTCH FN Brno (transplantace ledvin, jater, srdce), [9].



Obr. 1: Rozmístění transplantačních center v ČR (zdroj [22])

2.2 Podmínky převozu lidských orgánů

Přeprava orgánů probíhá podle přesně stanovených kritérií, která by měla minimalizovat ischemický čas a předcházela poškození orgánů. Zabalené orgány se přepravují v kontejneru, který je vhodný pro přepravu biologického materiálu a který zajišťuje jakost a bezpečnost přepravovaných orgánů. Pro převoz odebraných orgánů musí být vytvořeny takové pracovní postupy, které zajistí, že bude zachována integrita orgánu během převozu a vhodná doba převozu.

Přepravní nádoby používané k převozu orgánů musí obsahovat identifikační údaje poskytovatele zdravotních služeb, u kterého byl proveden odběr, v rozsahu název, adresa a kontaktní telefonní číslo, sdělení, že balení obsahuje orgán, s uvedením druhu orgánu a popřípadě jeho umístění v těle dárce vlevo nebo vpravo a s nápisem „MANIPULOVAT OPATRNĚ“ a doporučené převozní podmínky, včetně pokynů pro uchovávání nádoby při vhodné teplotě a poloze, bezpečnostními pokyny a (případně) metodou chlazení, [Sbírka zákonů č. 111 / 2013 s. 1219].

Koordinátor zajišťuje transport pomocí spolupráce se Zdravotnickou záchrannou službou (převoz sanitními vozy) a v opodstatněných případech (např. doprava na velkou vzdálenost nebo zhoršené podmínky na pozemních komunikacích) využívá koordinátor Policii ČR při dopravě vrtulníky nebo Armádu ČR pro transport vrtulníky či letadly. Okamžitě po odběru se orgán asepticky zabalí a je připraven k transportu. Obvykle je chráněn třemi plastovými vaky. V prvním vaku je samotný orgán uložen v konzervačním roztoku. Druhý vak je naplněn fyziologickým roztokem sledovou tříští a třetí vak je prázdný. Takto ošetřený orgán se vloží do další nádoby a do sterilního chladícího transportního boxu sledovou tříští. Ke každému orgánu je nutné přibalit zkumavku s nativní krví, část sleziny a vzorek z lymfatických uzlin. Nyní je možné orgán odvézt do transplantačního centra, [11].

2.2.1 Životaschopnost jednotlivých orgánů

Životaschopnost jednotlivých orgánů je různá a je závislá na schopnosti buněk orgánu odolávat ischemii. Ischemie se dělí na teplou a studenou.

- **Studená ischemie** je doba od podchlazení orgánu do zahájení reperfuze. Kromě hypotermie se k ochraně orgánů používají speciální konzervační a vyživující roztoky, které brání vzniku tkáňového otoku. Tolerovaná doba studené ischémie se liší podle druhu orgánu, u ledvin je to doba 24 - 36 hod, pro játra platí 12 - 18 hod, pro srdce, plíce a ostatní orgány platí doba do 5 hod.
- **Teplá ischemie** je doba od zastavení krevního oběhu v odebíraném orgánu do jeho podchlazení, [10].

U všech orgánů platí, že doba teplé ischemie daleko více snižuje životaschopnost než ischemie studená (při teplotě orgánu okolo 4 ºCelsia, při které je orgán transportován, se snižuje buněčný metabolismus a tím i spotřeba kyslíku).

Čas bezpečné konzervace orgánu ve studeném konzervačním roztoku je u každého orgánu různý. U srdce je doba studené ischemie přibližně 4 maximálně 6 hodin. Plíce mohou za ideálních podmínek tolerovat studenou ischemii trvající až 8 hodin. Orgány dutiny břišní odolávají ještě déle. Játra je možné transplantovat během doby studené ischemie do 18 hodin, slinivku břišní a tenké střevo do 12 hodin a ledviny až do 24 hodin, [11].

2.3 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér je integrovaný obvod, který se chová jako malý počítač. Obsahuje všechny základní části na jednom čipu. Mimo samotné výpočetní jednotky obsahuje také FLASH a RAM paměti a další pomocné části, jako vstupně-výstupní porty, A/D převodník, systém hodinového taktu, časovače a mnoho dalších.

Hlavním důvodem, proč jsou tyto součástky tak rozšířené a velmi používané je jejich všestrannost a univerzálnost. Jeden takovýto obvod lze využít jak k řízení domácích spotřebičů, tak v průmyslu k ovládání různých robotů a automatů. Další jejich nesporná výhoda je ve velmi nízké spotřebě. Ta je řádově jednotky mikrowattů. Proto se hodí zejména pro zařízení napájená bateriemi. A v neposlední řadě i jejich stále se snižující cena a zvyšující se výkonnost.

Dále se zaměřím na mikrokontrolér MSP430F5659 z řady MSP430 od výrobce Texas Instruments. Celá tato řada mikrokontrolérů vyniká svou velmi malou spotřebou a velmi krátkým časem potřebným k probuzení z režimu spánku. Ten je typicky menší jak 1 μs. To umožňuje procesoru se rychle probudit, vykonat požadované operace a znovu přejít do režimu spánku. Řada kontrolérů MSP430 je založena na 16 - bitové architektuře typu Von Neumann. Proto je šířka programového i datového slova 16 bitů. A Von Neumannova architektura znamená, že datová i programová paměť jsou připojeny ke stejným sběrnicím. Tedy jsou odděleny pouze různým rozsahem adres. To znemožňuje paralelní přístup k oběma pamětem současně a využívá se tak pomalejší sekvenční přístup. Na druhé straně je architektura jednodušší a s programovými slovy se zachází stejně jako s datovými. Lze proto například jednoduše kopírovat část kódu programu do datového prostoru. Dále je zde implementována redukovaná instrukční sada (RISC), díky které je mikropočítač jednoduchý a lze program dobře optimalizovat. U tohoto typu obsahuje 27 základních instrukcí jádra a dalších 24 emulovaných.

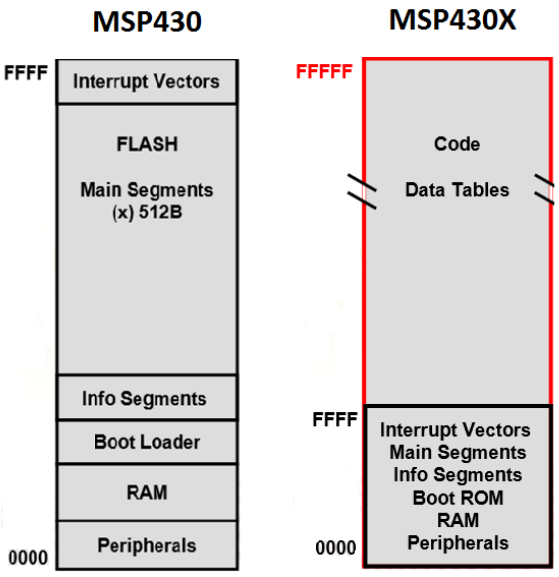
2.3.1 Systém hodinového taktu

V první řadě je to celý systém hodin, který se stará o taktování jádra a periferií. Zdroj hodinového taktu je nezbytný, protože podle jeho rychlosti se poté vykonávají jednotlivé instrukce. Maximální rychlost, na kterou je možné výpočetní jádro taktovat je v tomto případě 20 MHz. Zde je nutné zmínit, že uvnitř procesoru se nacházejí 3 linky pro rozvod hodin, z nich každé je možné nastavit jinou frekvenci. MCLK je základní a užívá se jako zdroj hodinového taktu pro jádro. SMCLK a ACLK jsou poté využívány pro periferie a jako sekundární zdroj o jiné frekvenci. Hodinový takt je

možné získat několika způsoby. K dispozici jsou 3 interní oscilátory. Tyto se hodí spíše pro méně náročné aplikace, kde nejsou kladeny velké nároky na přesné časování, protože se u nich více projevuje teplotní a napěťová závislost. První je VLO (very low power, low frequency oscillator) s frekvencí 10 kHz určený pro úsporný provoz. Druhý z nich je taktovaný na 32768 Hz a je možné ho také využít jako zdroj signálu pro frekvenční závěs. Poslední z nich DCOCLK je digitálně řízený oscilátor, který je součást frekvenčního závěsu. Ten lze kalibrovat a stabilizovat pomocí FLL. Dále je možné zapojit jeden ze dvou externích oscilátorů XT1 a XT2. Ty využijeme v případě velkých nároků na přesnost a stabilitu hodin. Externí oscilátor XT2 je navíc nutné osadit v případě, že budeme využívat USB řadič implementovaný na mikrokontroléru. Oba externí oscilátory lze opět využít jako zdroj pro FLL.

2.3.2 Paměťový prostor

Druhou důležitou částí je paměťový prostor. Mikrokontrolér je založen na již zmíněné Von Neumanovo architektuře z čehož vyplývá, že paměti pro data a program jsou napojené na stejné sběrnice a jsou mapovány do jednoho spojitého prostoru. Nevyužívá se tedy oddělených sběrnic pro program a data jako v případě Harvardské architektury. Řada mikrokontrolérů MSP430 obsahuje 16-bitovou adresovou a 16-bitovou datovou sběrnici, takže je schopna adresovat až 64 kB paměti. Mnou použitý MSP430F5659 patří do mírně upravené řady MSP430X. Ta využívá 20-bitovou adresovou a 16-bitovou datovou sběrnici a je tak schopná adresovat až 1 MB paměti. Rozložení datového prostoru u obou těchto verzí je na obr. 2.



Obr. 2: Rozdělení adresového prostoru u řady MSP430 a MSP430X (zdroj [12])

Programová paměť

Jedná se o paměť typu FLASH s velikostí 512 kB, tudíž do ní lze uložit až 256 000 jednoslovných instrukcí o velikosti 16 bitů. V mikrokontroléru je implementován 20-bitový programový čítač, který by byl schopný adresovat až 1Mbyte paměti. Jeho hodnota udává, kde v paměti programu se právě nacházíme a jaká instrukce je vykonávána. Obsažen je i stack pointer, neboli ukazatel na zásobník. Sem se při volání nějaké funkce a odskoku v programu uloží aktuální pozice, abychom se na ni mohli později vrátit. Od adresy 0xFFFFh následují vektory přerušení, z nich nejdůležitější je RESET vektor. Zde se začíná vykonávat program a sem se i skočí při resetu procesoru. Zbylé vektory přerušení jsou pro komunikační periferie, porty, časovače a další. Adresový prostor pod vektory je již obsazen programovou pamětí, dále informačními segmenty, pamětí RAM a registry pro ovládání periferií. Prostor od vektorů výše je plně obsazen zbylou pamětí pro program.

Datová paměť

Do této paměti se ukládají proměnné pro různé výpočty a další informace, které se často mění. Jedná se o volatilní paměť typu SRAM, to znamená, že data jsou v ní uchovávána, jen pokud jsou paměťové buňky napájeny. Jakmile je odpojena od napájení, všechny informace se smažou. U paměti typu SRAM jsou jednotlivé buňky tvořeny vždy dvěma tranzistory, které jsou zapojeny jako bistabilní klopný obvod. Obsah buněk není nutné periodicky obnovovat. Z toho vyplývá malá spotřeba při použití CMOS technologie, ale také vyšší cena než u dynamických pamětí. Paměť je zde rozdělena do 4 sektorů, každý o velikosti 16 kB. Celkem je tedy možné využít až 64 kB paměti. Lze také využít samostatný blok 2 kB RAM primárně určený pro USB.

Informační segment

Mikrokontrolér obsahuje také 4 segmenty po 128 bytech FLASH paměti určené pro ukládání dat které není třeba často měnit, ale je u nich požadavek zachovaní i po odpojení napájení. Může se jednat o různá sériová čísla, hesla, adresy, počet spuštění zařízení, atd.

Boot Loader

Poslední paměť je také typu FLASH. Jde o 4 segmenty po 512 bytech. Tato paměť je ale zamčená a je tedy uživatelsky neměnná. Je v ní nahrán malý program nazvaný Boot Loader, který nám umožňuje komunikovat s okolím prostřednictvím sériového rozhraní nebo USB sběrnice. Využívá se pro jednoduché programování datové i programové paměti. Lze tedy přehrát a změnit

program, který má mikrokontrolér vykonávat jen za použití běžného PC. Není potřeba specializovaný JTAG programátor. Aby byla komunikace zabezpečena, je přenos dat chráněn uživatelským heslem.

2.3.3 Moduly mikrokontoléru:

A/D převodník

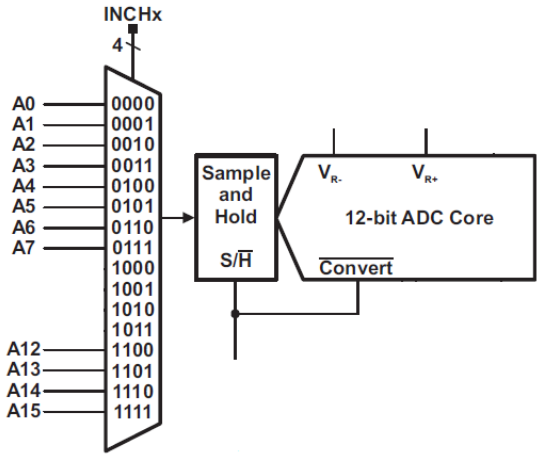
První důležitý modul je integrovaný 12 bitový analogově digitální převodník. Jedná se o převodník s postupnou aproximací (SAR). Jako vstup slouží 12 individuálně nastavitelných pinů na procesoru. V mikrokontroléru je jen jedno jádro převodníku, ale lze ho multiplexerem připojovat na jednotlivé vstupy. Takže se chová vlastně jako 12 A/D převodníků. Samozřejmě se při využití více kanálů snižuje maximální rychlost, kterou jsme schopni vstupy vzorkovat. Ta je větší než 200 000 vzorků za sekundu. Zjednodušené schematické znázornění vstupů, vzorkovací části a jádra převodníku je na obr. 3.

A/D převodník vyžaduje pro svou funkci zdroj referenčního napětí. Máme několik možností. Využít velmi přesnou nastavitelnou vnitřní referenci 1,5 V, 2 V a 2,5 V. Nebo jako referenci využít napájecí napětí kontroléru, případně připojit externí referenci. Od přesnosti a stability napěťové reference se odvíjí i přesnost měření. Výsledek převodu se ukládá do oddělené vnitřní paměti o velikosti 16 x 12 bitů. Převodník je schopný sám plnit tuto paměť výsledky a až v okamžiku kdy je paměť plná upozornit procesor. Tím se velmi šetří výpočetní čas a také dosahuje velké vzorkovací rychlosti, protože není potřeba po každém převodu data zpracovávat.

Převodník je nutné správně nastavit. Především zvolit správně referenci, abychom maximálně využili rozsah převodníku. Nastavit druh převodu. Je možné zvolit jednorázový či opakovaný převod jednoho kanálu, ale i všech kanálů. Při volbě opakovaných převodů nastavit optimální rychlost vzorkování a také rychlost A/D převodu. Pokud využijeme maximální rozlišení převodníku 12 bitů, tak doba jednoho převodu (conversion time) je 13 hodinových taktů. Maximálně lze převodník taktovat na 5 MHz.

$$t_{CONVERT} = \frac{13 \times ADC12DIV}{f_{ADC12clk}} = \frac{13 \times 1}{5\ MHz} = 2{,}6\ \mu s$$

Ze vzorce vyplývá, že minimální doba jednoho převodu při rozlišení plných 12 bitů, je 2,6 µs. Doba získání jednoho vzorku (sampling time) je při jakémkoliv nastavení vždy 1000 µs a je dána dobou nabíjení vnitřního kondenzátoru. Celková doba získání jedné hodnoty je 3,6 µs.



Obr. 3: Znázornění vstupních kanálů a jádra A/D převodníku (zdroj [12])

Univerzální sériové komunikační rozhraní (USCI):

Jde o komunikační hardwarový modul, který podporuje různé funkční módy. Mikrokontrolér MSP430F5659 implementuje 2 tyto univerzální moduly. Modul označený A je možné nastavit jako klasické asynchronní sériové rozhraní (UART). Ke komunikaci využíváme 2 piny, RX pro příjem a TX pro vysílání. Typ přenosu je full duplex, je tedy možné současně komunikovat oběma směry. Toto rozhraní se po převedení na napěťové úrovně standardu RS232 používá hlavně pro komunikaci s osobními počítači. Jednoduchým přenastavením lze komunikovat také bezdrátově pomocí infračerveného záření. Toto rozhraní je ale dnes již na ústupu a je nahrazováno rozhraním Bluetooth případně ZigBee.

Další funkční režim je SPI (Serial Peripheral Interface). Tento typ rozhraní je podobný UART, ale přenos je již synchronní a je možné dosahovat mnohem vyšších rychlostí. Využívá se 4 vodičů a to MOSI, MISO, SS a SCLK. První dva vodiče jsou určeny pro duplexní přenos dat. SCLK jsou sériové hodiny podle kterých je celý přenos synchronizován. Na sběrnici je vždy jedno vedoucí zařízení MASTER, které ovládá podřízené SLAVE zařízení. To je pro komunikaci vždy aktivováno logickou úrovní L (log. 0) na vodiči SS.

Modul s označením B lze nastavit do režimu I^2C a SPI. Rozhraní I^2C (Inter-Integrated Circuit) je sběrnice vyvinutá firmou Philips. Pro přenos využívá pouze 2 vodičů SDA a SCL, tedy sériová data a hodiny. Sběrnice je typu multi-master, může na ní být připojeno více zařízení, které ovládají přenos dat. Pro řízení přenosu dat se využívá detekce kolize. Každé zařízení smí vysílat, jen pokud je sběrnice v klidovém stavu. Ten je v tomto případě charakterizován logickou úrovní H (log. 1). Jakmile začne zařízení vysílat, musí zpětně kontrolovat stav nastavené úrovně na sběrnici. Pokud se nastavený stav neshoduje se stavem přečteným, musí vysílání okamžitě ukončit. K zajištění spolehlivého přenosu je navíc využíváno potvrzování. Každý byte musí být potvrzen bitem ACK (acknowledge). Datový

přenos vždy začíná podmínkou START a končí podmínkou STOP. To jsou pevně definované stavy logické úrovně SDA a zároveň SCL. Adresace jednotlivých zařízení je zajištěna unikátním 7 bitovým sériovým číslem, které musí mít každé zařízení. Při začátku komunikaci je nejprve vyslána adresa obvodu, se kterým chceme komunikovat, a následně je možné zapisovat data.

USB (Universal Serial Bus)

Mikrokontrolér také obsahuje řadič univerzální sériové sběrnice neboli USB. Toto rozhraní je modernější alternativa k sériovému rozhraní UART. Oproti němu má větší šířku pásma a tím je dosahováno mnohem větších komunikačních rychlostí. Ta u nejmodernější verze 3.0 dosahuje až 5 Gbit/s. Princip komunikace je založen na rámcích, jejichž doba trvání je vždy 1ms. V rámci jsou pak zabaleny pakety o velikosti 8 nebo 256 byte, které jsou určeny pro více zařízení. Na sběrnici je vždy jen jedno zařízení typu Master a všechny ostatní jsou typu Slave. Tyto zařízení nikdy samy nezahajují komunikaci a vždy se jich dotazuje Master. Ten řídí i časovaní na sběrnici a všechny ostatní zařízení se s datovým tokem musí synchronizovat. Komunikační signály jsou u USB sběrnice verze 1.x i 2.0 řešeny jako jeden diferenciální pár s vodiči označenými D- a D+.

V mikrokontroléru je integrován řadič ve verzi 2.0 Full-speed, který dosahuje rychlosti 12 Mbit/s. Je možné využít až 8 vstupních a 8 výstupních endpointů. Napájení systému USB je nezávislé na napájení mikrokontroléru. V modulu je také obsažen samostatný 3,3V lineární regulátor, který je možné využít k napájení kontroléru. Dále je zde obsažen i 1,8V regulátor určený pro napájení fázového závěsu a fyzické vrstvy USB modulu. Přesný hodinový takt 48MHz pro vzorkování signálu na sběrnici USB je získáván právě z integrovaného PLL. Do fázového závěsu je zaveden signál z externího krystalového oscilátoruXT1 nebo XT2. Pro USB je v paměti RAM vyhrazen prostor 2kB jako vyrovnávací buffer.

2.3.4 Vstupně/ výstupní porty

Na mikrokontroléru lze pro vstup a výstup logických úrovní použít celkem 74 pinů. Ty se dělí na 10 portů nejčastěji po 8 bitech. Po restartu procesoru jsou všechny piny nastaveny jako vstupy, takže z nich lze číst logickou úroveň. Poté je možné nastavit piny jako výstupy, případně připojit integrované pullup a pulldown rezistory. Pin je v klidu přes jeden z těchto rezistorů připojen buď na kladné napájecí napětí (Vcc), nebo záporné napájecí napětí (GND). Na portech P1 a P2 je možné nastavit funkci vyvolání přerušení na náběžnou nebo sestupnou hranu měnící se logické úrovně. Většina vývodů je vnitřně spojena také s různými moduly v mikrokontroléru. Vhodným nastavením kontrolních registrů se tyto periferie připojují. Vypne se funkce I/O pinu a místo ní se vývod použije například jako sériová komunikační linka.

2.4 Mikrosystémy

Mikrosystém je označení pro množinu prvků, které mohou být mechanické, elektronické, elektrooptické nebo mohou mít obecnou fyzikální či biochemickou funkci. Také mohou obsahovat různý stupeň inteligence. Rozměry mikrosystému jsou už podle názvu v řádu jednotek μm až několik mm. Mikrosystém může integrovat mnoho částí, ať už senzory, různé obvody pro zpracování signálu, případně i akční členy (aktuátory).

Mikrosystémy obecně integrují 3 části a to:

- Senzory – ty slouží k měření daného signálu
- Inteligence – stará se o zpracování a interpretaci signálů
- Aktuátory – slouží k vykonávání dané činnosti

Senzory i aktuátory pracují v různých signálových doménách. Ty mohou být elektrické, mechanické, magnetické, biochemické, magnetické, záření případně teplotní. Vstupní doména signálů může být také jiná než výstupní. Pro využití v této práci nás bude zajímat především doména elektrická a mechanická.
Důvodů, proč jsou mikrosystémy dnes hojně rozšířené, je mnoho.

Mezi výhody lze zařadit:

- Miniaturizace
- Nízká spotřeba
- Nové funkce
- Monolitická integrace na čipu
- Spolehlivost, [4].

2.4.1 Základní parametry mikrosystémů

Každý mikrosystém je charakterizován vlastnostmi a parametry jako každá elektronická součástka. Na senzory i aktuátory zjednodušeně nahlížíme jako na systém se vstupem *x(t)* a výstupem *y(t)*. Aktuátor vytváří výstupní energii signálu *y(t)* pomocí energie signálu vstupního *x(t)*. Senzor funguje podobně, jen ke své funkci navíc vyžaduje další pomocnou energii x_d.

Rovnice popisující chování aktuátoru:

$$y(t) = F\big(x(t)\big)$$

Rovnice popisující chování senzoru:

$$y(t) = F\big(x(t) + x_d(t)\big)$$

Oba tyto systémy lze charakterizovat statickými a dynamickými parametry prostředí. Několik nejdůležitějších vlastností je uvedeno níže, [4].

2.4.1.1 Statické parametry

- **Převodní charakteristika** – vždy definuje vztah mezi vstupní a výstupní veličinou, tento vztah musí být vždy určen
  Popis vztahem:

  $$y(t) = S\,x(t),$$

  kde S je citlivost.

- **Linearita** – udává odchylku průběhu vstupní veličiny od ideálního průběhu přímky
  Popis vztahem:

  $$L[\%] = 100\,\frac{|y(x) - y_r(x)|_{max}}{y_{max} - y_{min}},$$

  kde $y_r(x)$ popisuje průběh referenční přímky a $y(x)$je skutečný průběh výstupní veličiny.

