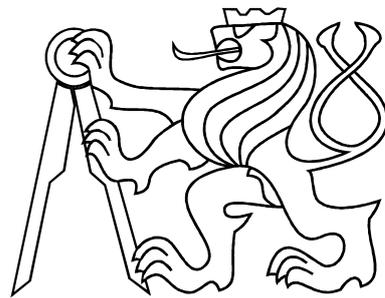


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



Diplomová práce

Experimentální létající stroj - orientace
v prostoru

Praha, 2008

Jan Mareček

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém 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 22. května 2008

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Maučh', written over a horizontal line.

podpis

Poděkování

Zejména děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Jiřímu Bayerovi CSc. za cenné rady, nové pohledy a optimismus po celou dobu práce. Velký dík patří rodině, přátelům a všem kolegům, kteří mě po celou dobu studia podporovali a poskytovali zázemí pro práci.

Abstrakt

Náplní práce je návrh a realizace embedded řídicího systému pro stroj typu quadrotor, který je realizován v rámci diplomové práce Quadrotor základní řízení [9].

Rozpracována je problematika metod měření polohy, typů senzorů a realizován výběr vhodných typů. Je zde proveden komplexní návrh jednotky inerciálních měření včetně filtrace a zpracování získaných dat do stavu vhodného pro řízení. Dále je prezentován návrh a realizace palubního řídicího systému na platformě ARM7 včetně příslušného programového vybavení.

Abstract

This master thesis aims at the design and the realisation of the embedded control system for the quadrotor unmanned aerial vehicle, which was developed as a part of another master thesis, called „Quadrotor - basic control“[9].

This thesis appertain to the problem of choosing a suitable types of sensors and methods for position measurement. It has been done a complex design of the inertial measurement unit including data filtration and data postprocessing. There is also presented a complete design of on-board control system based on the ARM7 platform including software equipment.

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Jan Mareček

Obor: Technická kybernetika

Název tématu: Experimentální létající stroj - orientace v prostoru

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s ideovým návrhem koncepce vznášedla a se základním řízením jeho pohybu v prostoru.
2. Vznášedlo představuje "talíř" se čtyřmi samostatně říditelnými motory. S ohledem na použití je požadován minimální rozměr a minimální váha vznášedla.
3. Navrhněte koncepční řešení sofistikovaného řízení vznášedla pro jeho pohyb v neznámém prostředí s překážkami.
4. V návaznosti na paralelní DP P.Henricha (základní dálkové řízení vznášedla) navrhněte a realizujte ústřední jádro řídicího systému vznášedla dálkově řízeného ze stacionárního nadřazeného PC.
5. Řídicí systém koncipujte jako "otevřený" tak, aby mohl komunikovat s několika dalšími "vloženými" systémy.
6. Navrhněte a realizujte senzorický podsystém vznášedla (inerciální měření, detekce překážek, dálkoměrný systém) a systém filtrace a zpracování měřených dat pro zajištění letu stroje po předem definované trajektorii v prostředí s překážkami.
7. Vypracujte podrobnou dokumentaci HW a SW řešení létajícího stroje.

Seznam odborné literatury: Dodá vedoucí práce.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jiří Bayer, CSc.

Termín zadání diplomové práce: zimní semestr 2006/2007

Termín odevzdání diplomové práce: leden 2008

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc.
děkan

Obsah

Seznam použitých zkratek	1
1 Úvod	2
1.1 Popis stroje typu Quadrotor	2
1.2 Zadání	2
1.3 Základní požadavky	3
1.4 Popis konkrétního stroje	3
1.4.1 Mechanická konstrukce rámu	4
1.4.2 Pohon	4
2 Orientace v prostoru	5
2.0.3 Způsoby měření	6
2.0.4 Typ prostředí	6
2.0.5 Další vlivy	6
2.1 Závěr	7
3 Senzorový subsystém	8
3.1 Ideový návrh	8
3.2 Stabilizace	9
3.2.1 Technologie MEMS (mikro elektro-mechanické systémy)	9
3.2.1.1 Akcelerometry	9
3.2.1.2 Gyroskopy	9
3.2.2 Realizace inerciální jednotky	10
3.2.3 Modul senzorů	11
3.2.4 Modul převodníku	13
3.2.5 Celá sestava subsystému inerciálního měření	14
3.3 Rozšíření systému senzorů	14