- **Zatěžovací charakteristika** – definuje chování výstupní veličiny při zatěžování (např. závislost výstupního napětí u senzoru v závislosti na odebíraném proudu)

- **Citlivost** – je dána jako poměr změny výstupní veličiny na změně vstupní veličiny v daném pracovním bodě
  Popis vztahem:

  $S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ v daném pracovním bodě

- **Přesnost** – udává relativní průměrnou chybu senzoru
  Popis vztahem:

  $$\varepsilon_a[\%] = 100\ \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_t}{\varepsilon_t},$$

kde ε_a označuje přesnost, x_m je měřená hodnota na výstupu a x_t je skutečná hodnota na výstupu.

- **Rozlišení** – znamená nejmenší změnu vstupní veličiny, která vyvolá detekovatelnou měřenou hodnotu
  Popis vztahem:
  $$R_{max}[\%] = 100\ \frac{\Delta x_{min}}{x_{max} - x_{min}},$$
  kde Δx_{min} značí nejmenší změnu vstupní veličiny, x_{max} a x_{min} jsou rozsah vstupní veličiny

- **Selektivita** – udává jak je senzor citlivý na jednu veličinu v prostředí, kde jich působí více
  Popis vztahem:
  $$S_\alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x_y} \text{ v daném pracovním bodě}$$

- **Pracovní rozsah** – je definován jako rozsah $x_{max} - x_{min}$ vstupní veličiny, která vytváří jednoznačně měřitelný výstupní signál

2.4.1.2 Dynamické parametry

- **Přenosová funkce** – je definována vztahem
  $$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)},$$
  kde X(s) a Y(s) jsou Laplaceovy transformace vstupní a výstupní veličiny se všemi počátečními podmínkami rovno nule.

- **Přechodová charakteristika** – popisuje průběh výstupní veličiny v závislosti v závislosti na čase při skokové změně vstupní veličiny

- **Frekvenční odezva** – udává změnu amplitudy a fáze výstupního signálu v závislosti na frekvenci vstupního signálu, [4].

2.4.2 Mikro-elektro-mechanické systémy (MEMS)

MEMS, neboli mikro-elektro-mechanické-systémy. Jsou to systémy, které spojují oblast mechanickou s oblastí elektrických signálů. Miniaturizace mechanických součástí přináší nové směry ve vědě a v oblastech, kde se konvenční mechanické součástky vyráběné klasickými obráběcími technologiemi neuplatní. Tyto mikromechanické součástky jsou menší, lehčí, rychlejší a také přesnější než součástky klasické velikosti. Bohužel s tím souvisí i nároky na výrobní prostředky. Musí se dodržet vysoká přesnost a návrh takových systémů vyžaduje přizpůsobivost návrháře, aby dokázal spojit mechanické součástky s řídící elektronikou. Z cenových důvodů je pak důležitá opakovatelnost a vysoká výtěžnost výroby. Do oblasti MEMS patří jak senzory, tak aktuátory. Ve své práci jsem však využil pouze senzory, proto se dále aktuátory nebudu dále zabývat, [4].

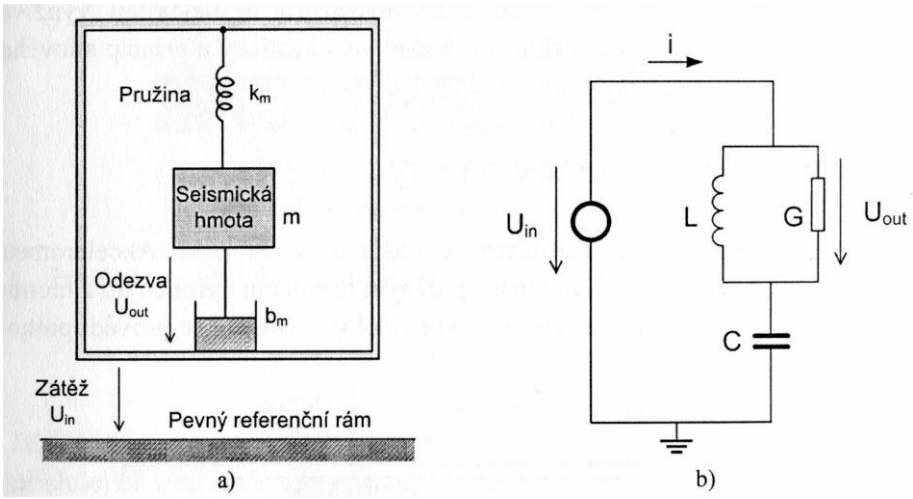
Všechny MEMS systémy pak využívají těchto principů:

- **Piezoelektrický jev**
- **Piezoodporový jev**
- **Bolometrický jev**
- **Magnetoodporový jev**
- **Hallův jev**
- **Seebackův a Peltierův jev**
- **Fotonové jevy v polovodičích**
- **Pyroelektrický jev**
- **Magnetostrikční a elektrostrikční jev**

2.4.2.1 Akcelerometry

Tyto mikrosenzory se využívají pro měření zrychlení. Dokáží vyhodnocovat jak dynamické zrychlení, tedy sílu vznikající při změně rychlosti pohybujícího se tělesa, tak statické zrychlení, tedy sílu vznikající působením zemské gravitace. Pomocí akcelerometru jsme tedy schopni detekovat změny náklonu (úhlu) měřením statického zrychlení, ale také různé otřesy, nárazy a zrychlení předmětů, které odpovídá dynamickému zrychlení. Pomocí získaných údajů je možné určit také rychlost, jako derivaci zrychlení přes čas a poté také dráhu jako derivaci rychlosti přes čas.

Akcelerometry většinou pracují na principu buzení hmotnostního elementu (seismické hmoty), který je v systému hmota-pružina-tlumení. Toto schéma je znázorněné na obr. 4.



Obr. 4: Princip činnosti akcelerometrů a jeho ekvivalentní schéma (zdroj [4])

Zde zátěžová síla $-m(d^2x_{in}/dt^2)$ pracuje v obvodu tlumeného harmonického oscilátoru, jehož kmity lze popsat rovnicí

$$m\frac{d^2x_{out}}{dt^2} + b_m\frac{dx_{out}}{dt} + k_m x = -m\frac{d^2x_{in}}{dt^2},$$

kde x_{out} je relativní posuv hmotného elementu proti pevnému rámu. Pak při konstantní akceleraci je posuv x_{out} přímo úměrný vstupní akceleraci a platí

$$x_{out} = \frac{m}{k_m}\frac{d^2x_{in}}{dt^2}$$

K ustálení soustavy dojde za čas $t > (b_m/m)$ a malá hodnota konstanty k_m zajišťuje dobrou citlivost senzoru, [4].

Kapacitní akcelerometr

Nejčastěji využívaný princip u akcelerometrů je právě kapacitní. Zde se měří výchylka seismické hmoty pomocí změny kapacity. Nejjednodušší podoba akcelerometru je rám s elektrodami a uprostřed rámu pružně uložená seismická hmota, na které jsou také elektrody. Pak pro takto mechanicky svázané elektrody platí vztah

$$C_1 = \frac{\varepsilon S}{x_1},\ C_2 = \frac{\varepsilon S}{x_2},$$

kde S je plocha elektrod a x_1 a x_2 udávají vzdálenost elektrod kondenzátorů C_1 a C_2. Jelikož posuv x_{out} je úměrný zrychlení, inverzní kapacita kondenzátorů je také úměrná zrychlení

$$\frac{\delta C}{C} = \frac{x_{out}}{x} \approx \frac{d^2x}{dt^2}$$

Pak pro malé hodnoty x_{out} je dán poměr kapacit vztahem

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{x_2}{x_1} \approx \frac{1 + \frac{x_{out}}{x_1}}{1 - \frac{x_{out}}{x_1}} \approx 1 + \frac{2x_{out}}{x_1}$$

Takto uspořádané akcelerometry, které měří poměr kapacit, odstraňují teplotní závislost dielektrické konstanty a plochy. Také mají proti piezoodporovým vyšší citlivost a stabilitu. Pro další zlepšení parametrů se v praxi používá více takto uspořádaných částí, které poté tvoří hřebenovou strukturu. A dále se pak integrují takovéto 3 struktury do jednoho obvodu pro měření zrychlení v osách x, y a z, [4].

2.4.2.2 Tlakové senzory

Tyto senzory jsou mikromechanickým ekvivalentem k běžným senzorům tlaku. Jejich princip je rovněž založen na výše popsaných jevech. Níže uvedu popis senzoru, založeném na kapacitním principu.

Tlakový senzor založený na kapacitním principu

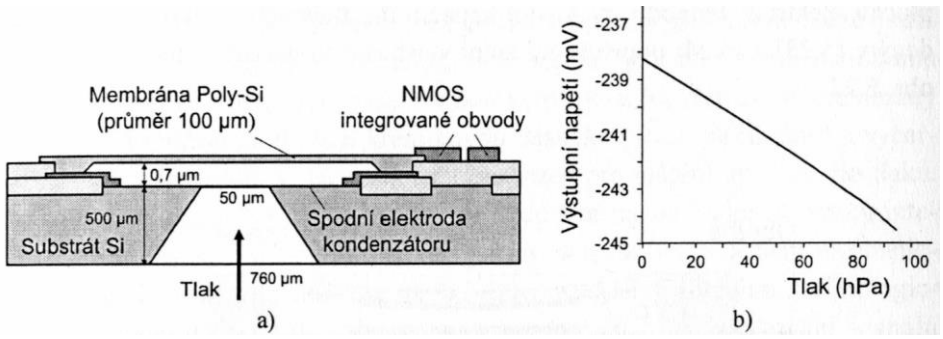
Tyto senzory jsou tvořeny křemíkovou strukturou s tenkou pružnou membránou tvořenou také křemíkem (monokrystalický i polykrystalický). Membrána má většinou kruhový tvar, protože vykazuje vyšší citlivost. Tyto senzory se tedy vyznačují vysokou citlivostí a nízkou teplotní závislostí.

Senzor tvoří dvě elektrody vzdálené několik μm. Jedna z elektrod je na pružné membráně a druhá je umístěna na křemíkovém substrátu. Mezi nimi je pak vzduchová mezera. Tlak poté působí na pružnou membránu, prohýbá ji a tím dochází ke změně vzdálenosti elektrod a zároveň ke změně kapacity. Tuto změnu lze vyjádřit vztahem

$$\Delta C = C - C_0 = \iint_S \frac{\varepsilon \, dx \, dy}{h_0 - z(x,y)} - \frac{\varepsilon S}{h_0},$$

kde C je kapacita při tlaku $p = p_{out} - p_{in}$, C_0 je kapacita při tlaku $p = 0$, S plocha elektrod, ε je permitivita, h_0 vzdálenost elektrod při nulovém tlaku a $z(x, y)$ je prohnutí membrány v místě souřadnic x a y, [4].

Takováto struktura se nejčastěji realizuje na jednom křemíkovém čipu, na který lze integrovat také další elektronické obvody pro úpravu a vyhodnocení údajů. Příklad takového senzoru a typická převodní charakteristika je na obr. 5.



Obr. 5: Princip činnosti akcelerometrů a jeho ekvivalentní schéma (zdroj [4])

3 Praktická část

V této části práce se budu zabývat především praktickým návrhem obvodů pro měření, řízení a odesílaní naměřených dat. Postupně zde popíši jednotlivé funkční bloky a součástky v nich použité. Na obr. 6 je znázorněno blokové schéma zapojení.

Při samotném návrhu zařízení jsem vycházel z požadavků, které byly dány podmínkami při převozu orgánů. Další požadavky a funkce, které by mělo zařízení vykonávat, pak byly doplněny zákazníkem. Při přepravě je nejdůležitější údaj teplota v přepravním boxu, která je doplněna o měření vlhkosti. Aby bylo možné určit, jak je s boxem manipulováno je nutné integrovat senzor pro měření lineárního zrychlení. Přepravní box by měl být během transportu zabezpečen a v žádném případě by se neměl otevírat. Pro tento případ je vhodné zařadit další senzor, který bude zjišťovat, zda se někdo nesnaží box otevřít. Dále je potřeba sledovat aktuální polohu, kde se právě box nachází. Všechny tyto údaje se mají odesílat operátorovi, který převoz sleduje. Zařízení by mělo vydržet v aktivním stavu vždy po dobu převozu, nejlépe však několik dní. V případě nízké kapacity akumulátoru by na tuto skutečnost mělo upozornit. V následující tabulce je shrnutí a upřesnění požadovaných parametrů.

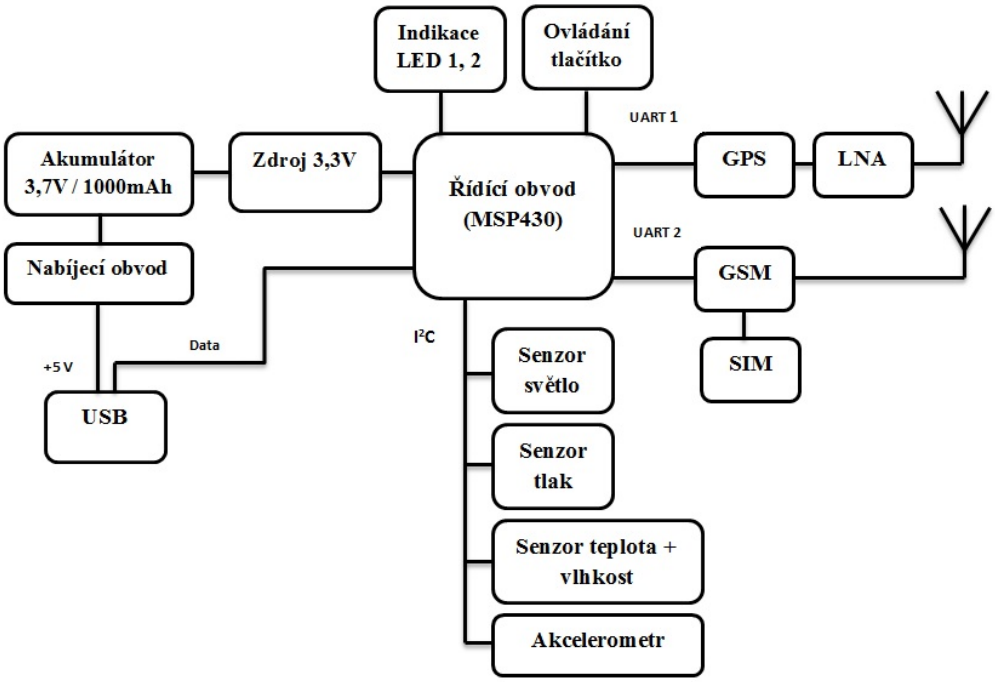
	Rozsah	**Rozlišení**	**Přesnost**
Teplota	-20 – +60 °C	0,1 °C	±1 °C
Vlhkost	20 – 80 %	0,1 %	±3 %
Tlak	300 – 1100 mbar	0,1 mbar	±5 mbar
Zrychlení	±4 g	0,1 g	0,2 g
Osvětlení	0 – 10000 lux	1 lux	orientační
Poloha	x	x	10 m
Napětí	3 – 4,5 V	0,1 V	0,1 V
Výdrž	min. 24 h		
Odesílání	Zprávy SMS		
Pracovní rozsah teplot	-20 – +60 °C		

Tab. 1: Shrnutí požadovaných parametrů

Aby se mi povedlo zkombinovat všechny tyto požadavky, rozhodl jsem se jako jádro celého zařízení použít mikrokontrolér. Ten je schopný obsluhovat všechny senzory a provádět různě přepočty

naměřených hodnot. Dále umožňuje přesné časování měření. S využitím dalších periferií je možné ovládat také moduly GSM a GPS.

Protože zařízení není třeba nijak nastavovat, zvolil jsem pro ovládání jedno mikro tlačítko. To slouží jen k zapnutí a aktivaci celé sondy.



Obr. 6: Blokové schéma obvodů řízení a jejich napojení na výkonovou část

3.1 Přehledový výběr hlavních součástek

V této kapitole uvedu svůj výběr nejdůležitějších součástek a senzorů. Parametry podle kterých jsem se rozhodoval a také ostatní důvody výběru. Při porovnání neuvádím další parametry jako teplotní drifty, offsety nebo šum, protože i při jejich zahrnutí byla výsledná přesnost v požadovaných mezích.

Mikrokontrolér

Mnoho firem v dnešní době mikrokontrolery vyrábí a proto lze v nabídce najít vždy alespoň jeden typ, který vyhovuje daným požadavkům. Velmi nízkou spotřebu mají jak MCU vyrobené firmou Texas Instruments, tak například STMicroelectronics ale i Microchip Technology. Požadované periferie také obsahují všechny moderní typy. A jejich cena je také velmi podobná.

Výsledné rozhodnutí však záviselo na mé znalosti a zkušenosti s programováním procesorů MSP430. Možnosti mikrokontrolérů jsou velmi rozsáhlé a tím také náročné na obsluhu. Naučit se pracovat s novým typem je tak otázka mnoha dní, nebo spíše měsíců práce. Proto jsem vybral typ, se kterým jsem se již seznámil a to MSP430F5659.

Tlakový senzor

Zde jsem se rozhodoval mezi 3 typy senzorů. Nejlépe vyhovující byl typ LPS331, který dosahuje velmi dobrých a vyhovujících parametrů vzhledem ke své ceně. Srovnání senzorů je v následující tabulce.

	LPS331	MPL115A1	MS561101BA03-50
Rozsah měření [mbar]	260 - 1260	500 - 1150	10 - 1200
Rozlišení [mbar]	0,02	1,5	0,012
Absolutní přesnost [mbar]	±2	±10	±3,5
Spotřeba [µA]	5,5	5	1
Rozměry [mm]	3x3x1	5x3x1,2	5x3x1
Cena [CZK] při 100ks	88	56	145

Tab. 2: Porovnání parametrů senzorů tlaku

Senzor osvětlení

Senzor osvětlení bude sloužit k měření intenzity, aby bylo možné určit, zda je zařízení již v přepravním boxu, případně zda se během přepravy neotevřelo. Přesnost senzoru tedy není kritická a měření je pouze orientační.

Vybíral jsem mezi dvěma senzory, které jsem zvolil z důvodu jednoduchého vyhodnocení měřených údajů a také minimálních rozměrů. Oba tyto senzory implementují systém měření a A/D převodu. Další výhodou je pak možnost informace o překročení nastavených mezí. Oba senzory vše splňují, a proto byla rozhodující cena. Srovnání parametrů je v následující tabulce.

	APDS-9300	ISL29003IROZ-T7
Rozsah měření [lux]	0 - 10000	0 - 64000
Rozlišení [lux]	0,01	0,02
Spotřeba [µA]	240	300
Rozměry [mm]	2,6x2,2x0,55	2,1x2
Cena [CZK] při 100ks	21	60

Tab. 3: Porovnání parametrů senzorů osvětlení

Senzor pro měření vlhkosti a teploty

Zde jsem se opět rozhodoval mezi dvěma senzory, které splnili dané požadavky na rozsah, rozlišení i přesnost měření a to jak u měření vlhkosti, tak u měření teploty. Oba senzory jsou navíc z výroby plně kalibrovány a není tak již potřeba dodatečná kalibrace celého zařízení. Rozhodující tak byla nakonec spotřeba a rozměry senzorů, které nejlépe splňoval senzor SHT25. Porovnání parametrů je opět v následující tabulce.

	SHT25		CC2A33	
	vlhkost	**teplota**	**vlhkost**	**teplota**
Rozsah měření	0 - 100%	-40 - +125 °C	0 - 100%	-40 - +125 °C
Rozlišení	0,04%	0,01°C	0,01%	0,01°C
Absolutní přesnost	±1,8%	±0,2°C	±2%	±0,3°C
Spotřeba [µA]	300		750	
Rozměry [mm]	3x3x1		6x4x2	
Cena [CZK] při 100ks	200		200	

Tab. 4: Porovnání parametrů senzorů vlhkosti a teploty

Senzor pro měření zrychlení a otřesů

Jako senzor pro měření otřesů je nejvhodnější použít mikromechanické akcelerometr. Požadované parametry by splňovalo mnoho senzorů. Zde jsem se však po konzultaci se zákazníkem rozhodl využít senzor, který v sobě integruje také magnetometr, tedy senzor pro měření magnetického pole. Takto je v budoucnu možné s příslušným programovým vybavením lépe určovat polohu zařízení. Možností také bylo použití dvou oddělených senzorů, ale to zvětšuje nároky na plochu DPS a také spotřebu. Použil jsem tedy jediný aktuálně dostupný a rozměrově vhodný senzor LSM303. Tento senzor splňuje požadavky na maximální rozsah měření, rozlišení a také přesnost.

GPS modul

Při výběru GPS modulu byl kladen důraz především na co nejmenší rozměry a spotřebu. Požadavek přesnosti určení polohy splňovalo mnoho modulů, ale jen dva z nich měly vhodné rozměry. Zvolil jsem typ Quectel L70, protože oproti konkurenci dosahuje vyšší citlivosti, rychlejšího určení polohy při prvním startu a také téměř poloviční spotřeby. Porovnání parametrů je v následující tabulce.

	Quectel L70	Simcom SIM08
Přesnost	< 2,5m	< 2,5m
Citlivost (tracking)	- 163 dBm	- 161 dBm
TTFF(cold start)	< 15s	< 35s
Spotřeba (tracking)	22mA @ 130dBm	41mA @ 130dBm
Rozměry [mm]	10,1x9,7x2,5	11,5x9,5x2,3
Cena [CZK] při 1ks	200	200

Tab. 5: Porovnání parametrů GPS modulů

GSM modul

Většina dostupných GSM modulů byla svými rozměry nevhodná pro takto kompaktní zařízení. Například modul SIM900 vyhovuje základnímu požadavku na odesílání SMS, bohužel na DPS by zabíral plochu 576mm^2. Po dlouhém výběru jsem přímo od výrobce Siera Wireless objednal aktuálně nejmenší modul na světě, který zabírá plochu pouhých 267mm^2. Cena je u obou modulů téměř totožná. Porovnání parametrů je v následující tabulce.

	WS6318	SIM900
Dual band	ano	ano
SMS	ano	ano
GPRS	ano	ano
Spotřeba (IDLE)	20mA	22mA
Rozměry [mm]	17,8x15x2,5	24x24x3
Cena [CZK] při 1ks	350	370

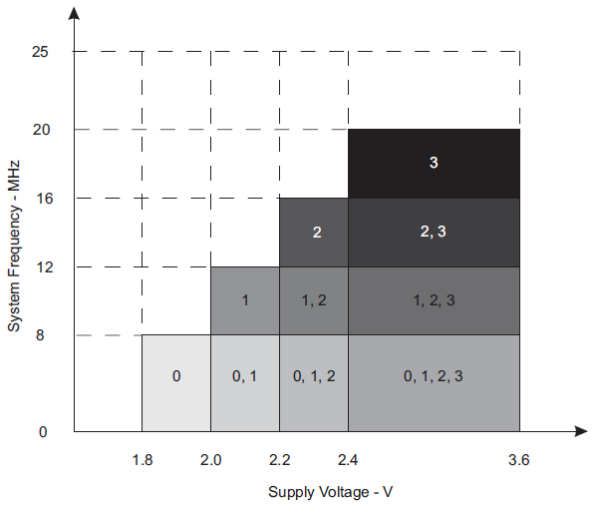
Tab. 6: Porovnání parametrů GSM modulů

3.2 Mikrokontrolér v praxi

Pro řízení celé sondy jsem využit mikrokontrolér od firmy Texas Instruments z řady MSP430. Konkrétně se jedná o typ MSP430F5659. Tento mikrokontrolér má řadu užitečných funkcí a vnitřních obvodů, které jsem uvedl v teoretické části. Nyní popíši způsob, jakým jsem periferie využil a jak jsem je nastavil.