3.3.1	Výškoměr	15
3.3.2	Magnetický kompas CMPS03	16
3.3.3	Ultrazvukový dálkoměr	17
3.3.4	Laserový dálkoměr	19
3.3.5	Přijímač GPS	19
4	Zpracování dat z inerciální jednotky	21
4.1	Surová data a přepoččet	21
4.1.1	Popis senzorů a jejich parametrů	21
4.1.2	Princip určení hodnoty s fyzikálním rozměrem	21
4.1.3	Měřená data	23
4.2	Rušení a chyby měření	24
4.2.1	Vlastní šum senzorů a převodníku	24
4.2.2	Vibrace pohonu	25
4.2.3	Další náhodné jevy - náraz na překážku	27
4.3	Navržené řešení výpočtu úhlů náklonu	27
4.3.1	Výpočet úhlu rozkladem tíhového zrychlení	27
4.3.2	Výpočet úhlu integrací úhlové rychlosti	28
4.3.3	Srovnání metod	29
4.4	Filtrace	30
4.5	Implementace	31
4.6	Simulace a měření	33
4.7	Závěr	33
5	Palubní elektronika	36
5.1	Hardware pro základní experimenty a xPC Target	36
5.1.1	Výčet základních vlastností ATmega128	36
5.1.2	Popis realizované desky s ATmega128	37
5.1.3	Závěr a výsledky	38
5.2	Nová platforma řízení s ARM7	39
5.2.1	Procesor	39
5.2.1.1	Základní data procesoru AT91SAM7X256	40
5.2.2	Vývojová deska Olimex	41
5.2.3	Finální realizace desky řízení	42
5.3	Komunikační subsystém	49

5.3.1	Lantronix WiPort	50
6	Palubní software	53
6.1	Software pro AVR ATmega128	53
6.2	Software pro platformu s ARM7	53
6.3	FreeRTOS	54
6.4	Struktura programu	54
6.5	Algoritmy řízení	56
6.6	Komunikační protokol	56
6.7	Vývojový řetězec	58
7	Software pozemní stanice	59
7.1	Testovací software pro platformu AVR	59
7.2	Operátorský panel pro novou koncepci	59
8	Realizace palubní elektroniky	61
9	Závěr	64
9.1	Deska řízení	64
9.2	Jednotka inerciálních měření	64
9.3	Podpora orientace v prostředí	65
9.4	Software	65
9.5	Shrnutí	66
A	Soupisky součástek	I
A.1	Deska řízení s ATmega128	I
A.2	Deska řízení s ARM7	II
A.3	Deska převodníku	III
A.4	Deska senzorů	III
A.5	Deska WiFi	IV
B	Motivy desek plošných spojů	V
B.1	Deska řízení s ATmega128	V
B.2	Deska řízení s ARM7	VII
B.3	Deska WiFi	XI
B.4	Deska převodníku	XII
B.5	Deska senzorů	XIV

C Popis konektorů a signálů	XVII
C.1 Deska řízení s ATmega128	XVII
C.2 Deska převodníku	XXI
C.3 Deska senzorů	XXIII
C.4 Deska řízení s ARM7	XXIV
C.5 Deska WiFi	XXXI
D Struktura přiloženého CD	XXXIII
Seznam obrázků	XXXIII
Seznam tabulek	XXXVII
Literatura	XLI

Seznam použitých zkratek

<i>I</i> ² <i>C</i>	Inter-Integrated Circuit,
AD	analogově/digitální,
CEPOT	Centrum Podpory Talentů,
DOF	Degrees of freedom,
DPS	deska plošných spojů,
EMC	Electro Magnetic Compatibility,
GPIO	General Purpose Input/Output,
GPL	GNU General Public License,
GPS	Global Positioning System,
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems,
OS	Operační systém,
PWM	Pulse Width Modulation,
RT	Real-time,
SMD	Surface mount device,
SPI	sériové periferní rozhraní,
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter,
VTOL	Vertical Takeoff and Landing,

Kapitola 1

Úvod

1.1 Popis stroje typu Quadrotor

Quadrotor je stroj s kolmým startem a přistáním (v anglické literatuře často označovaný VTOL). První pokusy o realizaci stroje této koncepce spadají do dvacátých let minulého století viz obr.1.1. Let vertikálním směrem i manévrování zajišťuje čtveřice vrtulí, které jsou po párech umístěny v protiběžné konfiguraci viz obr.1.2. Použité vrtule jsou s pevným náběhem, takže řízení směru je možné pouze změnou relativních rychlostí, tedy tahem a momentem jednotlivých rotorů. Tento koncept je velice zajímavý z hlediska měření a regulace. Díky dostupnosti nových technologií a součástek je možné realizovat tento typ stroje v menším měřítku, vhodném pro zkoumání jeho vlastností.

1.2 Zadání

Cílem práce je ucelený návrh koncepce a následně realizace řídicího systému pro experimentální létající stroj, který je realizován v diplomové práci Petr Heinrich - Experimentální létající stroj - základní řízení [9]. Celý projekt byl řešen v rámci CEPOT. Obsahem této práce pokrývá širokou oblast návrhu od základní představy o funkci a vlastnostech palubní elektroniky, přes průzkum a výběr metod měření, návrh hardwaru, výběr součástkové základny, způsob komunikace a tvorbu programového vybavení, až po metody filtrace dat a potlačení chyb senzorů. Předložené řešení je navrženo pro použití na konkrétním stroji typu quadrotor, avšak jeho použití je naprosto obecné a je možné jej aplikovat i na jiné úlohy.



Obrázek 1.1: De Bothezat Helicopter

1.3 Základní požadavky

Zadání práce je dosti rozsáhlé. Hlavní požadavky a směry návrhu udávají tyto body:

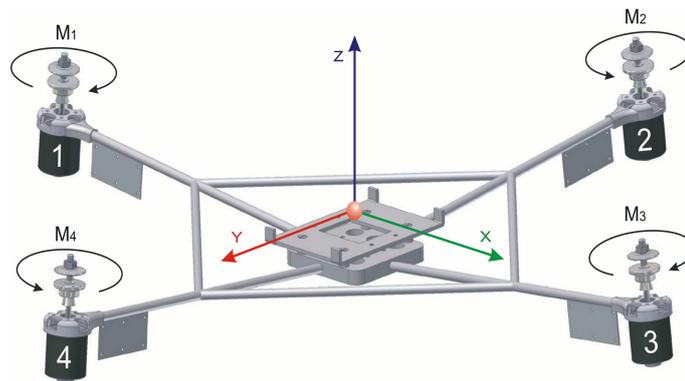
- Palubní počítač pro základní řízení a měření
- Bezdrátová komunikace s pozemní obsluhou
- Sensorický subsystém pro určení polohy stroje
- Subsystém detekce překážek
- Otevřenost a rozšiřitelnost systému

1.4 Popis konkrétního stroje

Celý systém elektroniky, senzorů i softwarového vybavení je navrhován modulárně a je možné ho využít i v jiných aplikacích vyžadujících orientaci v prostoru. Pro použití na stroji quadrotor byla do návrhu zahrnuta specifika jeho konstrukce. Zejména se jedná o napojení na pohonné systémy, mechanickou stránku návrhu s ohledem na umístění a vestavbu do stroje.

1.4.1 Mechanická konstrukce rámu

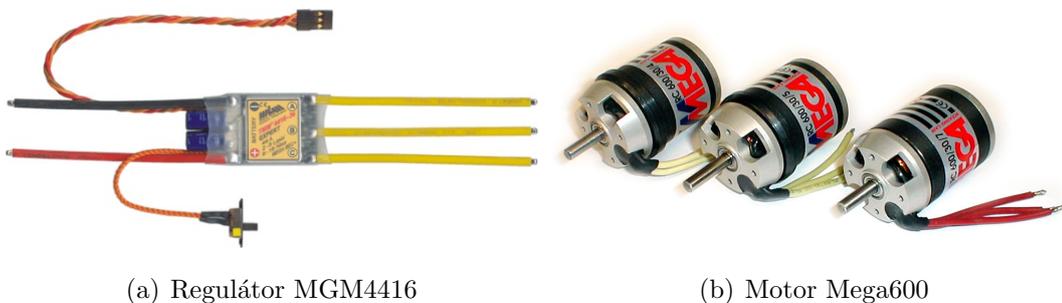
Rám stroje je tvořen svařencem z duralových trubek uspořádaných do kříže viz obr.1.2. V jeho středu je umístěna platforma pro elektroniku. Celková velikost stroje je cca. 1,2 m, při hmotnosti 3,5 kg. Tímto jsou vymezeny požadavky na velikost realizované palubní elektroniky i celkovou hmotnost, která by měla být s ohledem na zachování dobrých letových vlastností co nejnižší.