3.2.1 Využití a nastavení systému hodinového taktu

Pro vykonávání programu a práci periferií je nezbytný systém hodinového taktu. V mé práci jsem se rozhodl využít rozsáhlých možností mikrokontroléru a jako zdroj taktu jsem zvolil jediný externí krystalový rezonátor o frekvenci 4 MHz připojený na vstup XT2. Tím jsem zajistil možnost použití USB řadiče. Počáteční přesnost rezonátoru je ±0.1% a teplotní stabilita lepší než ±0.08%. USB řadič si svým vlastním fázovým závěsem frekvenci automaticky zvýší až na požadovaných 48 MHz pro vzorkování sběrnice. Já frekvenci 4 MHz z rezonátoru zavedu do frekvenčního závěsu a zkalibruji vnitřní DCO oscilátor také na 4 MHz. Ten je poté využit k napájení všech 3 hodinových linek. Tímto způsobem je dosaženo přesného a stabilního zdroje hodinového signálu pro výpočetní jádro, časovače i pro komunikační periferie (I2C a UART). Použití nižší frekvence je výhodné, protože mikrokontrolér takto pracuje již od napájecího napětí 1,8V a zároveň má nízký proudový odběr. Ten je podle katalogového listu 295 µA/MHz. Graf závislosti maximální frekvence na napájecím napětí je znázorněn níže.



Obr. 7: Závislost maximální frekvence hodinového signálu na napájecím napětí (zdroj [12])

3.2.2 Využití a nastavení modulů mikrokontoléru:

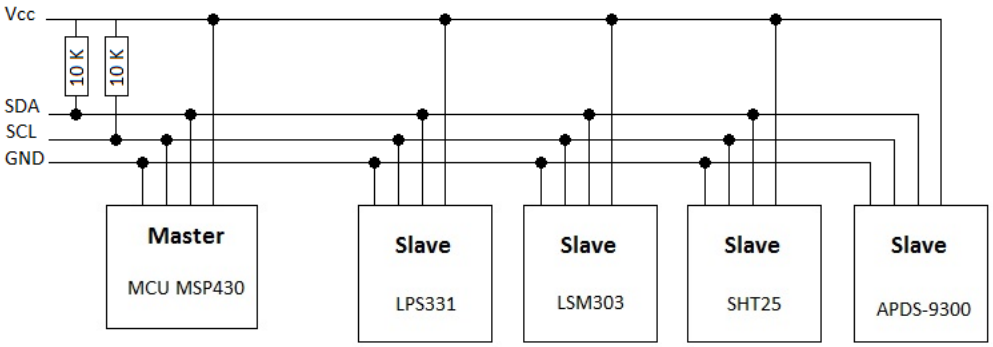
A/D převodník

Integrovaní 12 bitový A/D převodník typu SAR jsem ve své práci využil pro měření napětí akumulátoru. Jeho nastavení bude blíže popsáno v kapitole 3.6.1 Obvod měření napětí akumulátoru.

Univerzální sériové komunikační rozhraní (USCI):

Jde o komunikační hardwarový modul, který podporuje různé funkční módy. Mnou použitý mikrokontrolér implementuje 2 tyto univerzální moduly, které jsem blíže popsal v teoretické části práce.

Pro komunikaci s měřícími obvody jsem se rozhodl využít právě sběrnici I^2C. Hlavním důvodem bylo, že některé senzory mají jen toto rozhraní. Další výhoda však spočívá v použití minimálního počtu vodičů. Omezení, kterým je nižší rychlost, v tomto případě nevadí. Data se ze senzorů získávají periodicky, ale tato perioda je, vzhledem ke komunikační rychlosti, mnohem větší. Schematické znázornění sestavené I^2C sběrnice s připojenými senzory je na obr. 8. Sběrnici jsem nastavil pro 7 bitový přenos a komunikační rychlost zvolil 100 kHz.



Obr. 8: Blokové znázornění navrhnuté I^2C sběrnice

Ke komunikaci s GPS a GSM moduly je použita sběrnice UART. Tento typ rozhraní moduly podporují nativně, protože tyto obvody jsou určeny také jako samostatné zařízení pro přímou komunikaci s osobními počítači. Stačí jen převodník úrovně z TTL na RS232 a je možné pomocí jednoduchého textového protokolu komunikovat s obvody a ovládat jejich funkce přes PC.

Každý z modulů musí být připojen na samostatnou sériovou linku, protože zde neexistuje žádné adresování. Rozhraní je poté potřeba nastavit. GSM i GPS modul jsou z výroby nastaveny každý na jinou komunikační rychlost. Modul Quectel L70 je nastaven na 9600 baud a GSM modul WS6318 na 115200 baud. Ostatní parametry komunikace jsou shodné, tedy 8 datových bitů, žádná parita a jeden stop bit (také značeno jako 8-N-1).

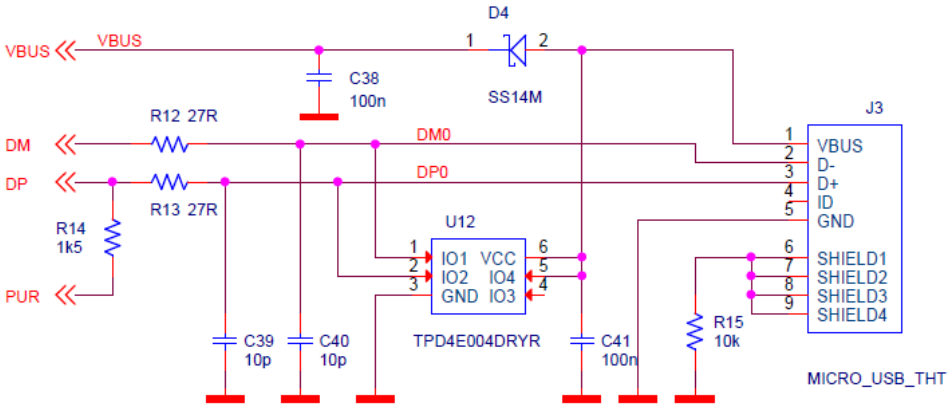
Sběrnice USB (Universal Serial Bus)

Do sledovací sondy jsem se rozhodl integrovat rozhraní USB. Nyní slouží pro jednoduché uživatelské přehráváni firmwaru sondy pomocí integrovaného boot loaderu. Je však možné USB využít pro případnou budoucí komunikaci s osobním počítačem. Takto půjde měnit různé konfigurační parametry sondy. USB rozhraní však slouží hlavně k nabíjení akumulátoru. Toto je velmi výhodné, neboť mikro USB konektor slučuje několik funkcí a šetří se cenné místo na desce plošných spojů. Dnes je stejným způsobem řešeno nabíjení většiny mobilních telefonů a dalších přenosných zařízení. Zapojení vstupních obvodů USB je znázorněno na obr. 9.

Napájecí napětí a signály jsou přivedeny přes konektor **J3**. Pro minimalizaci rozměrů jsem využil nejmenší dostupný USB konektor a to Micro-B. Pro montáž na DPS má 4 piny, které zároveň fungují jako stínění a proto jsem je spojil s GND na desce. Konektor je volně přístupný pro připojení kabelu a tak zde vzniká možnost přenosu statického náboje. Výboj by mohl přeskočit na kterýkoliv vstupní pin a hrozilo by zničení mikrokontroléru nebo stabilizovaného zdroje. Proto je co nejblíže konektoru umístěn ESD ochranný obvod **U12** určený přímo pro vysokorychlostní sběrnice. Toto ochranné pole TPD4E004 obsahuje na každém ze 4 vstupních pinů pár velmi rychlých diod, které statický náboj svedou na Vcc nebo GND. Obvod je schopný neutralizovat výboj způsobený přímým kontaktem o napětí až ± 8kV s délkou trvání několik ns.

Napájecí napětí z VBUS pinu, které podle specifikací USB musí být 5V ± 5% je vedeno přes ochrannou diodu **D4** a filtrační kondenzátor **C38** dále k napájecímu zdroji a mikrokontroléru. Jako vhodnou diodu jsem zvolil rychlou Schottky diodu SS14M. Ta má velmi malý úbytek v propustném směru přibližně 0,5V a maximální proud až 1,4A. Tato hodnota je dostačující, protože USB ve verzi 1.x i 2.0 dovoluje nejvyšší proudový odběr 500mA.

Komunikační signály jsou u USB sběrnice verze 1.x i 2.0 řešeny jako jeden diferenciální pár s vodiči označenými D- a D+. Tyto signály jdou přes ochranné rezistory **R12** a **R13** přímo do USB modulu integrovaného v MCU. Kondenzátory **C39** a **C40** minimalizují případné rušení na sběrnici. Rezistor R14 slouží jako softwarově ovládaný pull-up, který nastaví úroveň H (log. 1) na vodiči D+. Tímto nastavením rozpozná USB host připojené zařízení typu USB device.

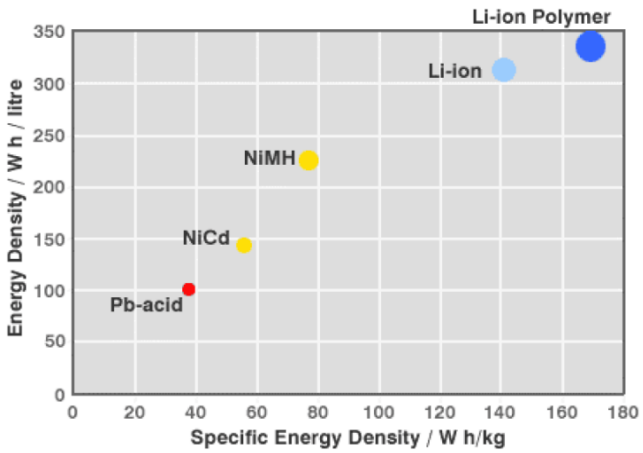


Obr. 9: Vstupní obvody USB sběrnice

3.3 Li-pol akumulátor

Sledovací sonda musí být z důvodu mobility nezávislá na elektrické síti. Pro napájení jsem proto zvolil akumulátor. Výdrž na jedno nabití baterie by měla být alespoň 24 hodin v aktivním režimu a váha samozřejmě co nejnižší. Na výběr máme akumulátory olověné, NiCd, NiMH, Li-Ion a nebo Li-pol. Rozhodoval jsem se podle níže uvedeného grafu. Z něho vyplývá, že nejlepší poměr uložené energie vzhledem ke hmotnosti a objemu mají akumulátory typu Lithium-polymer (Li-pol). Tento typ akumulátorů je nejvýhodnější pro přenosná zařízení také proto, že se u nich neprojevuje paměťový efekt. Jev známý především u typu NiCd, kdy je nutné akumulátor před každým nabitím nejprve úplně vybít. Pokud se tak neučiní, sníží se množství energie, které lze do článku uložit. Další výhodou je velmi nízké samovybíjení přibližně 5% za měsíc a také dlouhá životnost článků kolem 2000 nabíjecích cyklů.

Napájení sondy teda zajišťuje jeden článek Li-pol s nominálním napětím 3,7V a kapacitou 1000mAh. Rozměry jsem zvolil tak, aby přibližně odpovídaly velikosti DPS a vše se jako celek vešlo do vhodné krabičky. Rozměry jsou 47 x 28 x 7 mm (délka x šířka x výška). Teplotní rozsah od -20°C až do +45°C.



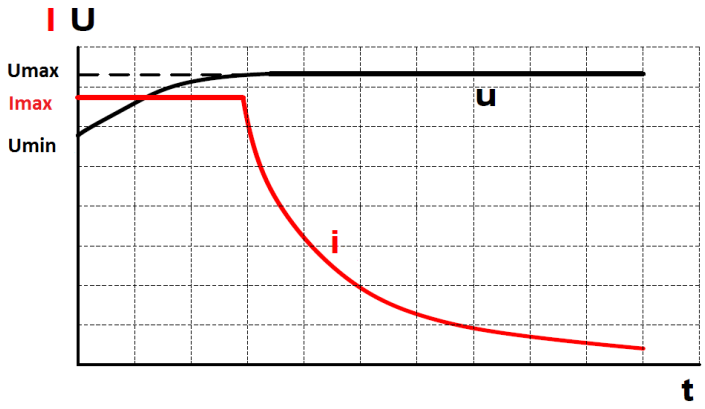
Obr. 10: Graf závislosti energetické hustoty na hmotnosti a objemu akumulátorů (zdroj [21])

3.4 Obvod nabíjení akumulátoru

Akumulátor Li-pol je potřeba dobíjet a proto bylo nutné navrhnout vhodný způsob nabíjení článku přímo v zařízení. Tyto akumulátory mají mnoho výhod, ale jsou velmi náchylné na správné zacházení a také nabíjení. Vždy se musí dodržet konečné vybíjecí napětí, maximální nabíjecí napětí, maximální nabíjecí i vybíjecí proud a samozřejmě nesmí být překročena maximální teplota akumulátoru. V případě nedodržení parametrů hrozí nejen zničení článku, ale i požár. Proto jsou již z výroby přímo na akumulátoru integrované základní ochrany. Při návrhu nabíječe jsem vycházel z nabíjecích charakteristik pro tento typ akumulátorů. Standardně se používá nabíjení ze zdroje konstantního napětí s proudovým omezením. Tato charakteristika je zobrazena na obr. 11. Maximální nabíjecí napětí 4,2V je nutné přesně dodržet a to s přesností ±1%. Maximální nabíjecí proud se podle typu článku pohybuje mezi 0,1C až do 2C.

Z důvodu minimalizace zařízení jsem se rozhodl pro použití specializovaného nabíjecího obvodu, který splňuje tuto nabíjecí charakteristiku. Zvolil jsem obvod MCP73832T od výrobce Microchip. Vstupní napětí má rozsah 3,75 až 6V a je tedy možné obvod přímo připojit na napájecí napětí USB portu. Přesnost nabíjecího napětí je 4,2V ±0,75%. Maximální nabíjecí proud je programovatelný od 15mA do 500mA. Rezistorem **R16** s hodnotou 2kΩ jsem ho nastavil právě na nejvyšší hodnotu, kterou dovoluje obvod i USB port a to 500mA. Tímto proudem se akumulátor s kapacitou 1000mAh nabije přibližně za 2 hodiny. Kondenzátory **C43** a **C42** mají funkci filtrace napětí. Nabíjecí obvod dále disponuje funkcí preconditioning, která zajišťuje, že v případě hlubokého vybití článku je tento nejprve šetrně nabíjen 20% maximálního proudu a až po dosažení určitého

napětí regulace dovolí maximální proud. Abychom věděli, v jakém stavu se obvod nachází je výstup STAT zaveden do mikrokontroléru. Jelikož se jedná o výstup typu otevřený kolektor, tak programově nastavíme na daném vstupu MCU vnitřní pull-up rezistor.



Obr. 11: Doporučená nabíjecí charakteristika Li-pol akumulátorů (zdroj [21])

3.5 Napájecí zdroj

Téměř všechny použité integrované obvody potřebují ke své funkci stejnosměrné napájecí napětí 3,3V. Výjimkou je jen GSM modul, který má velké proudové odběry a proto je svým rozsahem vstupního napětí určen k napájení přímo z Li-pol akumulátoru. Pro získání napájecího napětí 3,3V jsem se rozhodl použít lineární stabilizátor. Kritéria pro výběr byly: maximální proud, který je potřeba k napájení celé sondy, dále spotřeba stabilizátoru v klidovém stavu a samozřejmě velikost pouzdra. Určení maximálního možného proudového odběru sondy je v následující tabulce.

Senzor, součástka	Typ	Spotřeba
MCU	MSP430F5659	295µA/MHz ≈ 1180µA
GPS	Quectel L70	Tracking 25mA, špičkově až 150mA
LNA	BGA715N7	3,3mA
Tlak	LPS331	30µA
Otřesy	LSM303	360µA
Světlo	APDS-9300	600µA
Teplota a vlhkost	SHT25	330µA
Převodník úrovně	TXB0102	4µA
3x LED	R, G, B	cca 20mA
Spotřeba celkem		**175,8 mA**

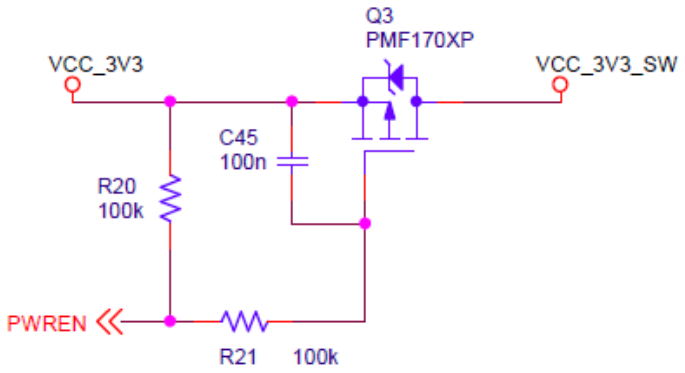
Tab. 7: Přehled maximální spotřeby obvodů

Z výpočtu je vidět, že minimální proud, na který je potřeba stabilizátor dimenzovat je 175,8mA. Vždy je lepší ale počítat s výkonovou rezervou.

Jako stabilizátor jsem zvolil obvod TPS72733. Tento obvod již obsahuje tepelné a proudové ochrany, které v případě přetížení nebo zkratu zamezí jeho zničení. Je schopný dodávat maximální proud 250mA, takže zbývá i dostatečná rezerva výkonu. Pracuje od minimálního vstupního napětí daného jako výstupní napětí stabilizátoru zvýšené o přibližně 0,3V (dropout voltage). Až do maximálních 6V. Jelikož je úbytek napětí velmi malý, vzhledem k běžným stabilizátorům, nazýváme tento typ Low-Dropout. Stabilizátor má také velmi nízkou klidovou spotřebu 7,9µA a rychlou transientní odezvu. Při skokovém zatížení z 0 na 200mA se změní napětí na výstupu o pouhých ±50mV. Toto vše se vešlo do pouzdra SON o rozměrech pouhých 1,5 mm × 1,5mm. Stabilizátor jsem na výstupu doplnil filtračním kondenzátor **C37**. Na vstup jsem přímo připojil akumulátor.

3.5.1 Obvod ovládání napájení senzorů

Napájecí napětí 3,3V z lineárního stabilizátoru **U11** je přímo zavedeno jen do mikrokontroléru. Všechny zbylé senzory a obvody jsou napájeny přes P-kanálový MOSFET tranzistor **Q3**. Jeho odpor v sepnutém stavu je maximálně 200mΩ a tedy i při větších odběrech proudu je zde úbytek napájecího napětí zanedbatelný. Přes rezistory **R20** a **R2**1 je na gate přivedeno napětí a tranzistor se takto nachází v zavřeném stavu. Všechny senzory jsou bez napájení a jejich spotřeba je tedy nulová. Nastavením logické nuly na pinu PWREN tranzistor otevřeme a zapneme tak napájecí napětí pro senzory. Schéma je znázorněno na obr. 12.



Obr. 12: Obvod ovládání napájecího napětí senzorů

3.6 Měřící část

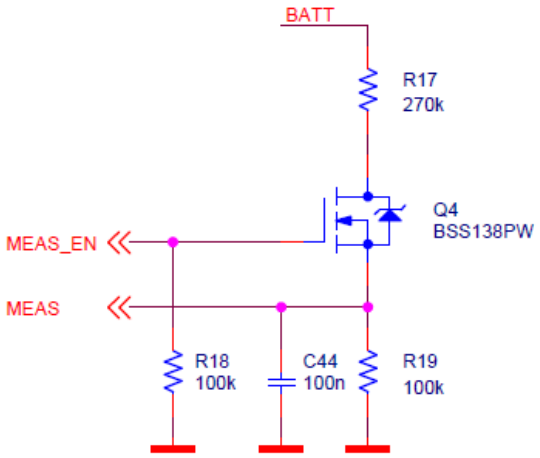
3.6.1 Obvod měření napětí akumulátoru

Jak je zmíněno výše, tak celé zařízení je napájeno z jednoho Li-pol akumulátoru. Aby bylo možné přibližně určit zbývající množství energie a tím i dobu provozu, integroval jsem do zařízení obvod pro měření napětí akumulátoru. Jeho jmenovité napětí je 3,7V a maximální nabíjecí napětí je 4,2V. Tím je dáno maximální napětí, které potřebujeme měřit. Dále je nutné napětí vhodně přizpůsobit, aby bylo možné je měřit integrovaným A/D převodníkem v mikrokontroléru. Referenci pro A/D převodník jsem zvolil integrovanou, která je pro tento účel svou přesností a stabilitou dostačující. Softwarově jsem ji nastavil na hodnotu 1,5V. Tomuto napětí jsem přizpůsobil vstupní dělič složený z rezistorů **R17** a **R19**. Měřené napětí jsem z děliče přivedl na měřící kanál A0, který se nachází na portu označeném P6. Kontinuální měření napětí akumulátoru není potřeba. Proto jsem pro dosažení minimální spotřeby celé sondy zapojil do obvodu N-kanálový unipolární tranzistor **Q4**, kterým lze odporový dělič odpojit. Schéma zapojení obvodu pro měření napětí je na obr. 13.
Při maximálním napětí 4,2V je na vstupu A/D převodníku napětí 1,14V.

$$U_{ADin} = U_{BAT} \times \frac{R19}{R17 + R19} = \frac{100k}{100k + 270k} \cong 1{,}14V$$

Při rozlišení převodníku 12 bitů a referenci 1,5V vychází napětí odpovídající 1 bitu 366µV. Touto konstantou vynásobíme hodnotu získanou z převodníku a vypočteme měřené napětí.

$$U_{bit} = \frac{AD_{count}}{REF} = \frac{2^{12}}{1{,}5} \cong 366\mu V$$



Obr. 13: Obvod měření napětí akumulátoru

3.6.2 Senzor měření atmosférického tlaku LPS331

Pro měření atmosférického tlaku jsem využil senzor LPS331 od firmy ST Microelectronic. Tento obvod patří do skupiny moderních MEMS senzorů. Měření tlaku je založeno na piezorezistivním jevu, kdy se mechanickým namáháním mění elektrický odpor materiálu. Pro vyšší přesnost a také citlivost se snímací prvky zapojují do můstku. Tlakový senzor uvnitř obsahuje dutinu, která je rozdělena pružnou membránou. Z jedné strany je tak dutina uzavřená a na druhé straně je otvor, který tvoří spojení s atmosférou. Na pružné membráně je odporový můstek tvořený piezoelementy. Ty převádí velikost prohnutí membrány na elektrický signál. Ten je dále upraven můstkovým zesilovačem. Poté následuje teplotní kompenzace, konečné zesílení signálu a převod 24 bitovým A/D převodníkem. Vše je doplněno o digitální filtraci. Poté již lze výsledek přečíst pomocí I^2C nebo SPI rozhraní.

Senzorem LPS331 lze měřit absolutní atmosférický tlak od 260 do 1260mbar. Tento tlak odpovídá přibližně rozsahu 10km nad hladinou moře až 1800m pod touto úrovní. Senzor odolává bez poškození až dvacetinásobné přetížení. Díky vysokému rozlišení 0,02mbar je možné změřit rozdíly nadmořské výšky v řádu centimetrů. Rychlost měření lze nastavit od 1 až do 25Hz. Tento obvod jsem zvolil také z důvodu velmi nízké spotřeby, která je podle nastaveného rozlišení 5,5 až 30uA. Adresu senzoru pro I_2C sběrnici jsem spojením pinu SDO/SA0 s napájecím napětím nastavil na hodnotu 1011101b.

Výsledek převodu tlaku je uložen do 3 registrů, každý po 8 bitech. Pro získání hodnoty tlaku v barech je nutný přepočet.

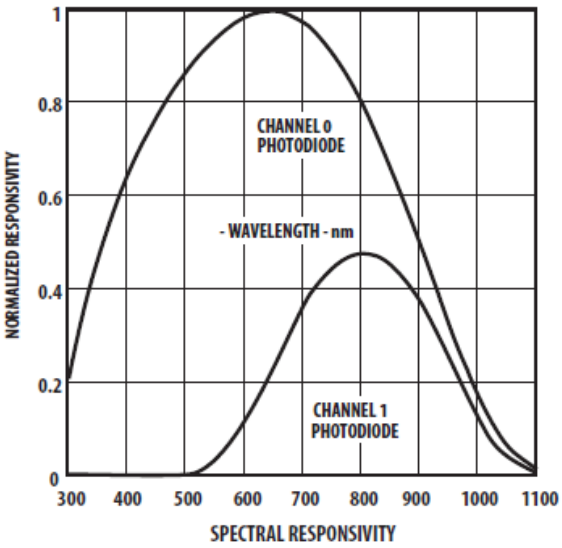
$$Pout[mbar] = \frac{(PRESS_OUT_H \,\&\, PRESS_OUT_L \,\&\, PRESS_OUT_XL)}{4096}$$

Ze senzoru je také možné vyčíst údaj o aktuální teplotě. Tato hodnota je uložena do 2 registrů po 8 bitech. Přepočet je následovný.

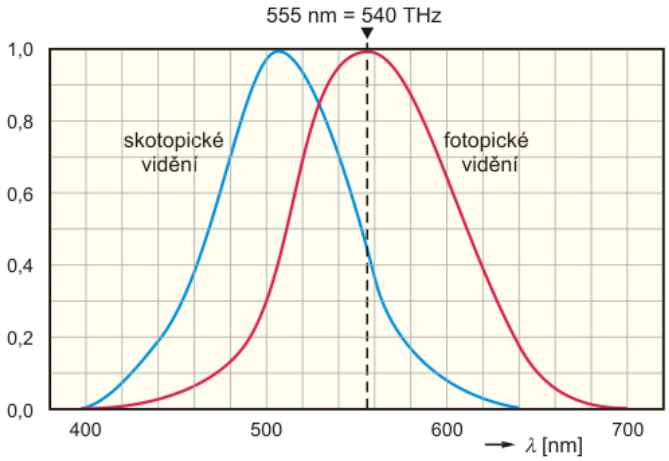
$$T[°C] = 42{,}5 + \frac{(TEMP_OUT_H \,\&\, TEMP_OUT_L\,)}{480}$$

3.6.3 Senzor měření osvětlení APDS 9300

Intenzitu okolního osvětlení jsem se rozhodl měřit senzorem APDS-9300 od firmy AVAGO Technologies. Tento obvod je svým rozsahem určen pro běžnou intenzitu denního světla, tedy přibližně od 0 až do 10000lux. Vše v závislosti na nastaveném zesílení a měřeném spektrálním rozsahu dopadajícího záření. Senzor integruje 2 fotodiody. První snímá světelné spektrum v širokém rozsahu, tedy infračervené i viditelné záření. Druhá dioda snímá převážně infračervené spektrum. Naměřené hodnoty z těchto fotodiod se poté vzájemně korigují. Výsledná charakteristika tak přibližně odpovídá spektrální citlivosti lidského oka. Citlivostní charakteristika lidského oka a porovnání se senzorem je na obr. 14. a obr. 15. Denní vidění lidského oka znázorňuje fotopická charakteristika a noční vidění je skotopická charakteristika.



Obr. 14: Spektrální citlivost obou kanálů senzoru (zdroj [13])



Obr. 15: Spektrální citlivost lidského oka (zdroj [23])

Údaje z fotodiod jsou převedeny 16 bitovým A/D převodníkem s nastavitelným zesílením. Je možné nastavit zesílení 1x nebo 16x. Také lze nastavit dobu integrace ve 3 rozsazích a to 13,7ms, 101ms a 402ms. V mém případě jsem převodník nastavil na zesílení 1x a dobu integrace 402ms. Zesílení 16x nelze využít, protože při intenzitě kolem 450lux dosáhne převodník maximální hodnoty. Údaje jsou ze senzoru vyčítány vždy po 500ms. Dobu integrace jsem tedy z důvodu maximální potlačení rušení nastavil na 402ms. Výsledek je uložen do 2 registrů po 8 bitech. Pro získání hodnoty intenzity v jednotkách lux jsou nutné následující přepočty.

$$0 \leq \frac{CH1}{CH0} \leq 0{,}52$$

$$E[lx] = (0.0315 \times \mathrm{CH0}) - \left(0.0593 \times \mathrm{CH0} \times \left(\frac{CH1}{CH0}\right)^{1.4}\right)$$

$$0{,}52 \leq \frac{CH1}{CH0} \leq 0{,}65$$

$$E[lx] = (0.0229 \times \mathrm{CH0}) - (0.0291 \times \mathrm{CH1})$$

$$0{,}65 \leq \frac{CH1}{CH0} \leq 0{,}80$$

$$E[lx] = (0.0157 \times \mathrm{CH0}) - (0.0180 \times \mathrm{CH1})$$

$$0{,}80 \leq \frac{CH1}{CH0} \leq 1{,}30$$

$$E[lx] = (0.00338 \times \mathrm{CH0}) - (0.00260 \times \mathrm{CH1})$$

$$\frac{CH1}{CH0} \geq 1{,}30$$

$$E[lx] = 0$$

Senzor také umožňuje nastavit nízkou a vysokou úroveň intenzity osvětlení, při jejichž překročení obvod nastaví logickou úroveň H (log. 1) na pinu INT. Tím je možné okamžité mikrokontolér informovat o změně. Senzor v tomto případě měří hodnoty jen na kanálu 0. Adresu obvodu pro I_2C sběrnici jsem spojením pinu ADDR s GND nastavil na hodnotu 0101001b. Spotřeba celého obvodu je také velmi nízká a to maximálně 600µA v aktivním režimu a při napájecím napětí 3,3V.

3.6.4 Senzor měření vlhkosti a teploty SHT25

Pro měření vlhkosti vzduchu a také okolní teploty jsem se rozhodl použít senzor SHT25 od firmy SENSIRION. Tento obvod umožňuje měřit relativní vlhkost vzduchu v běžném rozsahu 10 – 80% a to s typickou přesností ±1,8%. Lze měřit i přes 80%, ale po překročení této hranice velmi klesá přesnost měření a i po návratu pod 80% relativní vlhkosti je určitou dobu měření mimo toleranční meze. Pro požadavek měření relativní vlhkosti od 20 – 80% však senzor plně vyhovuje. Rozlišení integrovaného A/D převodníku lze nastavit na 8 až 12 bitů. To odpovídá rozlišení 0,7 až 0,04% relativní vlhkosti. V mém případě jsem využil plného rozlišení 12 bitů, kdy doba trvání jednoho odměru je maximálně 29ms. Důležitým údajem je také dlouhodobý drift, který se pohybuje pod 0,5% za rok. Výsledek je uložen do dvou registrů a pro získání relativní vlhkosti je potřeba přepočet ze surových dat.

Výpočet relativní vlhkosti:

$$RH[\%] = -6 + 125 \times \frac{(RHraw)}{2^{16}}$$

Obvod SHT25 integruje také velmi přesný teplotní senzor. Ten jsem zároveň využil pro měření okolní teploty. Přesnost měření je v rozsahu teplot 0-60°C typicky ±0,2°C. Podle požadavků je ale potřeba měřit i zápornou teplotu a zde je již typická přesnost ±0,5°C. Přesnost měření teploty, dle zadání, ±1°C v celém rozsahu ale senzor splňuje i při uvažování maximální tolerance. Rozlišení A/D převodníku je také volitelné a umožňuje nastavit 11 až 14 bitů. Což odpovídá teplotnímu rozdílu 0,04°C až 0,01°C. Rozlišení a přesnost senzoru tak plně vyhovují požadavkům měření. Při měření teploty jsem znovu využil plného rozlišení 14bitů, protože doba odměru 85ms nás nijak neomezuje. Surový údaj o teplotě vyčteme ze dvou registrů a provedeme přepočet na °C.

$$T[°C] = -46{,}85 + 175{,}72 \times \frac{(Traw)}{2^{16}}$$

Dalším důvodem pro výběr byla skutečnost, že senzor je již z výroby kalibrován a testován a není proto nutná dodatečná kalibrace po oživení zařízení, která by prodražovala celou výrobu. Komunikace se senzorem probíhá opět po I_2C sběrnici. Zde je adresa pevně dána a není možné ji nastavit. Její hodnota je 1000000b. Obvod jsem také zvolil, protože jeho maximální spotřeba při měření je 330µA a v režimu spánku klesá pod 0,4µA při napájecím napětí 3,3V. Senzor je integrován v pouzdře DFN s rozměry pouhých 3 x 3 x 1,1 mm (délka x šířka x výška).

3.6.5 Akcelerometr LSM303

Pro detekci překročení nebezpečných otřesů a vibrací jsem zvolil akcelerometr LSM303 od firmy ST Microelectronic. Tento senzor je taktéž založen na technologii MEMS. Využívá se zde principu změny kapacity, kdy jedna část senzoru je uložena pevně. Druhá část, která tvoří seismickou hmotu, je pohyblivá. Na každé z částí jsou z obou stran hřebenové elektrody, které se při pohybu přibližují nebo oddalují a dochází tak ke změně kapacity. Protože se při pohybu vždy jedna kapacita zvětšuje a druhá zmenšuje, vyhodnocujeme diferenciální změnu. Tyto snímací elementy jsou v senzoru obsaženy 3. Každá pro jednu osu x, y a z. Obvod umožňuje nastavení maximálního měřeného rozsahu zrychlení ±2g, ±4g nebo ±8g. Kdy 1g odpovídá normálnímu tíhovému zrychlení 9,80665 $m.s^{-2}$. Pro účel měření nárazů jsem zvolil nejvyšší hranici 8g, protože nepotřebujeme velké rozlišení ale spíše větší rozsah. Dalším parametrem je output data rate, tedy rychlost vzorkování. Zde lze nastavit hodnotu od 1Hz až do 1000Hz a je nutné ji volit jako kompromis mezi spotřebou a skutečně nezbytnou rychlostí reagování na změny.

V mém případě jsem zvolil hodnotu 400Hz. Senzor při této hodnotě automaticky nastaví filtr typu dolní propust na mezní frekvenci 292Hz. Tím se značně omezí nechtěné rušení. Pro další úpravu výstupních dat jsem se rozhodl využít integrovaný filtr typu horní propust. Akcelerometr totiž snímá i statické působení zemské gravitace a také pomalé změny zrychlení, které znamenají běžný pohyb či jízdu. Zařazením vhodně nastaveného filtru však tyto pomalé změny filtrujeme a měříme jen skutečně rychlé změny, jako jsou pády a nárazy. Filtr se nastavuje změnou koeficientů, kdy je možné zvolit hodnotu 8,16,32 nebo 64.

Výsledná mezní frekvence je dána vztahem:

$$fc = \ln\left(1 - \frac{1}{HPcoef}\right) \times \frac{fs}{2\pi}$$

Pro výpočet použijeme následující aproximovaný vztah:

$$fc = \frac{fs}{6 \times HPcoef}$$

Při mnou nastavené rychlosti vzorkování *fs* = 400Hz tak vychází mezní frekvence tohoto filtru od 1 do 8Hz. Z těchto možností jsem zvolil frekvenci 4Hz. Otřesy a nárazy je potřeba sledovat nepřetržitě a to i v době, kdy je mikrokontrolér v režimu spánku. Pro tento případ umožňuje akcelerometr nastavit kladnou a zápornou hodnotu zrychlení, po jejichž překročení se automaticky nastaví určená logická úroveň na pinech INT. Ty jsou ze senzoru vyvedeny na sběrnici kontroléru a v případě potřeby ho probudí z režimu spánku. Obvod LSM303 jsem upřednostnil také proto, že integruje ještě jeden senzor a to magnetometr. Senzor snímá působení jakéhokoliv magnetického pole, je však tak citlivý, že dokáže rozpoznávat i zemský magnetismus. Užívá se proto jako elektronický kompas. S využitím tohoto kompasu a také akcelerometru by bylo možné přibližně určovat změny směru a rychlosti v případě dočasné ztráty signálu GPS.

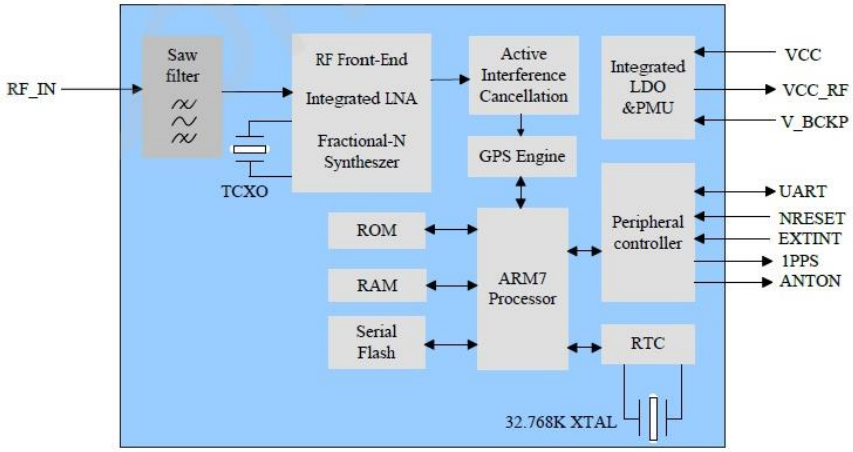
3.7 Blok GPS

Abych splnil požadavek sledovatelnosti transportního boxu, využil jsem družicového polohového systému GPS (Global Positioning System). Díky tomuto systému jsme schopni určit velmi přesně, kde se právě zařízení nachází. Celý blok GPS systému se skládá z modulu L70, nízkošumového VF zesilovače a antény pro příjem signálu.

3.7.1 GPS modul

Z nabídky modulů jsem zvolil typ L70 od výrobce Quectel. Jde o modul založený na čipové sadě MT3339. Vnitřní uspořádání je znázorněno na obr. 16. Modul umožňuje současně sledovat až 22 satelitů a přitom dokáže pracovat na 66 kanálech. Pro rychlejší určení polohy navíc využívá technologie AGPS (asistovaná GPS). Ve chvíli kdy modul obdrží efemeridy, tedy krátkodobé předpovědi drah družic, tak je uloží do interní FLASH paměti. Po vypnutí modulu a jeho opětovném zapnutí je schopný algoritmus dopočítat aktuální dráhy družic a tím urychlit čas zafixování polohy. Stáří efemerid však nesmí být delší než 3 dny. K dalšímu vybavení patří systém aktivního potlačení

rušení. Ten dokáže filtrovat rušení GPS signálu způsobené odrazy nebo jinými bezdrátovými systémy (GSM, Wi-Fi, Bluetooth) a to až 12 frekvencí. Přijímač dosahuje citlivosti až -160dBm při sledování a až -163dBm při použití přídavného externího VF zesilovače. Při síle signálu -130dBm je schopný po studeném staru (stav po zapnutí napájení) určit polohu do 15s. Přesnost určení polohy je pří této síle signálu lepší než 2,5m. Tento modul jsem zvolil také z důvodu velmi nízké spotřeby, která při sledování a aktualizaci polohy dosahuje 22mA při napětí 3,3V. V neposlední řadě byly rozhodující rozměry pouzdra modulu, které jsou 10,1 x 9,7 x 2,5 mm (délka x šířka x výška).



Obr. 16: Vnitřní uspořádání GPS přijímače (zdroj [19])

Komunikace s modulem probíhá po UART sběrnici. Pro základní funkci není potřeba žádné další nastavení a ihned po připojení napájecího napětí dojde k aktivaci obvodu, který začne přijímat a dekódovat signál z družic. Souběžně jsou na sériový port vysílány údaje o aktuální poloze (pokud je již určena), času, nadmořské výšce a mnoho dalších. Data jsou předávána ve standardizovaném formátu zvaném NMEA.

3.7.2 Nízkošumový vysokofrekvenční zesilovač (LNA)

Samotný GPS modul ke své funkci vyžaduje jen vhodnou anténu pro příjem signálu. Uvnitř je pak obsažen celý RF front-end a přímo na vstupu také hřebenový filtr. Celá měřící sonda však bude umístěna uvnitř přepravního boxu a přepravována různými dopravními prostředky. Toto nám velmi sníží sílu přijímaného signálu. Proto jsem se rozhodl doplnit modul přídavným nízkošumovým vysokofrekvenčním zesilovačem. Zvolil jsem typ BGA715N7 od výrobce Infineon. Tento zesilovač je svým frekvenčním rozsahem 1550 – 1615 MHz předurčen pro systémy družicové navigace GPS, Galileo, GLONASS a COMPASS. Má velké výkonové zesílení, typicky 20dB a šumové číslo 0,7dB.

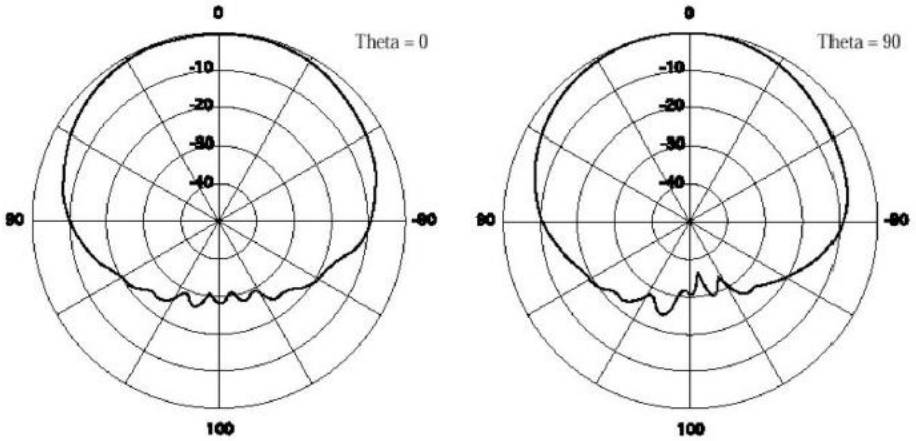
Jeho výstup je interně přizpůsoben na impedanci 50Ω, takže ho lze přímo přivést na vysokofrekvenční vstup GPS modulu. Pro tento zesilovač jsem se rozhodl nejen pro jeho velké zesílení, ale hlavně pro jeho velmi nízkou spotřebu, která činí 3,3mA.

Kolem celého obvodu je už minimum součástek. Cívka **L2** slouží pro přizpůsobení vstupu a také je přes ni vedeno stejnosměrné předpětí na VF vstup. Kondenzátor **C24** je blokující a omezuje pronikání vysokofrekvenčních signálu na BIAS pin. Celý zesilovač se napájí přes rezistor **R10** z GPS modulu, který má pro tyto účely speciální pin. K aktivaci LNA dojde po přivedení napětí přes **R11** na jeho vstupní pin EN. Napětí se ovládá výstupním pinem ANTON na GPS modulu. V případě potřeby je tedy možné zesilovač přepnout do úsporného režimu, kdy jeho spotřeba je typicky 200nA.

3.7.3 Anténa

Pro příjem GPS signálu je nutná vhodná anténa. Nejčastěji se používají externí antény. Zde však potřebujeme, aby zařízení bylo kompaktní a proto jsem anténu integrovat přímo na DPS. Rozhodujícími parametry byly rozměry antény, její zisk a také směrovost. Na výběr bylo několik možností. První z nich jsou různé návrhy mikropáskových antén vyleptaných přímo do vrstvy mědi na plošném spoji. Tyto antény jsou sice cenově nejvýhodnější, bohužel však zabírají velkou plochu na desce a vzhledem k požadované velikosti celého zařízení je není možné použít. Další možností je šroubovicová (helix) anténa, ta dosahuje parametrů srovnatelných s patch anténami. Bohužel je však tvarově nevhodná a integrace by byla složitější. Jako anténu jsem tedy zvolil typ patch na keramice. Jde také o mikropáskovou anténu, jen je navržena na vhodném keramickém substrátu. Anténa je tedy monolitický keramický blok, který se osadí na DPS jako ostatní součástky.

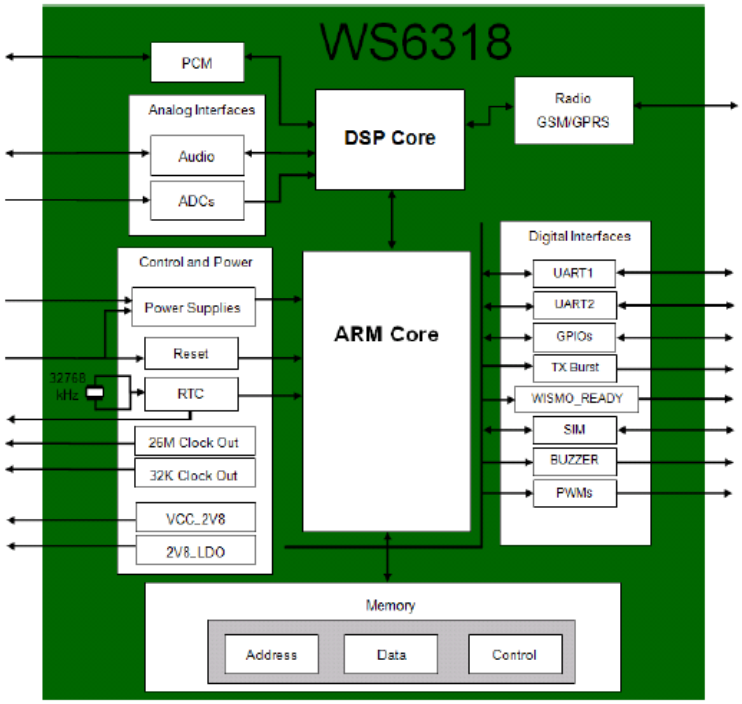
Díky svým miniaturním rozměrům a velkému zisku (vzhledem k velikosti) jsem vybral anténu GP.15A od výrobce Taoglas. Tato anténa je přímo určená pro příjem GPS signálu, čemuž odpovídá její frekvenční rozsah, který je 1575,42MHz ± 1,023MHz. Velmi důležitý je pak zisk antény, který je typicky 1,5dBic (isotropic circular). Anténa má pravotočivou kruhovou polarizaci. Poměr napětí stojatých vln (VSWR) je maximálně 1,5. Směrové charakteristiky antény jsou na obr. 17.



Obr. 17: Směrové charakteristiky antény (zdroj [17])

3.8 GSM/GPRS modul

Všechna naměřená data z výše uvedených senzorů a také varování při překročení daných hodnot je potřeba odeslat příslušné osobě, která převoz sleduje. Nejvíce univerzální a nejrychlejší způsob je textová zpráva (SMS). Tu lze odeslat na jakýkoliv běžný mobilní telefon, případně na terminál, kde proběhne vyhodnocení nebo záznam dat. Do sledovací sondy jsem integroval GSM modul, který bude zajišťovat odesílání těchto zpráv. Rozhodující pro výběr byla především velikost modulu, protože odesílání SMS zpráv dnes umožňují všechny GSM moduly. Většina dostupných modulů byla svými rozměry nevhodná a neúnosně by zvětšovala celou konstrukci. Po dlouhém hledání jsem objevil modul WS6318 od výrobce Siera Wireless. Tento typ dosahuje rozměrů 17,8 x 15 x 2,5 mm (délka x šířka x výška) a na DPS tak zaujímá plochu 267 mm^2. Dle výrobce se jedná o nejmenší GSM/GPRS modul na světě. Rozhodně je to ale nejmenší modul, který lze běžně zakoupit. Umístěn je v pouzdru LGA, které je galvanicky pokovené a nahrazuje tak stínění pomocí plechového krytu, které používají ostatní výrobci. Modul je typu dual-band a umí tedy pracovat v pásmu 900MHz i 1800MHz. Další výhodou je možnost datových přenosů přes GPRS, které by bylo možné v budoucnu také využít. Celkové vnitřní uspořádání je na obr. 18.



Obr. 18: Vnitřní uspořádání GSM modulu (zdroj [18])

3.8.1 Napájení a komunikace s MCU

Modul je svým rozsahem napájecího napětí určen přímo pro napájení z Li-Pol akumulátoru. To je přivedeno přes filtrační kondenzátory **C18** a **C19**. Při návrhu DPS je nutné dát pozor na přívodní vodiče napájení od akumulátoru, protože modul dosahuje špičkových proudových odběrů při vysílání až 1,6A. Celková impedance tohoto vedení nesmí překročit 150mΩ. V aktivním módu kdy je modul pouze přihlášený do sítě a nevysílá data, klesá spotřeba k 20mA.