Obrázek 1.2: Orientace stroje

1.4.2 Pohon

Stroj je osazen pevně uloženými synchronními třífázovými motory s přímým pohonem vrtule. Motory jsou napájeny z komerčně dostupných modelářských střídačů. Řídicím vstupem pro střídače je obdélníkový signál s pulzně-šířkovou modulací (PWM) s periodou 20 ms a proměnnou střídou 0,05 až 0,1. Výstupním signálem ze střídače je obdélníkový signál s proměnnou frekvencí, která odpovídá rotačnímu poli motoru. Z tohoto signálu lze jednoduše vypočítat otáčky synchronního stroje. Základní prvky pohonu jsou na obr.1.3.



(a) Regulátor MGM4416

(b) Motor Mega600

Obrázek 1.3: Základní prvky pohonu

Kapitola 2

Orientace v prostoru

Pojem orientace v prostoru zahrnuje celou řadu možností, jak celý problém uchopit. Zde je nejprve uveden přehled možných metod řešení a poté je vybrána nejvhodnější možnost pro aplikaci na stroj quadrotor. Orientaci v prostoru lze v zásadě rozdělit na dva hlavní směry. Jedná se o pohyb v jednoznačných globálních souřadnicích, nebo pohyb volný relativně od referenčního bodu (místa startu). Relativní měření je možné použít pro stabilizaci v určité poloze, kterou je možné vzít jako referenční. Vůči tomuto referenčnímu bodu je nutné měřit vzájemnou orientaci a vzdálenost. Tím je možné provádět určování polohy bez nějaké předchozí informace o okolí. Globální určení polohy je tedy možné chápat jako rozšíření této metody o počáteční informaci o orientaci a umístění. K zajištění informace o globální poloze je vhodné mít k dispozici měření z absolutních senzorů polohy. Dostupnost takového měření ovšem závisí na okolních podmínkách. Často se tedy v praxi využívá relativní určení polohy od soustavy bodů se známou pozicí. Toto je možné pro kratší časové intervaly. Důležitým pojmem je v těchto úvahách stupeň volnosti neboli DOF (Degree of Freedom). Stupně volnosti udávají, v jakých směrech může těleso vykonávat pohyb.

Podle umístění tělesa rozlišujeme tyto případy:

- těleso spojené se zemí
- těleso volně umístěné v prostoru

Toto rozdělení určuje metody, jaké je možné k měření použít. V případě spojení se zemí se nabízí například kontaktní měření vzdálenosti. Většinou nemá smysl měřit kompletní informaci o pohybu, protože ten je omezen daným povrchem. U volně umístěného tělesa je situace složitější, protože se jedná o pohyb se šesti stupni volnosti.

2.0.3 Způsoby měření

Dostupné senzory dle funkce a metody měření můžeme přibližně rozdělit na:

- kontaktní - taktilní, spojité, nespojité, odometrické
- bezkontaktní - optické (time of flight, phase change, triangulace, analýza obrazu kamery..), akustické, radiové, inerciální, změna vlastností prostředí (tlak)
- autonomní (bez vnějších informací)
- asistované (pozemní stanice, maják)
- absolutní nebo relativní

2.0.4 Typ prostředí

Použitý typ měření závisí i na tom, jaké možnosti poskytuje prostor, ve kterém je nutné polohu určovat.

- otevřené prostranství nebo uzavřený prostor
- prostředí s překážkami nebo volný prostor
- typ objektů v prostoru (tvar, barva, materiál, velikost)

V uzavřených prostorech (např. místnostech) je možné využívat souřadnice, které jsou jasně dány tvarem a rozměrem místnosti. Pro taková měření je vhodné bezkontaktní měření založené na odrazu paprsku, nebo zvuku. Pro prostor s překážkami je možné udělat stejnou úvahu a při znalosti jejich polohy se dá této informace také využít pro určení polohy stroje. Při použití kamerového systému je dokonce možné interpretací obrazu provádět stanovení polohy například podle barev nebo tvarů.

2.0.5 Další vlivy

Ve všech případech zmíněných výše je nutné také uvažovat vlivy rušení, které mohou způsobit, že daná metoda nebo senzor není možné použít.

- záření
- vibrace
- elektromagnetické rušení

2.1 Závěr

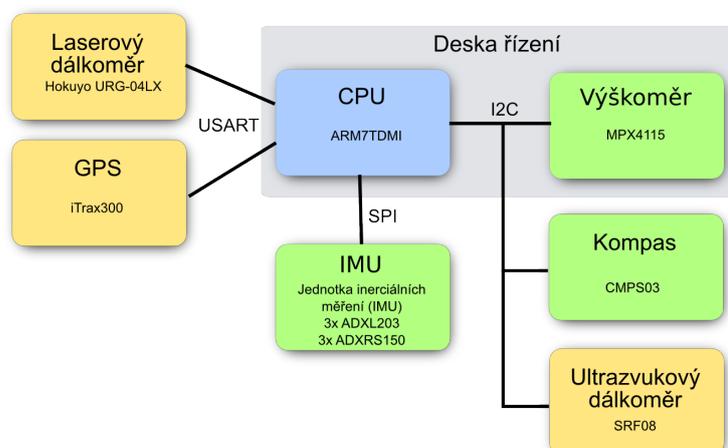
Quadrotor je volný stroj se šesti stupni volnosti a předpokládá se let jak v uzavřeném, tak i ve volném prostoru. Z možností obsažených v tomto přehledu se pro aplikaci na létajícím stroji typu quadrotor jeví jako nejlepší kombinace několika základních principů. Pro určení orientace a základní měření polohy pro krátké časové intervaly je to inerciální měření, doplněné barometrickým výškoměrem. Pro získání informace o poloze v prostoru je pak vhodné rozšíření o bezkontaktní metody založené na akustickém, nebo lépe optickém principu. Nejvyšším stupněm je použití globálních souřadnic z GPS, to je ovšem limitováno prostředím (dostupností signálu).

Kapitola 3

Senzorový subsystém

3.1 Ideový návrh

Úlohu řešení návrhu sensorového systému můžeme rozdělit na dva hlavní směry. Prvním je určení polohy stroje relativně vzhledem k zemskému povrchu pro regulační smyčku stabilizace ve vodorovné poloze. Druhým problémem je určování globální polohy, nebo polohy v daných referenčních souřadnicích, detekce objektů a měření vzdálenosti. Tento typ dat je využitelný pro předcházení kolizím, plánování trajektorie letu a pro mapování okolí. Těmto dvěma bodům se věnuje návrh sensorového subsystému, který se zaměřuje zejména na první bod, kde je vypracováno kompletní řešení měření a filtrace dat pro stabilizaci ve vodorovné poloze. Druhý bod je zpracován na úrovni realizace hardwaru a poskytnutí základního softwarového rámce pro další zpracování v nadřazeném systému. Struktura navrženého sensorického subsystému je znázorněna na obr.3.1.



Obrázek 3.1: Blokové schéma senzorů

3.2 Stabilizace

V návaznosti na analýzu možností měření polohy v kap.2 bylo pro stabilizaci ve vodorovné poloze vybráno řešení založené na inerciálním měření. Pro určení polohy tělesa v prostoru se šesti stupni volnosti DOF je potřeba měřit 3 hodnoty úhlové a 3 translační.

3.2.1 Technologie MEMS (mikro elektro-mechanické systémy)

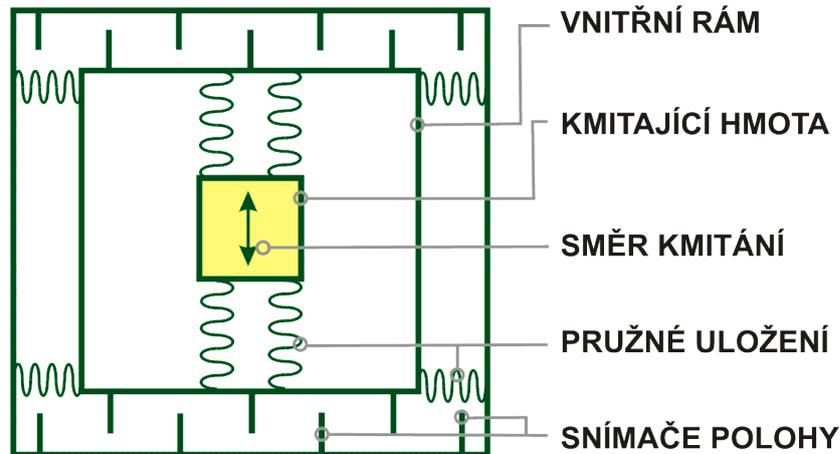
Zejména v poslední době se na trhu objevil dostatek dostupných integrovaných inerciálních senzorů s technologií MEMS, které jsou pro daný úkol velice vhodné. Sensory tohoto typu využívají technologii mechanických prvků leptaných v křemíkovém substrátu. Lze tedy realizovat velmi malé inerciální senzory přímo v čipu. Výhodou je minimální hmotnost, velikost a spotřeba. Na velice dobré úrovni je díky integraci mechanických dílů s elektronikou rovněž citlivost a šumová odolnost. Podstatnou nevýhodou je zejména teplotní a časový drift výstupní hodnoty i parametrů součástky, který je pro tuto technologii typický.