Komunikace s modulem a předávání příkazů probíhá přes UART rozhraní. Bohužel maximální napětí, které lze přivést na komunikační port GSM modulu je 2,8V. Napěťové úrovně mikrokontroléru jsou však 3,3V. Proto jsem mezi MCU a GSM modul umístil obvod TXB0102. To je dvojitý obousměrný převodník napěťových úrovní. Port A tohoto obvodu je schopný pracovat s napětím 1,2 až 3,6V a port B pak s napětím 1,65 až 5,5V. Tento převodník navíc obsahuje i ESD ochrany. Jeho spotřeba je maximálně 4µA.

GSM modul se dále ovládá z mikrokontroléru pomocí tranzistorů. Využil jsem tranzistory MUN5211, v každém pouzdru se ukrývají 2 tranzistory každý doplněný o 2 pomocné 10KΩ rezistory. Tento typ tranzistorů je určen právě pro takovéto spínací a ovládací digitální aplikace. Integrované rezistory šetří cenné místo na DPS a také náklady na výrobu. Duálním tranzistorem **Q1** se ovládá reset GSM modulu a také se jím modul zapíná a vypíná. **Q2** informuje mikrokontrolér o aktuálním stavu a druhý z tranzistorů v pouzdru spíná modrou LED diodu, která bliká při vysílání.

3.8.2 SIM karta

Modem GSM samozřejmě vyžaduje také registraci do sítě mobilního operátora. K tomu slouží karta SIM (subscriber identity module). Běžně velká karta (Mini SIM) je však svými rozměry srovnatelná s GSM modulem. Proto jsem využil modernější typ ve velikosti Micro SIM, jehož rozměry jsou přibližně poloviční. Pro kartu je na DPS určen držák **S1**. Komunikace se SIM probíhá po 3 vodičích, jeden resetovací RST, sériové hodiny CLK a vstupně výstupní pin I/O. Všechny tyto signály včetně napájení karty jsou přivedeny z GSM modulu. Ten podporuje dvě velikosti napájecího napětí a to 1,8V a 3V, podle typu SIM karty. V těle držáku karty je mechanický mikrospínač, jehož jeden kontakt je také přiveden do GSM modulu a umožňuje rozpoznat, zda je karta v držáku zasunuta. SIM karta je uživatelsky přístupná a je zde tak možný výskyt statického výboje. Pro ochranu GSM modulu jsem na komunikační sběrnici mezi kartu a modul umístil obvod TPD3F303. Uvnitř obvodu je pole rychlých ochranných diod a rezistory, které chrání každý ze 3 kanálů před elektrostatickým nábojem, ale také před různým VF rušením. Jedna ochranná dioda (transil) je určena také pro napájecí napětí SIM karty.

3.8.3 Anténa pro GSM

Anténu pro GSM modul jsem zvolil externí. Pro správnou funkci je nutné umístit antény pro GSM a GPS co nejdále od sebe a maximalizovat tak odstup signálů. Zde hrají velkou roli i vyzařovací charakteristiky antén. Proto jsem anténu pro GPS umístil na opačnou stranu desky plošných spojů. Parametry GSM antény nejsou nijak kritické, protože pokrytí signálem ze základnových stanic operátorů je velké a jeho příjem i vysílání je tak jednodušší. Rozhodující tedy byla velikost a samozřejmě cena. Výběr jsem omezil na externí antény typu „pendrek“ a pak samostatné mikropáskové antény na DPS. Kvůli umístění do přístrojové krabičky jsem se rozhodl pro mikropáskovou anténu na DPS od čínského výrobce. Anténa nemá typové označení. Její rozměry jsou 36 x 13 x 1 mm (délka x šířka x výška). Anténa je dvoupásmová s frekvenčním rozsahem 824 – 960MHz a 1710 – 1990MHz. Její zisk je 2dBi. Anténa se pak k modulu připojuje přes miniaturní VF UF.L konektor.

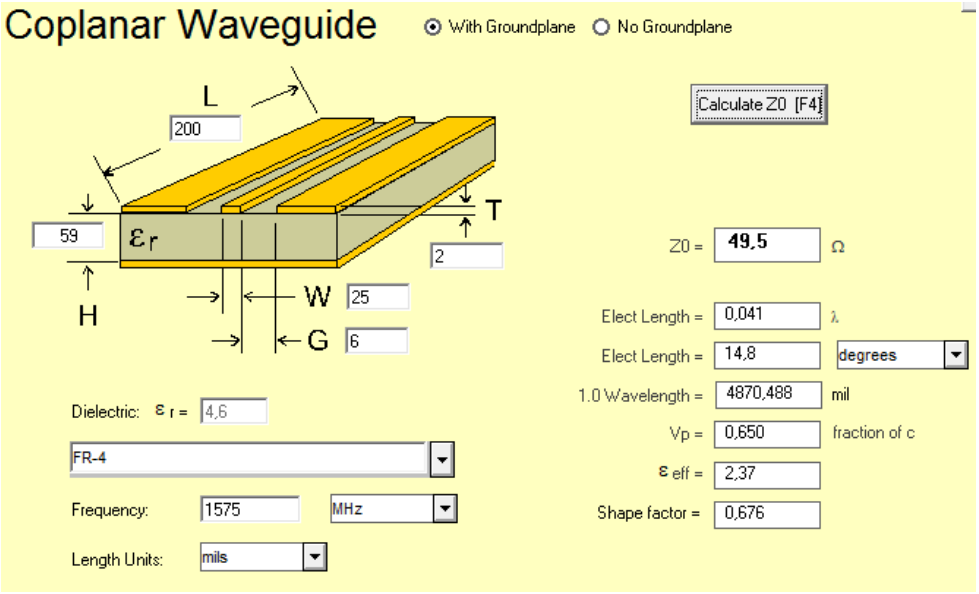
3.9 Návrh a výroba desky plošných spojů

Propojení jednotlivých součástek jsem vyřešil běžnou cestou a to montáží na desku plošných spojů. Z důvodu minimalizace celého zařízení jsem zvolil moderní způsob povrchové montáže součástek SMT. Tento typ montáže je dnes v průmyslové elektrotechnice nejvíce využívaný. Důvody jsou minimalizace rozměrů zařízení, také kvůli zvyšování pracovních frekvencí integrovaných obvodů. Ale i výroba je levnější a jednodušší. Není potřeba vrtat díry pro nožičky součástek, jak je tomu v případě THT technologie. Pro návrh elektrického schéma i DPS jsem využil profesionální návrhový balík programů OrCAD od firmy Cadence.

Prvním krokem byl návrh obvodového řešení ve schematickém editoru. Bylo zapotřebí vytvořit schématické značky obvodů a součástek, které nebyly v knihovnách programu obsaženy. Většinou se jednalo o nově vydané součástky, případně méně známe typy. Jakmile bylo schéma hotové, přistoupil jsem k přípravě na návrh plošného spoje. Zde jsem vytvářel pájecí plošky a prokovy různých tvarů a velikostí, které budou využity spolu s pouzdry použitých součástek. Layout plošného spoje jsem navrhoval v programu PCB Editor. Jako kompromis mezi cenou a možnostmi výroby jsem zvolil konstrukční třídu přesnosti 6. V této třídě je možné využít nejmenší šířku spoje a také mezeru mezi dvěma spoji 6 mils (1mil = 0,0254mm). Nejmenší průměr vrtané díry je potom 12 mils. Deska je vyrobena z materiálu FR4 o síle 1,5mm a základní plátování mědi je 18µm. Tato hodnota se však různými procesy během výroby zvětší na přibližně 50 µm. Deska je dvouvrstvá a je tedy možné k vedení spojů využít obě strany. Při návrhu DPS jsem dodržoval určitá pravidla a zásady blíže popsané v [3]. Základem je správné rozmístění součástek, co nejkratší vzájemné propojení, minimalizace proudových smyček a umístění filtračních a blokovacích kondenzátorů blízko pouzder integrovaných obvodů. Vše ve výsledku určuje elektromagnetickou kompatibilitu (EMC). Ta udává jak je zařízení odolné proti rušení a také jaké má vlastní vyzařování rušivých signálů. EMC lze nejvíce ovlivnit právě použitím oboustranné desky plošných spojů. Kdy na spodní stranu (BOTTOM) „rozlijeme“ měď a přivedeme na ní obvodovou zem. V horní vrstvě (TOP) pak vedeme napájecí a maximum zbylých signálů. Rozlitá zem je také slouží jako zemní rovina pro anténu GPS.

Samostatným bodem při návrhu plošných spojů bylo impedančně přizpůsobené vedení mezi anténou a modulem. Jak u GPS tak u GSM. U obou požadujeme impedanci vedení 50Ω. Pro návrh jsem využil program AppCAD od firmy Agilent Technologies. Nejvhodnějším řešením přizpůsobeného vedení na substrátu o síle 1,5mm je koplanární vlnovod. Tedy mikropáskové vedení ohraničené ze třech stran zemními plochami, které je svým uspořádáním a chováním podobné koaxiálnímu kabelu. Do programu je potřeba zadat známé parametry substrátu a to tloušťku plátování

mědi, tloušťku materiálu FR4 a jeho permitivitu. Poté úpravou rozměrů středního vodiče a mezery nastavíme impedanci co nejblíže požadovaným 50Ω. Takto navržené vedení lze použít pro GPS i GSM frekvence, protože má vždy stejnou impedanci. V mém případě vyšla šířka vodiče 6 mils a mezera 25 mils. Návrh je na obr. 19. Výsledek jsem ještě ověřil online kalkulátorem a hodnoty byly téměř shodné.



Obr. 19: Návrh vedení o impedanci 50Ω v aplikaci AppCAD

Jakmile jsem dokončil návrh DPS, bylo nutné vygenerovat výrobní podklady. Vždy jsou nutné filmové předlohy obou vrstev, tedy TOP a BOTTOM. Zde jsou všechny vodivé cesty, pájecí plošky a také plošky prokovů. Dále jsem generoval filmy nepájivých masek. Tyto masky překryjí místa, kde nebude v budoucnu pájeno a chrání tak plošný spoj před vlhkostí a případnou oxidací vodivých cest. Také částečně fungují jako elektro izolační vrstva. Dále jsem generoval podklady pro servisní potisk, který je umístěn na vrstvě TOP. Jsou to obrysy pouzder, jejich orientační značky, schematické označení a také různé popisky. Poté jsem pro obě vrstvy ještě vytvořil masky pro nanášení pájecí pasty. Nakonec jsem vygeneroval excellon data pro souřadnicovou vrtačku, která vyvrtá díry pro nožičky součástek a prokovy. Všechny tyto podklady jsem umístil do přílohy B obrázky B.1-9. a také spolu se schématem zapojení (soubor .dsn) nahrál na přiložené CD.

Jakmile jsem měl všechny podklady, přišla na řadu výroba samotné DPS. Takto náročnou desku je nutné nechat profesionálně vyrobit u společnosti, která zvládá danou třídu přesnosti. Nakonec jsem zvolil firmu Prago Board s.r.o. a její prototypový program Pool servis.

3.9.1 Osazení součástkami

Jak jsem zmínil výše, zvolil jsem povrchovou montáž, takže většina součástek je v SMD provedení. Jen nezbytně nutné součástky, jako konektory a GPS anténa, mají klasickou velikost. Celou sondu jsem se snažil co nejvíce minimalizovat, a proto jsem také vybíral součástky v těch nejmenších pouzdrech, které je možné běžně zakoupit. Tím jsem se však dostal na hranici, kdy již není možné pouhé ruční osazování. Bylo nutné přesně osadit i pouzdro VF zesilovače, kde vývody jsou plošky na spodní straně a jejich rozměry jsou pouhé 0,2mm. A mnoho dalších součástek bylo v podobných pouzdrech typu LGA. Běžné pasivní součástky jsem zvolil v pouzdrech 0603. Jen u vysokofrekvenční části byly použity ve velikosti 0402. Abych osazení zvládl v domácích podmínkách, byl jsem nucen vyrobit jednoduchý vakuový manipulátor doplněný o digitální mikroskop. Vývodové součástky jsem po osazení zapájel mikropáječkou s regulací teploty. SMD součástky jsem osazoval za pomoci pájecí pasty a horkovzdušné stanice, která má taktéž regulaci teploty. Nejprve však bylo potřeba nanést pájecí pastu na všechny plošky. Aplikace pasty injekční jehlou taktéž nebyla možná. Proto jsem podle vygenerovaných podkladů pro pastu vyrobil za pomoci řezacího plotru tenkou plastovou folii s otvory pro pájecí plošky. Pomocí ní jsem pastu nanesl, osadil součástky a poté celou desku zapájel. Stejně jsem postupoval i na straně BOTTOM. Takto jsem dosáhl profesionálního vzhledu osazené DPS.

3.9.2 Programování mikrokontroléru

Psát program pro mikrokontrolér je možné jak v assembleru, tak v jazyce C. Program napsaný v assembleru je většinou více optimalizovaný, bohužel je však psaní zdlouhavé a při větším rozsahu kódu i nepřehledné. Já jsem tedy zvolil psaní v jazyce C, který je univerzální a pokud bych v budoucnu použil jiný mikrokontrolér tak úprava pro něj bude jednodušší. Program jsem psal ve vývojovém prostředí dodávaném přímo firmou Texas Instruments. Toto prostředí se jmenuje Code Composer Studio. Obsahuje editor kódu a překladač, který přeloží vyšší jazyk do strojového kódu přímo pro daný typ MCU. Prostředí dále nabízí debugger. Ten umožňuje krokování programu, sledování registrů a proměnných. Tyto funkce velmi usnadňují vývoj a napomáhají odhalení chyb, které programátor způsobil.

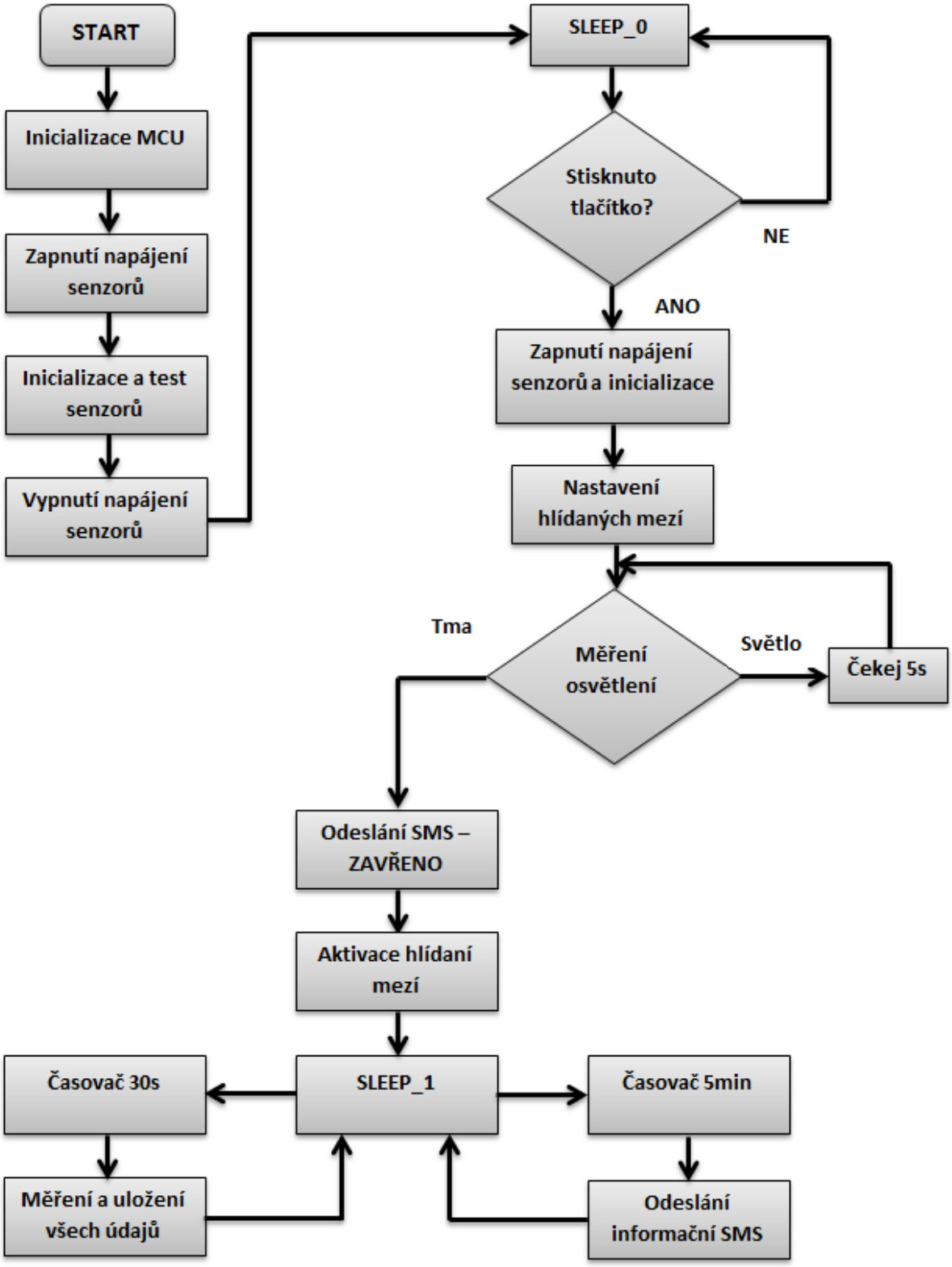
Jakmile je program napsán je potřeba ho nahrát do paměti mikrokontroléru. K tomu jsem využil vývojový kit od stejného výrobce a to MSP430 Launchpad, který slouží jako programátor. Moderní procesory MSP430 poskytují možnost ISP (In System Programming), kdy je možné program nahrát do MCU až po jeho osazení do zařízení. Procesor tedy již není nutné umisťovat do patice a kód lze

velmi rychle upravit a přehrát. Mnou zvolené MSP430F5659 dovoluje programování dvěma způsoby. Jedním z nich je velmi rozšířené a univerzální čtyřvodičové rozhraní JTAG. Druhou možností je SBW (Spy Bi Wire), jde v podstatě o JTAG komunikující po 2 vodičích. Toto jsem využil ve svém zařízení. Propojení sledovací sondy a programátoru zajišťuje miniaturní konektor **J1.**

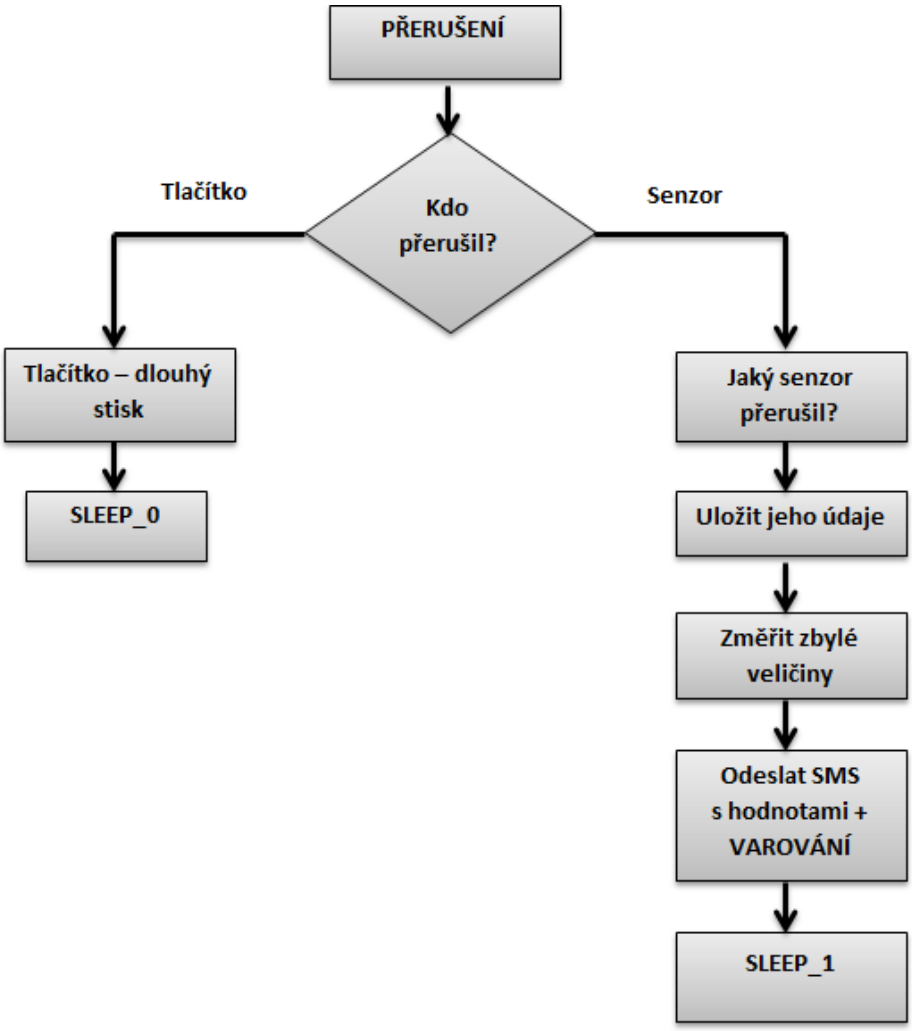
3.9.3 Program pro mikrokontrolér

Na níže uvedených obrázcích obr. 20 a obr. 21 jsou znázorněny vývojové diagramy hlavního programu a podprogramu přerušení. Z nich je patrný vývoj událostí. Po připojení napájecího napětí z akumulátoru skočí program na start, kde se nejprve provede inicializace mikrokontroléru. Určí se, jaké piny budou vstupní nebo výstupní, nastaví se základní hodinový takt na 4MHz, pomocné rozvody hodin a také se nastaví všechny komunikační periferie. Dále dojde k sepnutí napájecího napětí pro senzory. Postupně se senzory inicializují a otestují. Pokud vše proběhne v pořádku, senzory se odpojí a procesor přejde do režimu hlubokého spánku, kdy je probuzen pouze stiskem tlačítka. V tomto stavu se zařízení nachází do doby, než nenastane potřeba jeho využití.

Pokud chceme sondu spustit, zmáčkneme tlačítko a mikrokontrolér přejde do aktivního režimu. Připojí napájecí napětí pro senzory a GPS modul a také aktivuje GSM modul. Dále se z paměti nastaví meze jednotlivých veličin, které se při převozu nesmí překročit. Poté probíhá každých 5s měření osvětlení aby sonda poznala, zda se nachází v přepravním boxu. Jakmile zařízení pozná, že je umístěno v boxu odešle SMS s tímto upozorněním. V tu chvíli se aktivuje hlídání mezí všech veličin. Měření probíhá každých 30s. Tyto hodnoty se vždy uloží a vypočte se aritmetický průměr (teplota, tlak, vlhkost, osvětlení). Po 5 minutách dojde k odeslání SMS s naměřenými údaji a aktuální polohou kde se box nachází. Mezi tím je vždy mikrokontrolér v úsporném režimu. Z něj je probuzen jen systémem přerušení. Při jeho vyvolání dlouhým stiskem tlačítka se vypne napájení všech obvodů. Napájen zůstane opět pouze procesor, který se převede do režimu spánku. Pokud ale přerušení bylo vyvoláno jedním ze senzorů, zjistíme, která veličina překročila mez. Poté se změří i zbylé veličiny a okamžitě se odešle SMS s údaji doplněná o upozornění. Po odeslání přejde mikrokontrolér zpět do aktivního režimu měření.