3.2.1.1 Akcelerometry

Principem funkce použitých MEMS akcelerometrů je měření výchylky pružně uloženého hmotného tělíška (tzv. seismické hmotnosti) vůči tělu součástky. Při působení zrychlení dochází ke změně této výchylky, jejíž hodnota je měřena nejčastěji kapacitním způsobem.

3.2.1.2 Gyroskopy

MEMS gyroskopy pracují na principu měření Coriolisova zrychlení. Hmotné tělíško je pružně upevněno a rozkmitáváno tak, aby konalo přímočarý pohyb. Pokud začneme touto soustavou otáčet v rovině tohoto pohybu, Coriolisovo zrychlení začne působit na hmotu a vychylovat z neutrální polohy ve směru kolmém na kmitavý pohyb tělesa. Tato výchylka je stejně jako u akcelerometrů měřena kapacitně. Schématicky je tento princip popsán na obr.3.2.



Obrázek 3.2: Princip funkce MEMS gyroskopu

Tento způsob měření poskytuje dobré výsledky, ovšem kvůli použité technologii MEMS vykazuje poněkud vyšší časový a teplotní drift. Tento jev je méně výrazný například u optických gyroskopů založených na měření fázového posunu světla v rotujícím optickém vlákně. Tyto komponenty jsou však mnohem dražší, větší s přílišnou hmotností.

3.2.2 Realizace inerciální jednotky

Senzory MEMS vyrábějí například firmy Analog Devices, Freescale, STM. Při výběru byl brán ohled zejména na šumové vlastnosti a stabilitu parametrů. Po průzkumu trhu byly vybrány výrobky od firmy Analog Devices, které nejlépe splňují výše uvedené nároky. Navržené řešení předpokládá rozdělení subsystému inerciálního měření na moduly senzorů a modul převodníku. Tím bude zajištěna větší variabilita při výběru senzorů, možnost reagovat na nové požadavky týkající se parametrů a vývoj součástkové základny. Byly použity senzory s analogovým výstupem měřené hodnoty a navrženo jejich připojení na externí A/D převodník. Toto řešení sice představuje vyšší riziko zarušení analogové signálové cesty mezi senzorem a A/D převodníkem, to lze ovšem velice efektivně potlačit správným návrhem desek plošných spojů (DPS). Na druhou stranu získáme téměř synchronní vzorkování měřených veličin a v neposlední řadě také možnost využít pokročilé funkce převodníku (např. opakované odměry a průměrování).

Jako gyroskop je použit typ ADXRS150. Jedná se o jednoosý senzor úhlové rychlosti s rozsahem $\pm 150^\circ/\text{s}$ s analogovým výstupem 0-5 V a integrovaným teplotním senzorem také s analogovým výstupem 0-5 V, který je možno využít pro teplotní kompenzaci.

ADXRS 150 základní údaje:

- počet os měření 1
- rozsah měření ± 150 °/s
- citlivost $12,5 \pm 10$ % mV/°/s
- max. šířka pásma 2 kHz
- šumová hustota $0,05$ °/s/rtHz
- nelinearita 0,1 % z rozsahu
- napájení 4,75 - 5,25 V, odběr 6 mA

Akcelerometry měřící translační zrychlení jsou typu ADXL203. Jedná se o dvouosý typ, takže získáme 6 hodnot, tedy redundantní informaci, kterou můžeme využít pro zpřesnění měření. Měronosnou veličinou je napětí v rozsahu 0-5 V, které je zpracováno v modulu převodníku.