Obr. 20: Vývojový diagram základního programu

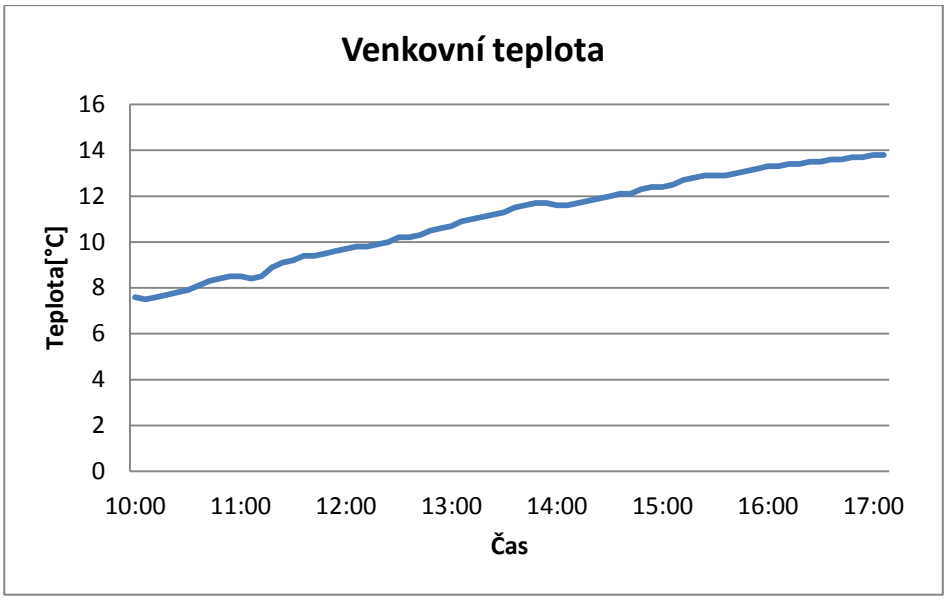


Obr. 21: Vývojový diagram podprogramu přerušení

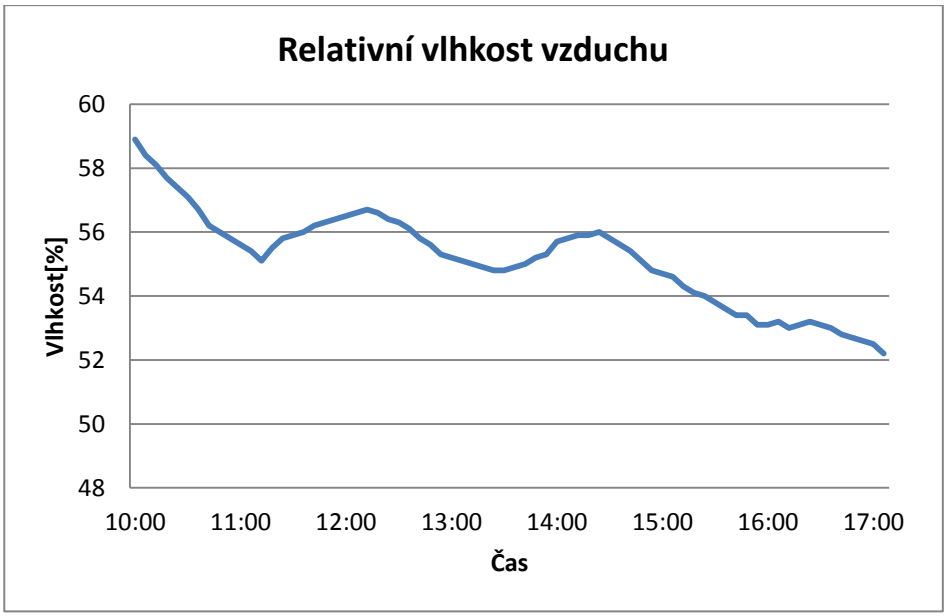
4 Oživení a ověření funkčnosti

Po kompletním osazení desky plošných spojů a optické kontrole správného zapájení součástek jsem přešel k fázi oživování. Nejprve jsem překontroloval pomocí laboratorního zdroje s proudovým omezením a multimetru funkčnost lineárního stabilizátoru **U11**. Napájecí napětí 3,3V bylo v dané toleranci. Při měření jsem zároveň kontroloval proudový odběr. Poté jsem zdroj nahradil akumulátorem. Pro ověření funkce obvodu nabíjení **U13** jsem sondu připojil k USB. Naměřené nabíjecí napětí bylo přibližně potřebných 4,2V. Pro ověření dalších funkcí již bylo potřeba nahrát program do mikrokontroléru. Dále jsem ověřil spínání napájecího napětí pro senzory a GPS. Poté jsem ověřoval funkci sběrnic I_2C a UART. Měření jsem prováděl na digitálním osciloskopu Agilent Technologies DSO-X 2024A, který umožňuje dekódovat zaznamenané průběhy na obou sběrnicích. Tyto průběhy zobrazují obrázky D.1 a D.2 v příloze D. Nyní již bylo možné vyzkoušet, zda všechny senzory na I_2C sběrnici jsou funkční. Z toho důvodu jsem vždy napsal jednoduchý program, který periodicky získává údaje z daného senzoru a odesílá je na sériový port. K němu jsem připojil převodník UART – USB a získaná data zaznamenával do PC.

Nejprve jsem vyzkoušel senzor SHT25, který slouží k měření teploty a také relativní vlhkosti vzduchu. Data jsem zaznamenával každých 10minut po dobu 7 hodin. Sondu jsem umístil za okno, abych mohl pozorovat změny všech měřených veličin. Pro porovnání byl poblíž sondy umístěn senzor profesionální meteostanice Davis Vantage Pro2. Tato stanice měří teplotu s chybou ±0,5°C, chyba měření relativní vlhkosti je ±3% do 90%RH a chyba měření atmosférické tlaku je ±1mbar. Měřené údaje sondy a meteostanice jsem porovnal a chyba měření těchto veličin sondou byla vždy menší než požadovaná. Na obrázcích obr. 22 a obr. 23 jsou údaje změřené sondou vynesené do grafu.

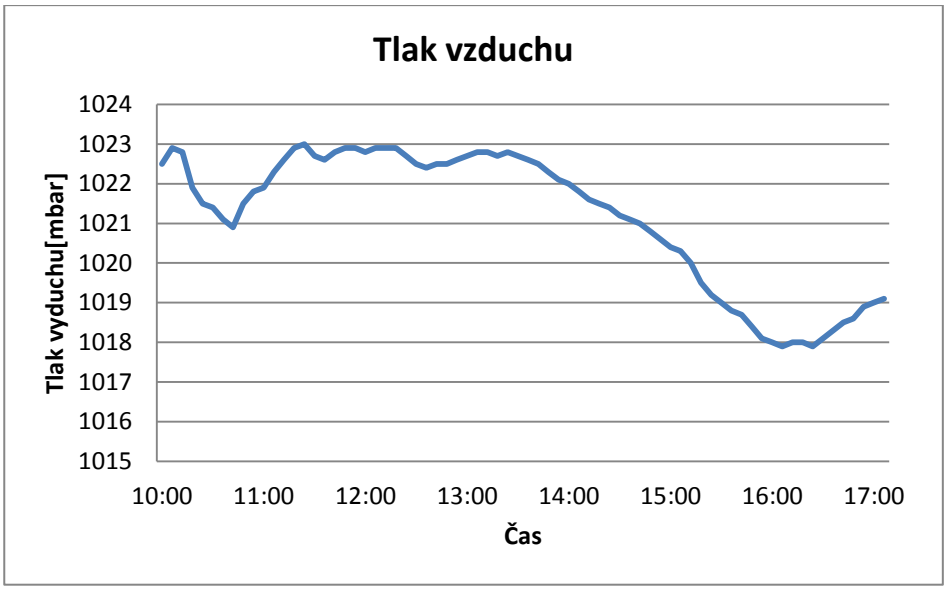


Obr. 22: Záznam teploty senzorem SHT25



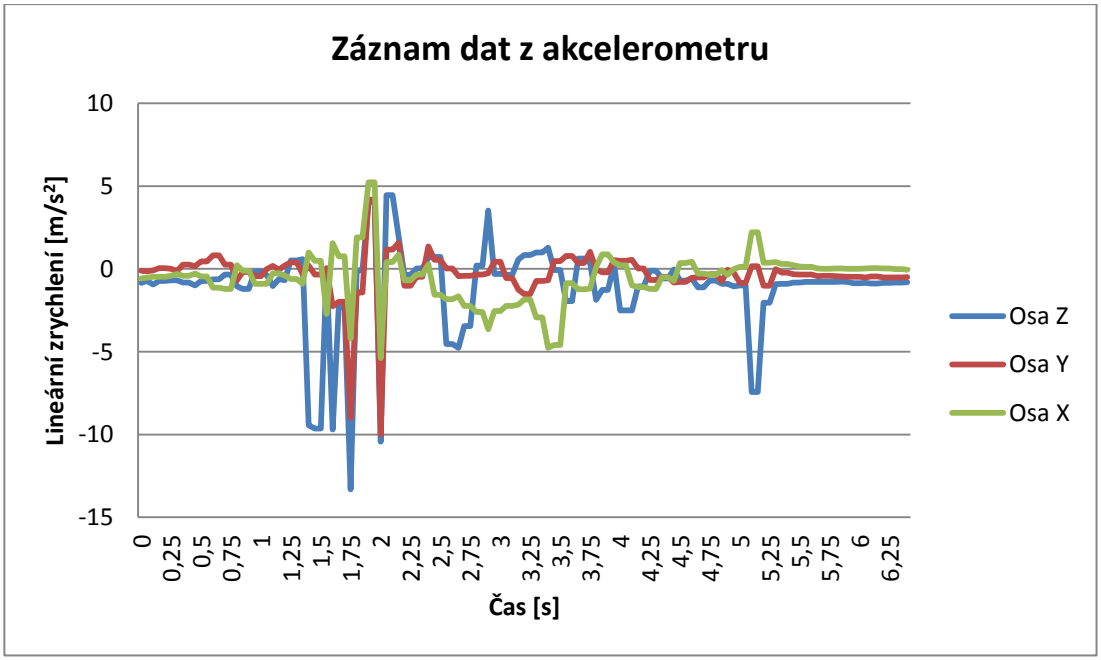
Obr. 23: Záznam relativní vlhkosti vzduchu senzorem SHT25

Dále jsem provedl měření na senzoru LPS331, který měří a sleduje atmosférický tlak. Data jsem zaznamenával také každých 10minut po dobu 7 hodin. Na obrázku obr. 24 jsou změřené údaje vynesené do grafu.



Obr. 24: Záznam tlaku vzduchu senzorem LPS331

Poté jsem ověřil funkčnost akcelerometru LSM303. Data ze senzoru jsem získával každých 50ms. Provedl jsem krátké měření a část hodnot jsem vynesl do grafu na obr. 25. Zde je jasně vidět úsek, kde jsem testoval pád zařízení z několika centimetrů. Nejvyšší zrychlení při pádu bylo naměřeno v ose Z a to 13,3 m/s^2.



Obr. 25: Měření lineárního zrychlení akcelerometrem LSM303

Také jsem ověřil funkci integrovaného senzoru osvětlení. Protože senzor slouží k rozpoznávání zavřeného přepravního boxu, umístil jsem sondu do různých prostředí a zaznamenal naměřené údaje. Ty jsou uvedeny v následující tabulce.

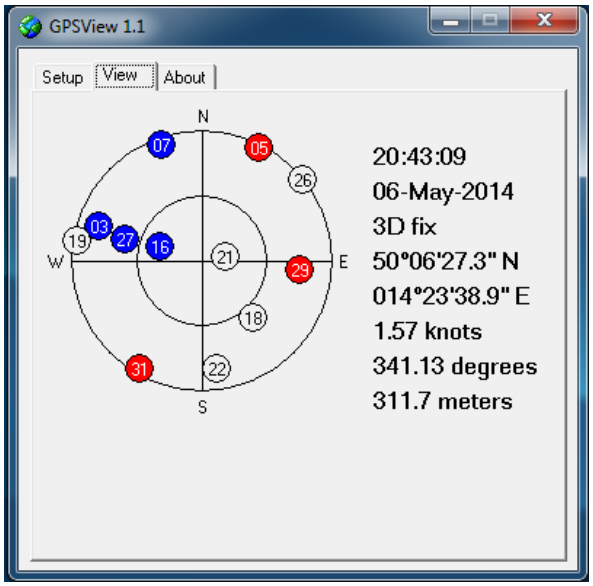
Podmínky	**Intenzita osvětlení [lux]**
Exteriér	845,1
Interiér místnosti	451,5
Interiér - šero	0,3
Zatemnění	0

Tab. 8: Naměřené údaje senzorem APDS-9300

Nakonec jsem ověřil funkci modulů GPS a GSM. Po zapnutí napájení začne GPS modul automaticky vysílat informační zprávu na sériový port. Zpráva je posílána ve standardizovaném protokolu NMEA 0183, který je určen právě pro navigační systémy. Zprávu jsem zpracovával softwarem GPSView 1.1. Na obr. 26 jsou vidět údaje získané z GPS. Datum a čas, přesná poloha, rychlost a nadmořská výška. Také jsou graficky znázorněny polohy viditelných družic a modře označeny ty, které využíváme k zaměření polohy.

Zde je ukázka jedné zachycené zprávy v protokolu NMEA 0183:

$GPRMC,204420.000,A,5006.4883,N,01423.6193,E,2.57,336.42,060514,,,A*65
$GPVTG,336.42,T,,M,2.57,N,4.77,K,A*39
$GPGGA,204420.000,5006.4883,N,01423.6193,E,1,4,3.69,369.6,M,45.5,M,,*57
$GPGSA,A,3,03,27,16,07,,,,,,,,,3.82,3.69,1.00*00
$GPGSV,4,1,13,21,73,080,,16,60,289,40,18,38,137,,27,35,286,37*7B
$GPGSV,4,2,13,29,22,096,17,22,16,172,,03,15,289,20,07,05,340,14*7A
$GPGSV,4,3,13,31,04,210,,19,04,279,,05,02,027,12,26,01,051,*79
$GPGSV,4,4,13,15,01,082,*44
$GPGLL,5006.4883,N,01423.6193,E,204420.000,A,A*54



Obr. 26: Zobrazení údajů z GPS přijímače

Poté jsem do patice vsunul SIM kartu a přepnul GSM modul do aktivního režimu. Ihned poté byla základní funkčnost signalizována modrou LED diodou, která se rozsvítí vždy při vysílání rádiového signálu. Modul se nejprve přihlásil do sítě operátora. Další komunikace s modulem probíhá prostřednictvím AT příkazů. Pomocí nich jsem vyzkoušel také odesílání zkušební zprávy SMS.

Následné testování celého zařízení proběhlo v pořádku. Po nahrání finálního programu do mikrokontroléru a připojení baterie jsem změřil spotřebu v režimu spánku, kdy je zařízení vypnuté. Ta dosahovala pouhých 56µA. Sonda by takto ve vypnutém stavu vydržela přibližně 2 roky než by došlo k vybití akumulátoru (uvažujeme kapacitu 1000mAh a nulové samovybíjení). Poté jsem sondu aktivoval tlačítkem a ověřil funkci rozpoznání uložení do přepravního boxu. Následně začala sonda odesílat každých 5 minut informační SMS s naměřenými údaji. Nakonec jsem ověřil i systém hlídání daných mezí, při jejichž překročení byla odeslána SMS s varováním. Fotodokumentace osazené DPS sondy a také průběh výroby je v příloze C obrázky C.1, C.2, C.3 a C.4.

5 Závěr

Cílem mé práce bylo navrhnout a poté sestrojit zařízení, které bude zajišťovat bezpečný převoz orgánů od dárce až do transplantačního střediska k příjemci a včas upozorní na případný problém. Zařízení mělo box sledovat a monitorovat dané veličiny, které jsou důležité pro udržení životaschopnosti orgánů. Periodicky mělo odesílat zprávu s naměřenými údaji a aktuální polohou a také mělo včas upozornit při překročení pevně daných mezí. Zařízení mělo dále splňovat podmínky minimální velikosti a také jeho spotřeby. To vše se mi v práci podařilo.

Jelikož jsem k řízení sondy využil mikrokontrolér, jehož program lze jednoduše upravit, tak se sonda stala velice univerzální a je možné ji případně využít i pro jiné účely. Jedním z nich může být sledování balíků a různých důležitých zásilek, kde je kladen důraz na bezpečnost dopravy. V programu lze jednoduše upravit všechny hlídané meze a celkově změnit aktuálně vykonávané funkce.

Během výroby a návrhu zařízení nastal jediný problém s několika senzory, které z počátku s mikrokontrolérem nekomunikovaly. Problém byl způsoben špatným osazením a zapájením těchto senzorů. Součástky byly příliš malé pro ruční osazování, a proto je bylo nutné odpájet z plošného spoje a osadit znovu. Další problémy již byly způsobeny jen chybami v programu, kdy bylo nutné správně nastavit komunikační sběrnice. Zde jsem vše vyřešil zobrazením průběhů na osciloskopu a následnou korekcí. Po těchto úpravách již celé řízení pracovalo spolehlivě.

Do budoucna bych rád pro zařízení napsal obslužný program pro osobní počítač, kde by bylo možné jednoduše přenastavit všechny hlídané meze a také měřící rozsahy. K tomuto účelu bych využil integrované USB rozhraní. Další zajímavou možností je pak využití GSM modemu k odesílání naměřených údajů prostřednictvím datových přenosů na centrální server.

V současné době probíhá testování sondy v praxi u zákazníka. Při výskytu drobných chyb nebo při jeho požadavku na úpravy, které jsou vždy jen programové, je ihned provedu. Po důkladném otestování tak již nic nebrání nasazení sondy pro sledování podmínek v praxi.

Použitá literatura

[1] VOBECKÝ, Jan; ZÁHLAVA, Vít. *Elektronika: Součástky a obvody, principy a příklady*. 3. rozšířené vydání. Praha: Grada Publishing, a.s., 2005. 220 s. ISBN 80-247-1241-5.

[2] ZÁHLAVA, Vít. *OrCAD 10*. 1.vydání. Praha: Grada Publishing, a.s., 2004. 224 s.

[3] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. 1.vydání. Praha: BEN, 2010. 123 s. ISBN 978-80-7300-266-4.

[4] HUSÁK, Miroslav. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Praha: ACADEMIA, 2008, 544 s. ISBN ISBN 978-80-200-1478-8.

[5] BEEBY, Stephen. *MEMS mechanical sensors*. Boston: Artech House, 2004, x, 269 s. ISBN 15-805-3536-4.

[6] AGGARWAL, Priyanka. *MEMS-based integrated navigation*. Norwood: Artech House, c2010, xiii, 197 s. GNSS technology and applications series (Artech House). ISBN 978-1-60807-043-5.

[7] VODRÁŽKA, Jiří a Ivan PRAVDA. *Principy telekomunikačních systémů*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2006, 130 s. ISBN 80-010-3366-X.

[8] HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C*. 6. vyd. České Budějovice: Kopp, 2009, 271, viii s. ISBN 978-80-7232-383-8.

[9] TŘEŠKA, Vladislav. *Transplantace ledvin od nebijících dárců*. 1. vyd., 2008. Praha: Maxdorf, 2008. ISBN ISBN-13: 978-80-7345-167-7.

[10] ŠMÍD, David. *Transplantace orgánů*. [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.prosestry.cz/studijni_materialy/chirurgie/transplantace-organu>.

[11] HAUZR, Miroslav. *Problematika dárcovství orgánů*. [online]. 2014 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://vos.mills.cz/assets/vos/vos-absolventske-prace-2014/AP14DZZKS-Hauzr.pdf>.

[12] Texas Instruments. *MSP430x5xx and MSP430x6xx Family User's Guide (Rev. M)* [online]. 2013-02-18 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/slau208m/slau208m.pdf >.

[13] AVAGO, Technologies. APDS-9300 Data Sheet. [online]. 2008 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: http://www.avagotech.com/docs/AV02-1077EN

[14] STMicroelectronics. *LPS331 Data sheet*. [online]. 2012 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00036196.pdf >.

[15] STMicroelectronics. *LSM303DL Data sheet*. [online]. 2012 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00036185.pdf >.

[16] SENSIRION. *Datasheet SHT25*. [online]. 2011 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT25_Datasheet_V2.pdf>.

[17] Taoglas antenna solutions. *Antenna GP.1575.15. 4. B. 02 Data Sheet*. [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.taoglas.com/images/product_images/original_images/GP.1575.15.4.B.02%2015x15x4mm%20patch%20280110.pdf>.

[18] Sierra Wireless. *AirPrime - WS6318 - Product Technical Specification and Customer Design Guidelines*. [online]. 2012 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://developer.sierrawireless.com/Resources/Resources/AirPrime/Hardware_specs_user_guides/AirPrime_WS6318_Product_Technical_Specification_and_Customer_Design_Guidelines.aspx>.

[19] QUECTEL. *L70 Hardware design V1.0*. [online]. 2012 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <ftp://soselectronic.cz/QUECTEL/L70/L70_HD_V1.0.pdf>.

[20] *Zápisky z přednášek X34SES* [online]. [cit. 2014-04-18] Dostupné z: < http://www.micro.feld.cvut.cz/home/x34ses/prednasky/>.

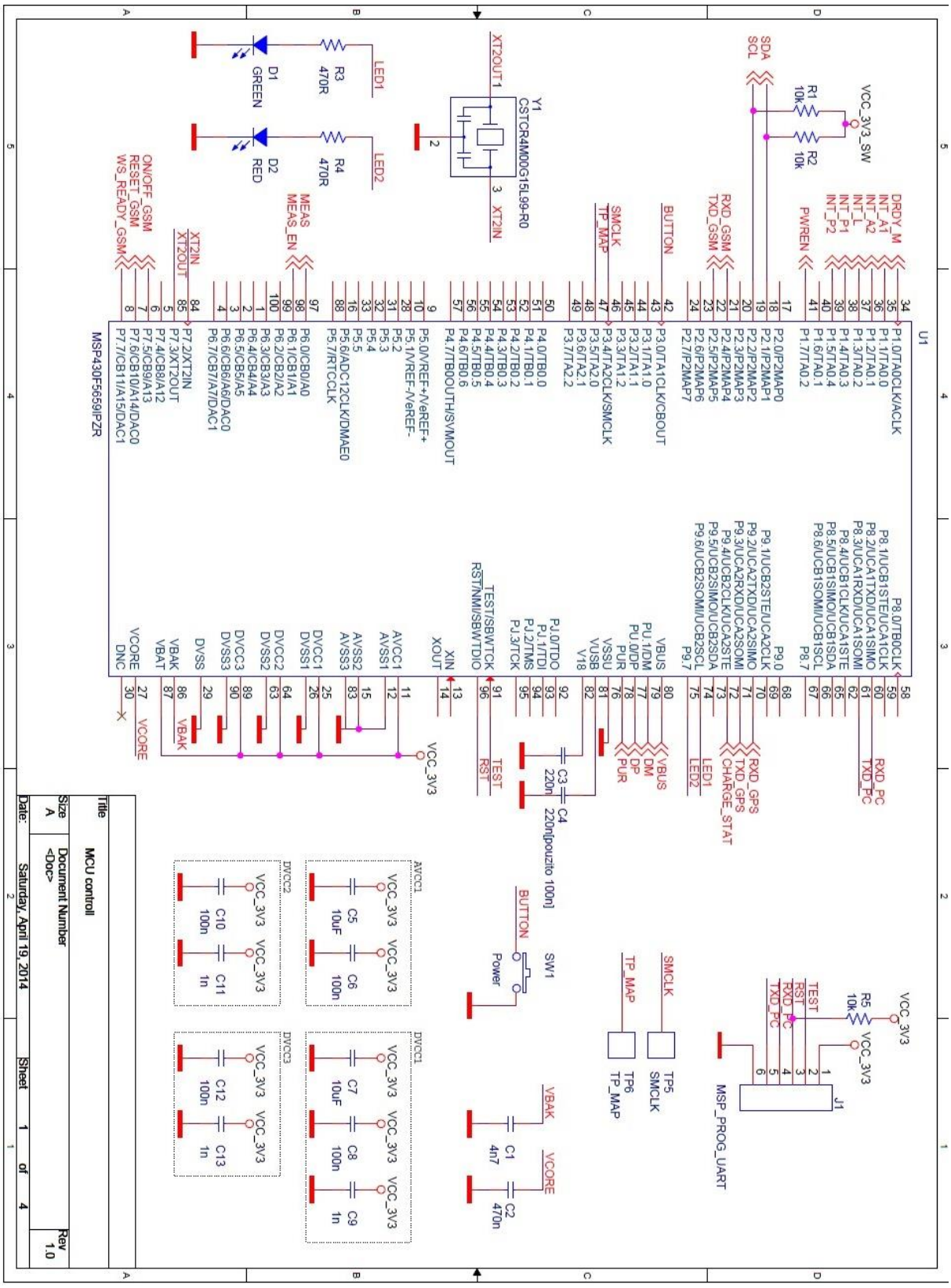
[21] CETL, Tomáš a Vítězslav BENDA. *Přednášky z A1M13EZF*. 2013-10-10. Dostupné z: <http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/245/9._Pb_aku.pdf>.