ADXL203 základní údaje:

- počet os měření 2
- rozsah měření $\pm 1,7$ g
- citlivost 1000 % mV/g
- max. šířka pásma 2,5 kHz
- šumová hustota 110 ug/rtHz
- nelinearita 4 %
- napájení 3-6 V, odběr 0,7 mA

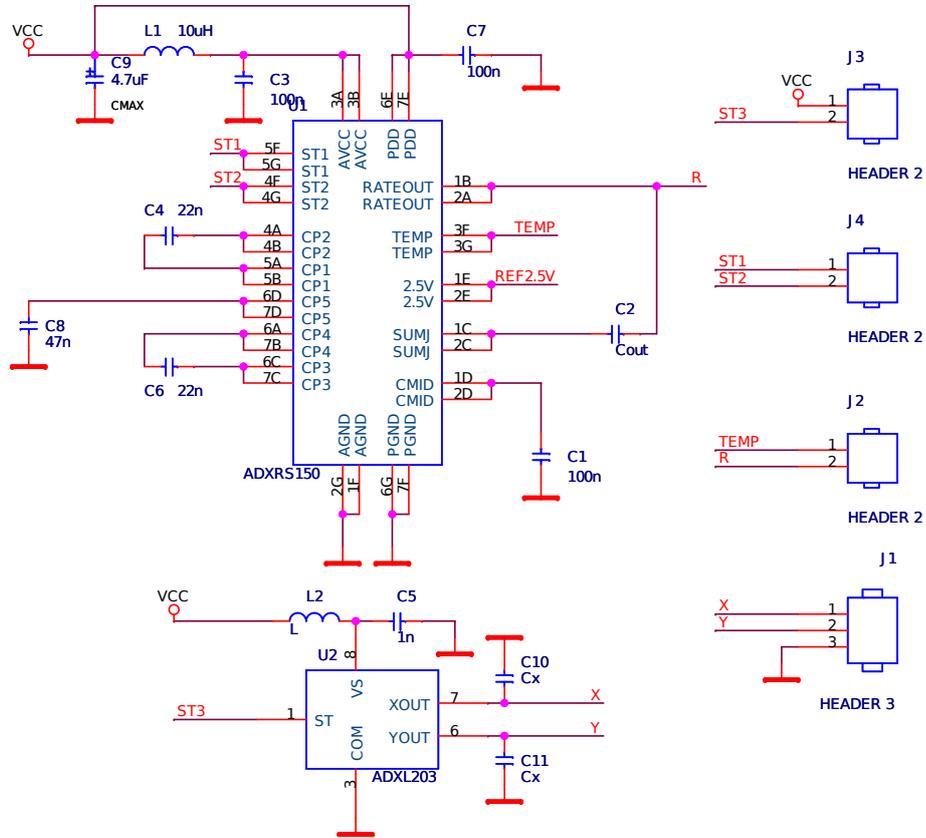
Podrobné údaje jsou uvedeny v katalogových listech na stránkách výrobce Analog Devices [2].

3.2.3 Modul senzorů

Pro senzory byly navrženy desky plošných spojů. Byly zohledněny požadavky na umístění a montáž do stávající konstrukce stroje. Na každé desce je osazen senzor rotačního a translačního pohybu a potřebné blokovací a filtrační prvky. Na analogových výstupech je modul opatřen kondenzátory C_X , C_Y , C_{OUT} pro vymezení šířky pásma výstupního filtru typu dolní propust.

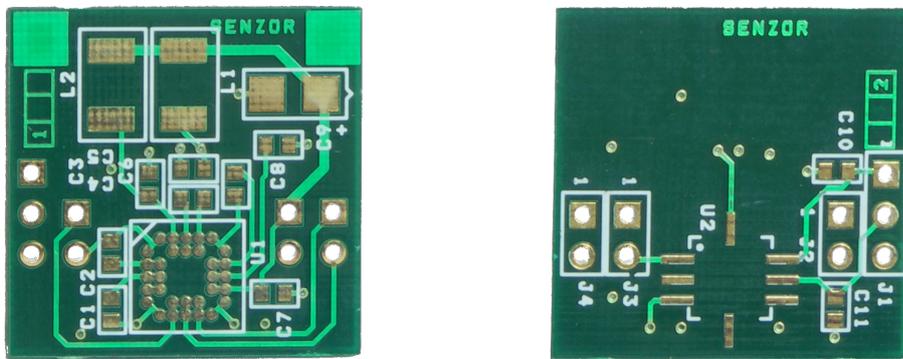
Šířku pásma vypočteme ze vztahu: $F_{-3dB} = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$, kde R je interní rezistor na výstupu senzoru, který má pro akcelerometr hodnotu $32k\Omega$ a pro gyroskop $180k\Omega$.

Schéma pro senzorový modul je uvedeno na obr.3.3.