[22] *Vzdělávání zdravotníků: Transplantační centra v ČR*. [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.vzdelavani-zdravotniku.cz/sites/default/files/2012/demo-ekurzy/edukace-pacienta-s-nefrologickym-onemocnenim/5957.html>.

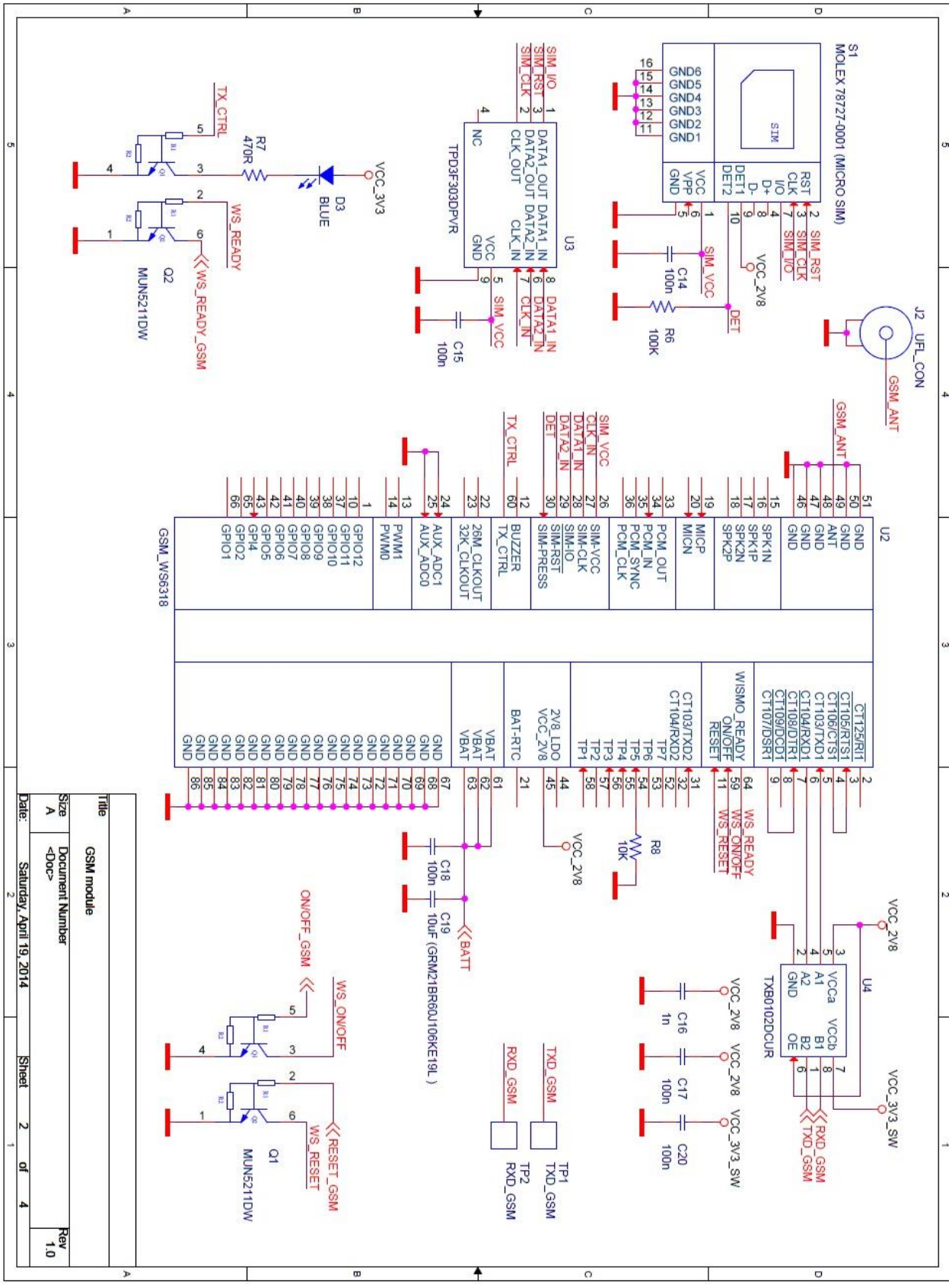
[23] ŽÁČEK, Martin. *ALDEBARAN BULLETIN: Kelvin, mol, kandela – poslední tři jednotky soustavy SI* [online]. AGA, 2005, roč. 3, Speciál A [cit. 2014-05-11]. ISSN ISSN 1214-1674. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_s1_uni.php

Přílohy

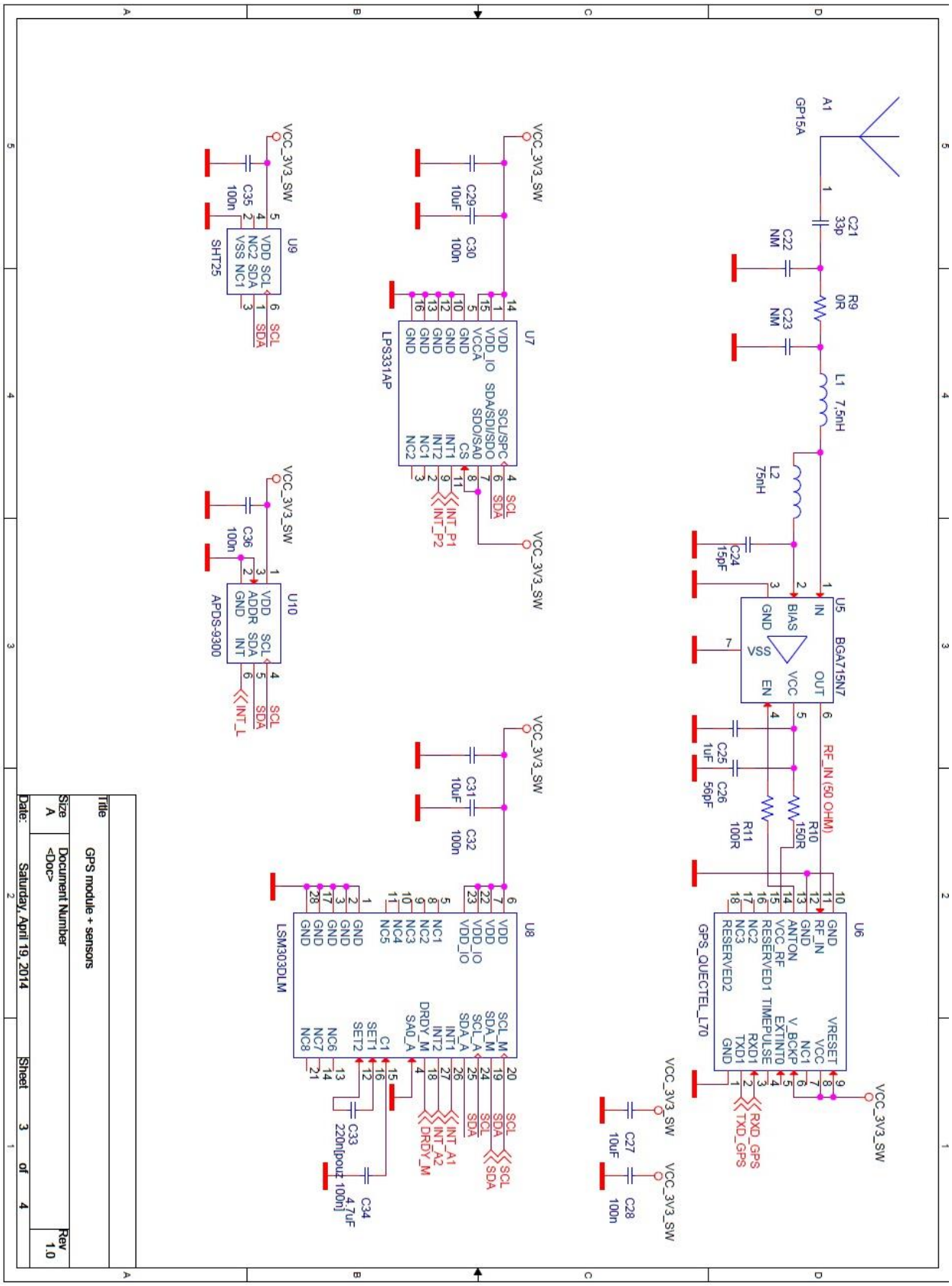
Příloha A - Celkové schéma zapojení sondy



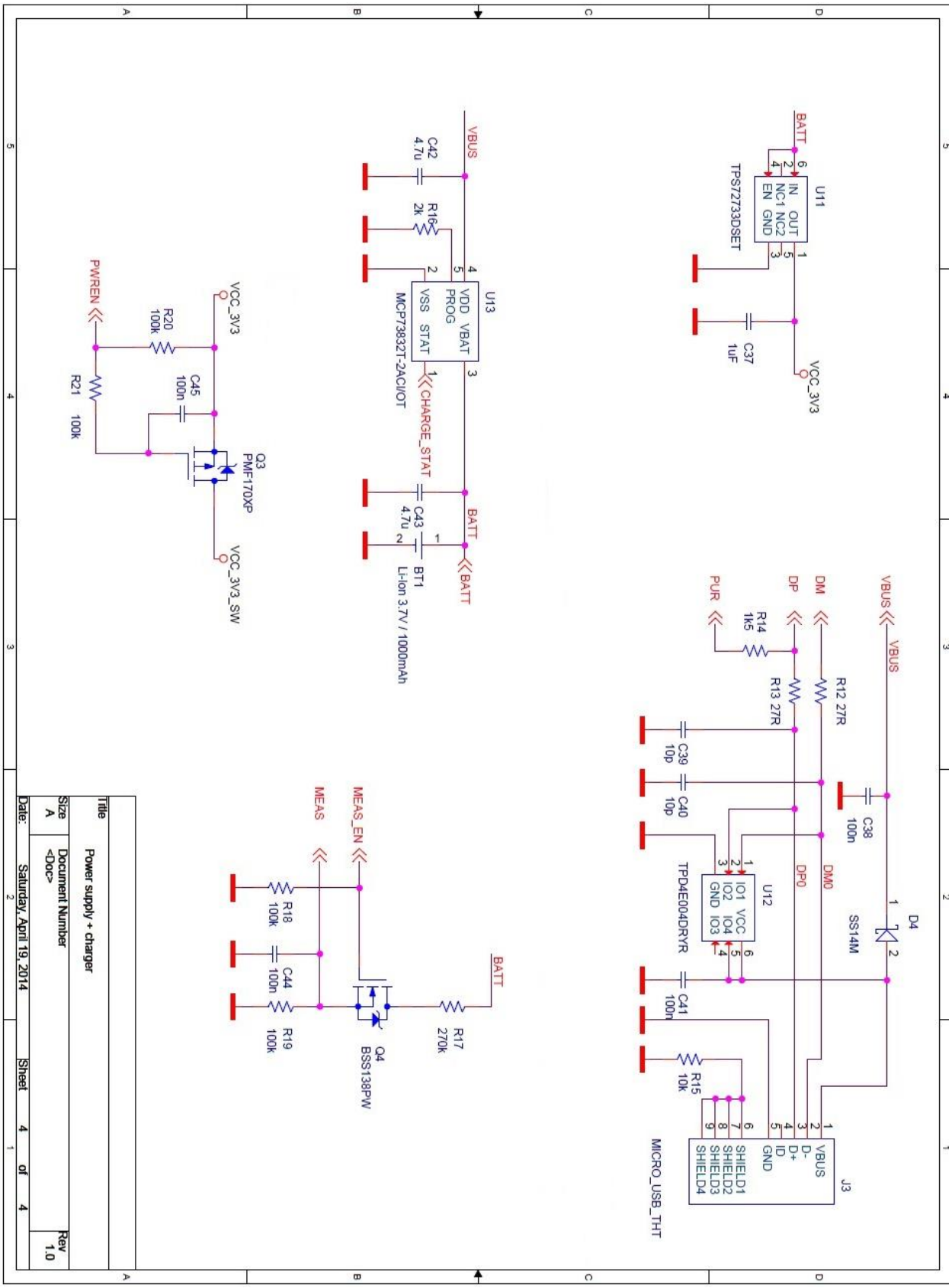
Obr.A.1: Celkové schéma zapojení (strana 1)



Obr.A.2: Celkové schéma zapojení (strana 2)

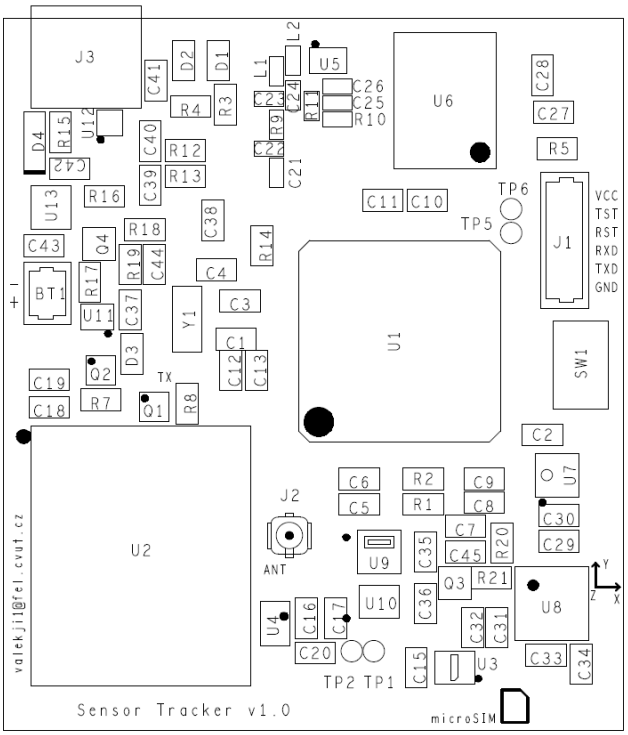


Obr.A.3: Celkové schéma zapojení (strana 3)

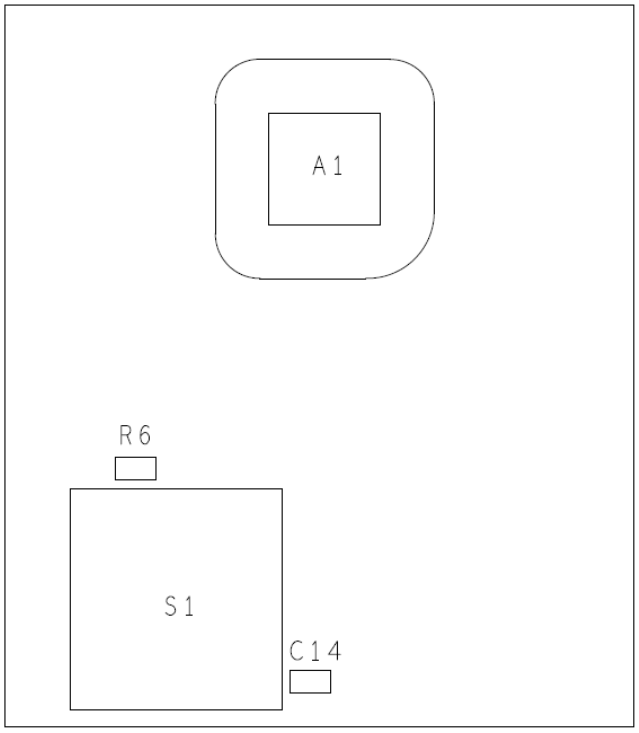


Obr.A.4: Celkové schéma zapojení (strana 4)

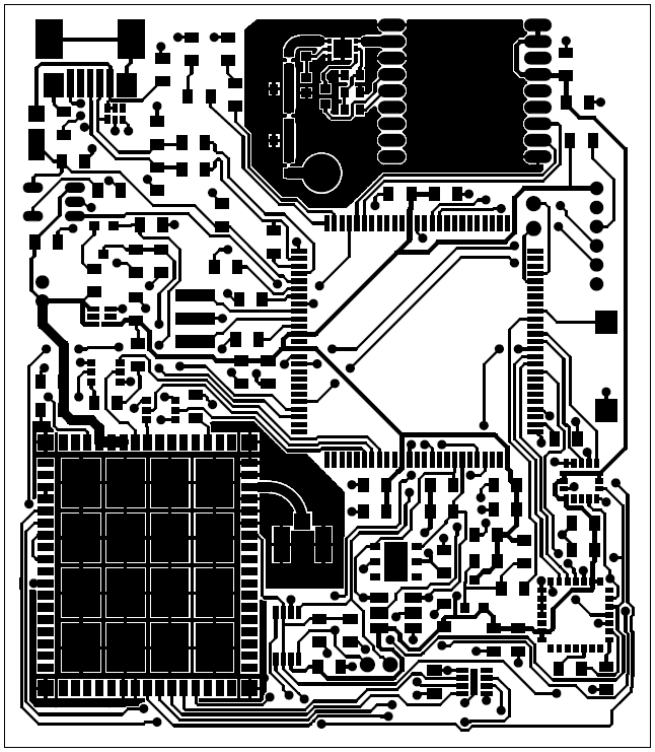
Příloha B - Filmy DPS



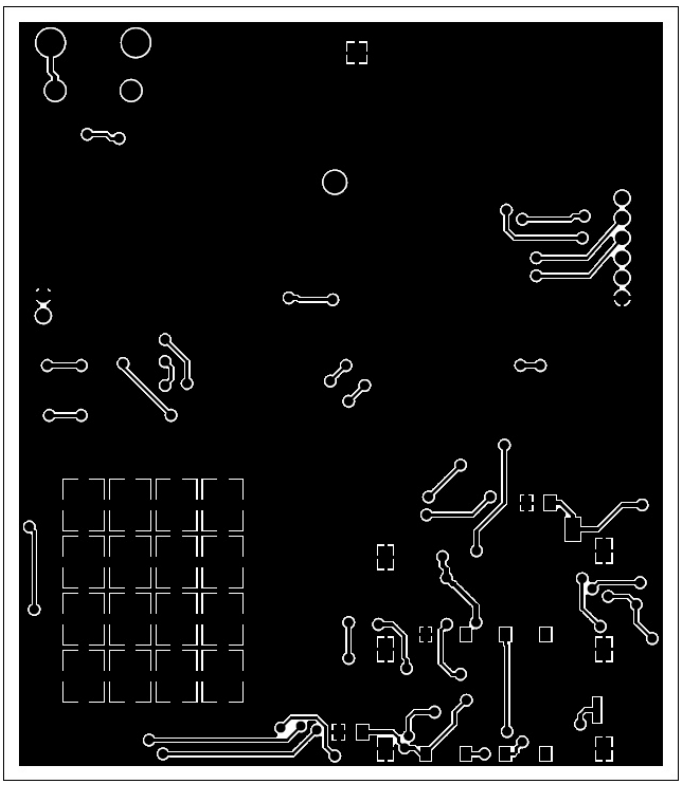
Obr.B.1: Osazovací plán DPS strana TOP



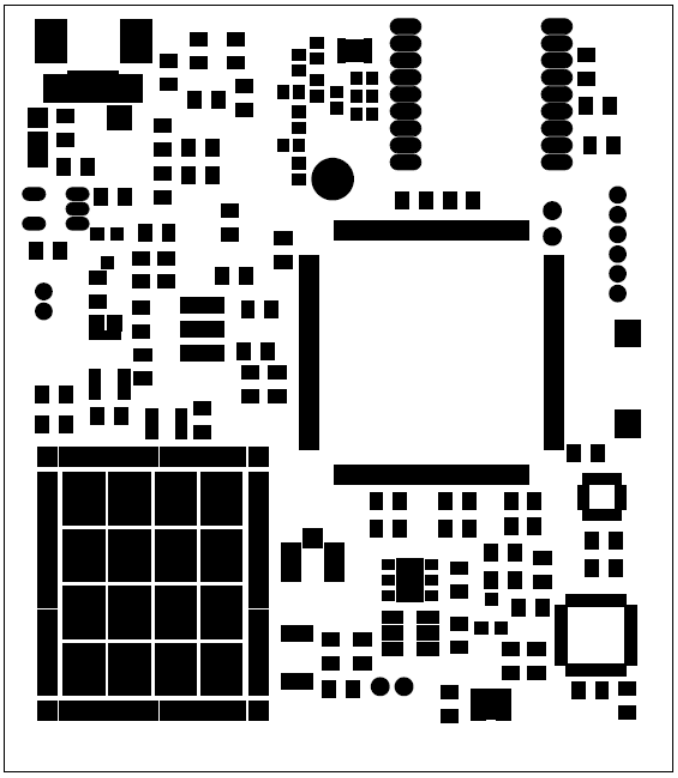
Obr.B.2: Osazovací plán DPS strana BOTTOM



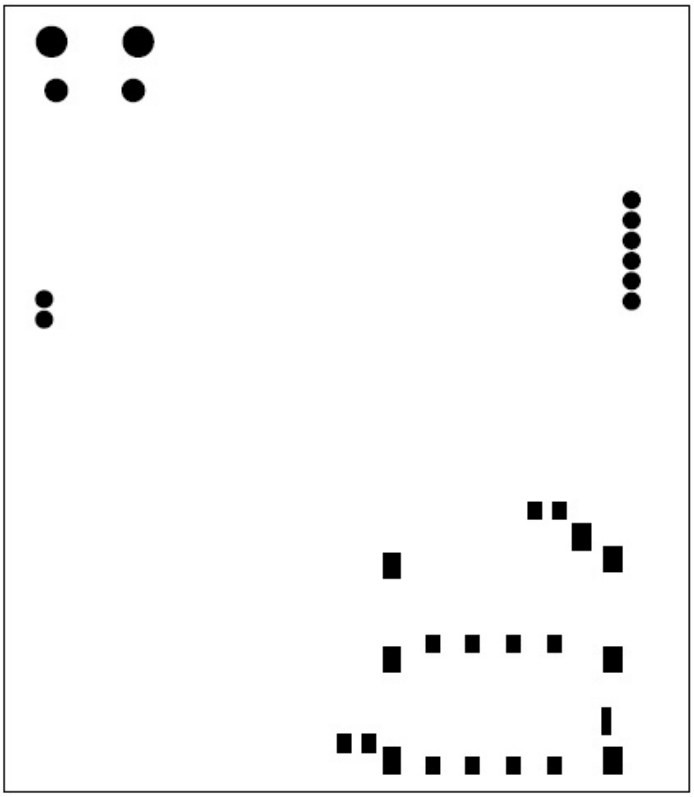
Obr.B.3: Filmy spojů a pájecích plošek strany TOP



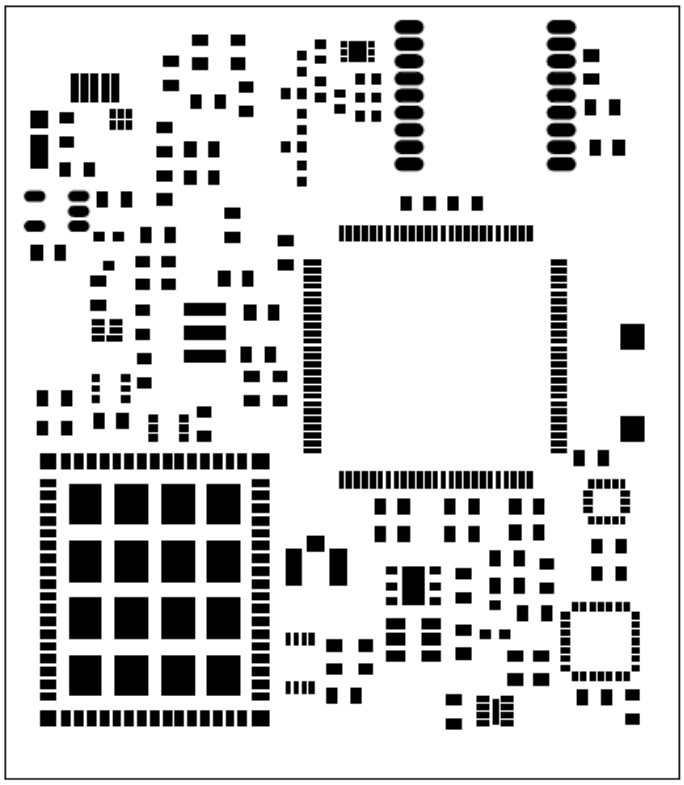
Obr.B.4: Filmy spojů a pájecích plošek strany BOTTOM



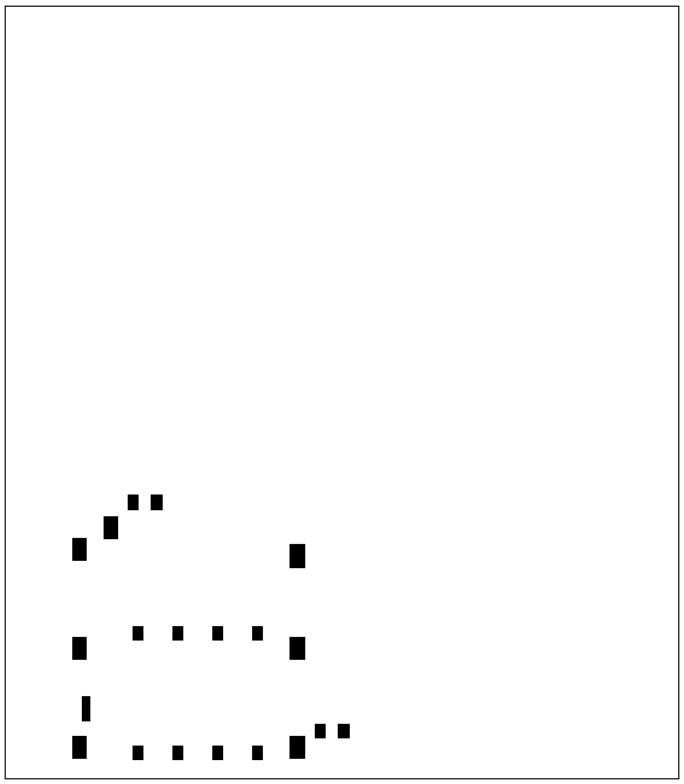
Obr.B.5 Filmy nepájivé masky strany TOP



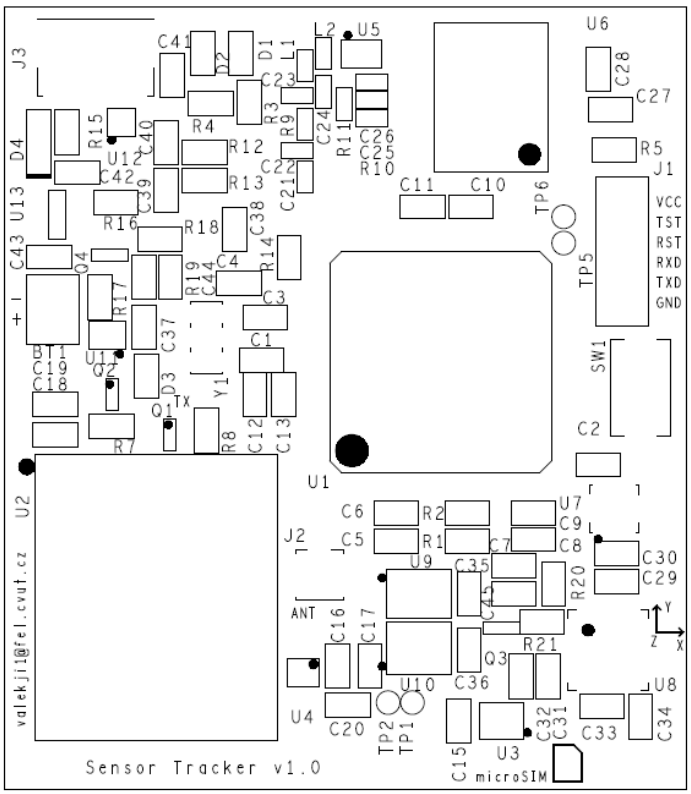
Obr.B.6 Filmy nepájivé masky strany BOTTOM



Obr.B.7 Filmy pro nanášení pájecí pasty TOP

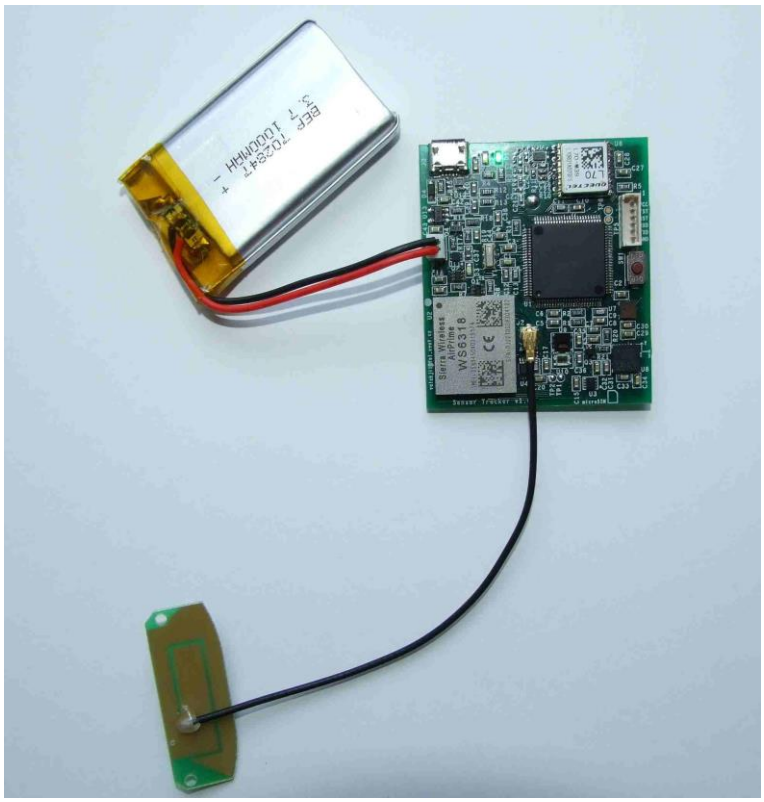


Obr.B.8 Filmy pro nanášení pájecí pasty BOTTOM

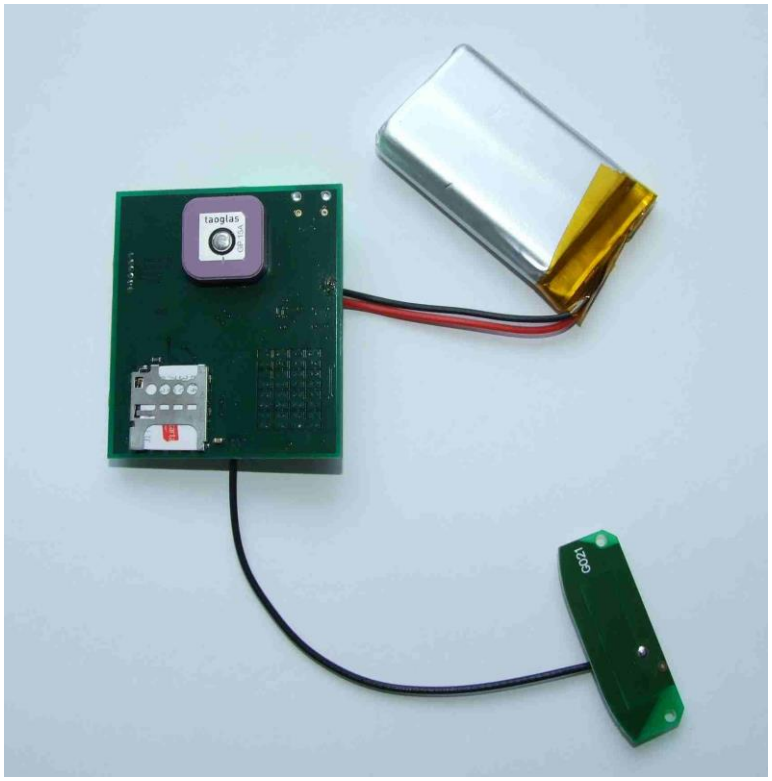


Obr.B.9 Filmy servisního potisku strany TOP

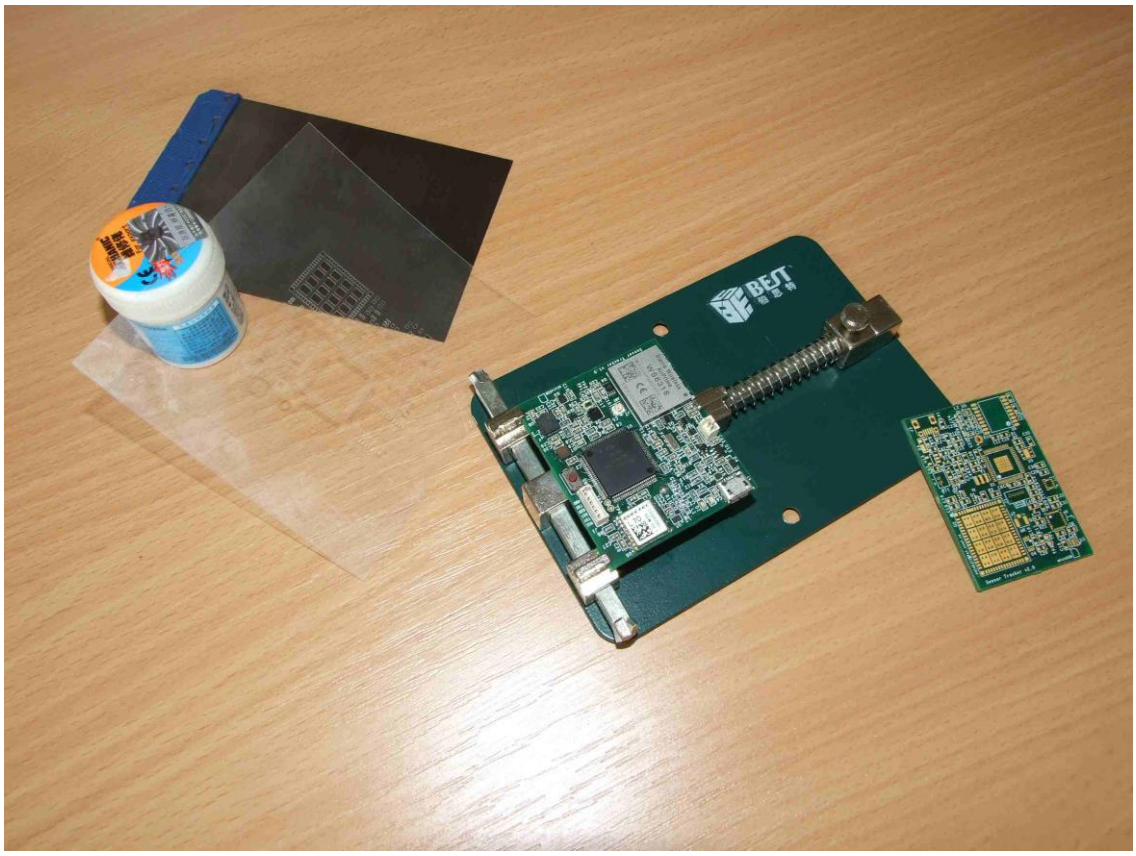
Příloha C - Fotografie zařízení



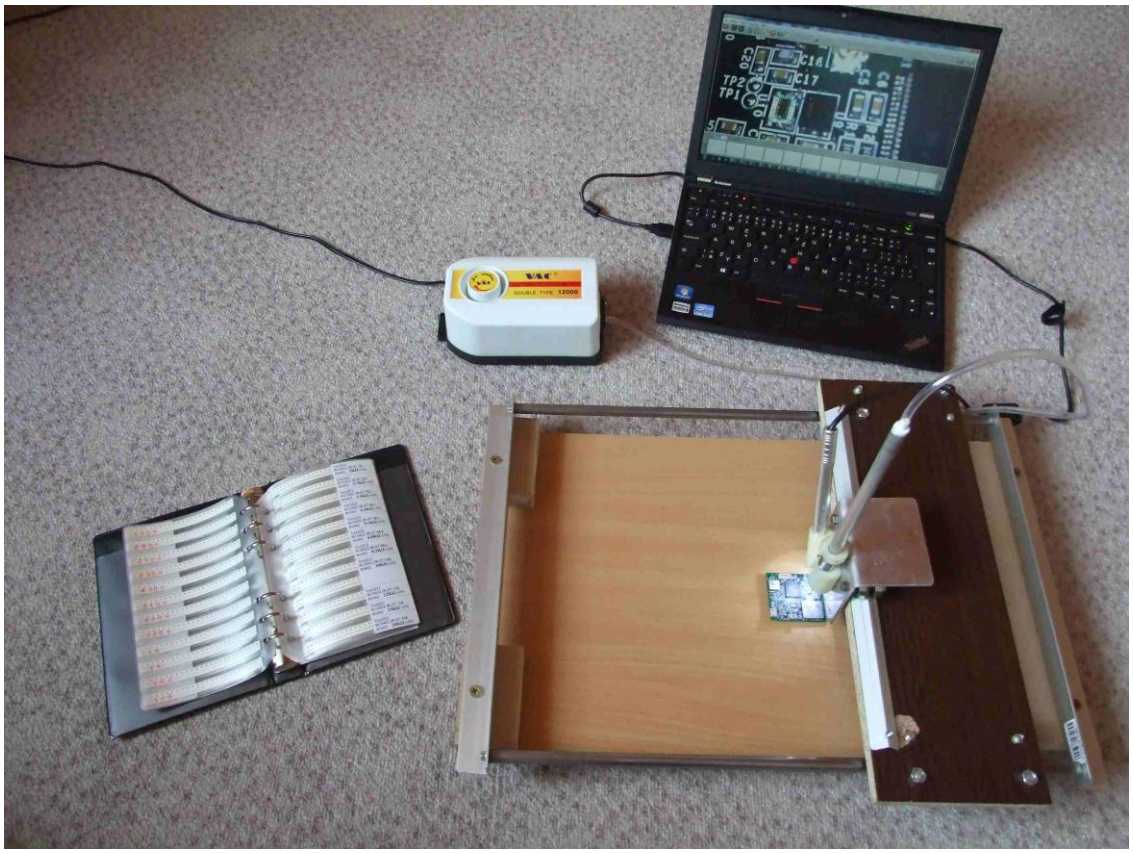
Obr.C.1: Fotografie sondy v provozu



Obr.C.2: Fotografie zadní strany DPS

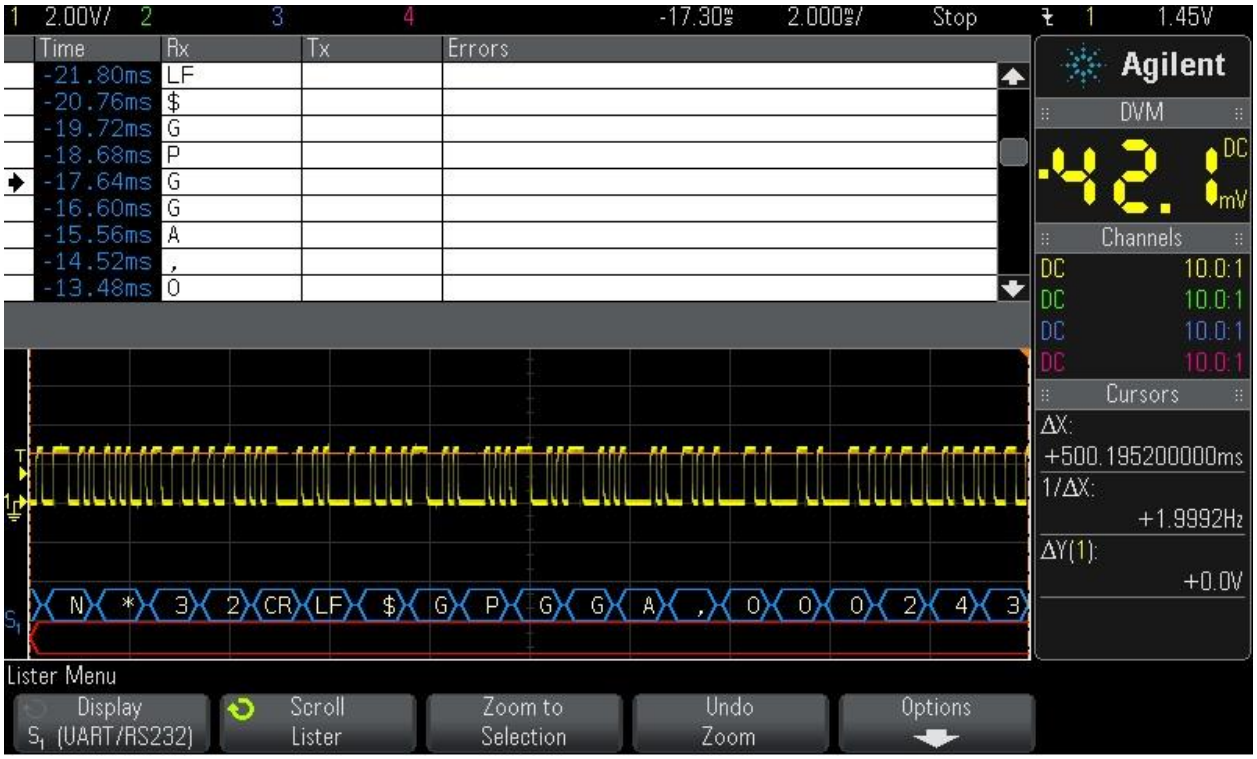


Obr.C.3: Fotografie z výroby

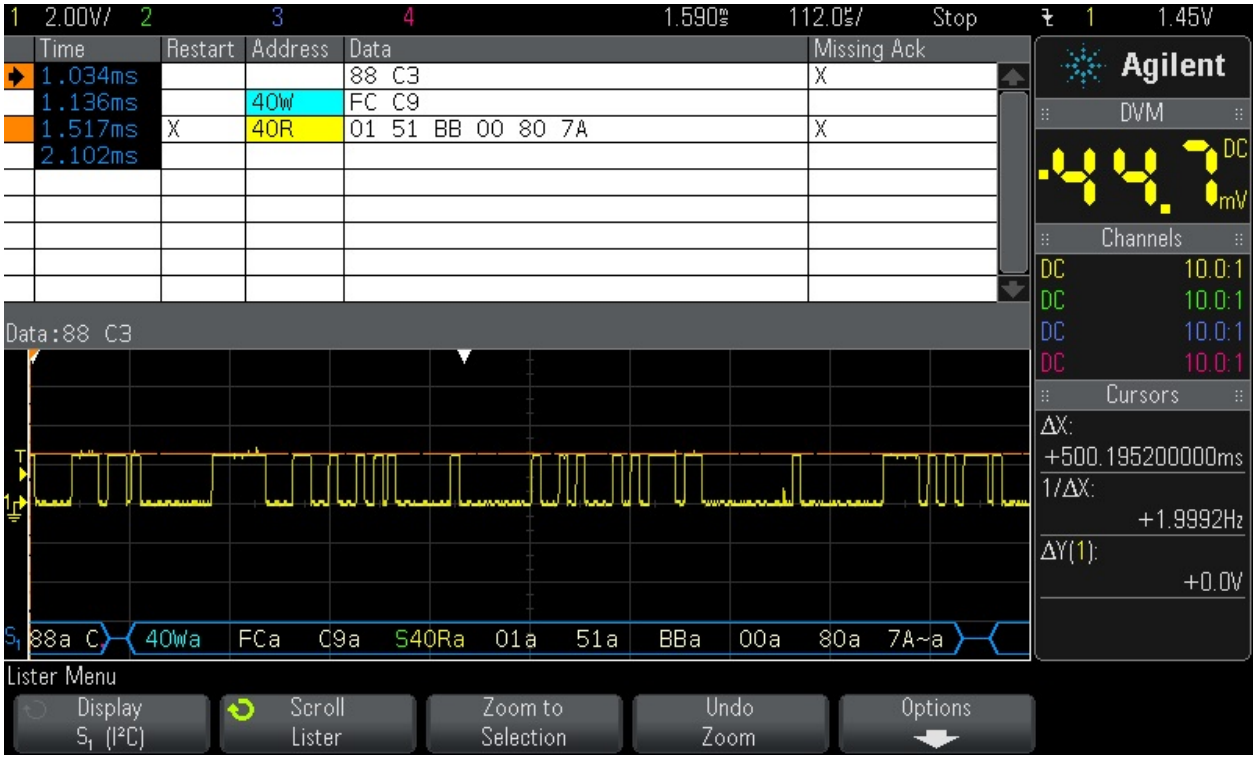


Obr.C.4: Fotografie osazovaní DPS pomocí manipulátoru

Příloha D - Naměřené průběhy



Obr.D.1: Měření na sběrnici UART (komunikace s GPS)



Obr.D.2: Měření na sběrnici I^2C

Příloha E – Seznam použitých součástek

Reference	**Značení / Součástka**	**Pouzdro**	Počet
R9	0 Ω	0402	1
R14	1,5 kΩ	0603	1
C9, C11, C13, C16	1 nF keramický	0603	4
C25, C37	1 µF keramický	0603	2
R16	2 kΩ keramický	0603	1
C1	4,7 nF keramický	0603	1
C34, C42, C43	4,7 µF keramický	0603	3
L1	0603CS-7N5XGLU	0402	1
R1, R2, R5, R8, R15	10 kΩ	0603	5
C39, C40	10 pF keramický	0603	2
C5, C7, C19, C27, C29, C31	10 µF keramický	0603	6
C24	15 pF keramický	0402	1
R12, R13	27 Ω	0603	2
C21	33 pF keramický	0402	1
C26	56 pF keramický	0603	1
L2	0603CS-75NXGLU	0402	1
R6, R18, R19, R20, R21	100 kΩ	0603	5
C6, C8, C10, C12, C14, C15, C17, C18, C20, C28, C30, C32, C35, C36, C38, C41, C44, C45	100 nF keramický	0603	18
R10	150 Ω	0603	1
R11	100 Ω	0603	1
C3	220 nF keramický	0603	1
C3, C4, C33	220 nF	0603	3
R17	270 kΩ	0603	1
C2	470 nF keramický	0603	1

R3, R4, R7	470 Ω	0603	1
U10	APDS-9300-020	SMD	1
U5	BGA715N7	SMD	1
D3	LED modrá	0603	1
Q4	BSS138PW	SOT323	1
Y1	CSTCR4M00G15L99-R0	SMD	1
A1	GP.15A (anténa GPS)	X	1
U6	Quectel L70	X	1
D1	LED zelená	0603	1
U2	Siera Wireless WS6318	LGA	1
BT1	Li-ion 3,7V/1000mAh	X	1
U7	LPS331AP	LGA	1
U8	LSM303DLM	LGA	1
U13	MCP73832T-2ACI/OT	SOT23	1
J3	Micro USB (10104110-0001LF)	X	1
S1	MOLEX 78727-0001 (MICRO SIM)	X	1
J1	Molex 53398-0671	X	1
Q1, Q2	MUN5211DW	SOT323	2
C22, C23	Neosazovat	0603	2
Q3	PMF170XP	SOT323	1
SW1	Mikro tlačítko (KSR231G LFS)	X	1
D2	LED červená	0603	1
TP1, TP2, TP3, TP4, TP5, TP6	testpoint	X	6
U9	SHT25	SMD	1
D4	SS14M	SMD	1
U3	TPD3F303DPVR	SMD	1
U12	TPD4E004DRYR	SMD	1
U11	TPS72733DSET	SMD	1
U4	TXB0102DCUR	SMD	1
J2	UF.L konektor	SMD	1

Tab.E.1: Seznam použitých součástek