Obrázek 3.3: Schéma modulu inerciálních senzorů

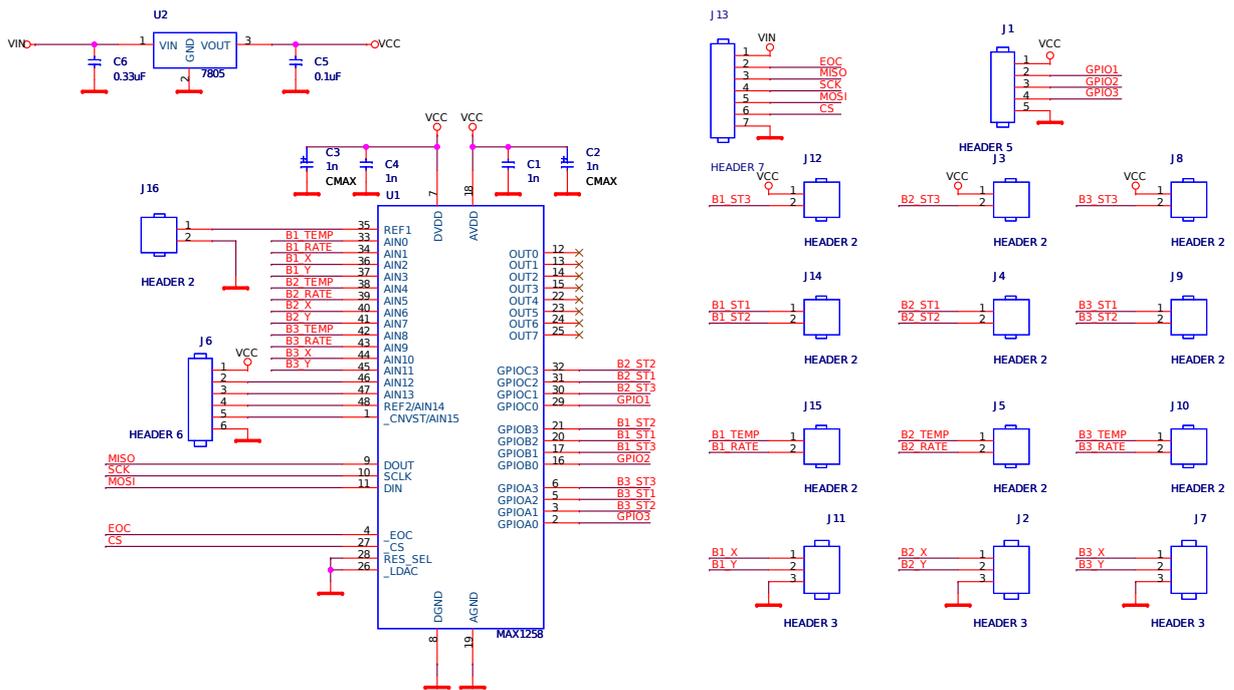
Desky plošných spojů jsou navrženy a vyrobeny s ohledem na EMC třívrstvou semi-aditivní technologií a osazeny součástkami typu SMD. Výrobní podklady jsou uvedeny v příloze B.5, soupiska součástek v tab.A.4 a vyrobené desky jsou na obr. 3.4.



Obrázek 3.4: Deska senzorů

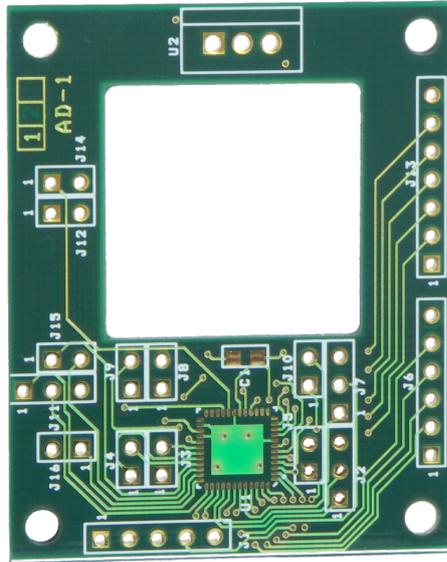
3.2.4 Modul převodníku

Modul převodníku zajišťuje převod analogových měronosných signálů na digitální reprezentaci a komunikaci s řídicím modulem. Jako základ modulu byl vybrán rychlý šestnáctikanálový 12bit AD převodník MAX1258 [4]. Pro komunikaci s řídicí deskou je využita sběrnice SPI. Použitý obvod poskytuje ještě uživatelsky konfigurovatelné digitální vstupy/výstupy, které jsou využity pro ovládání testovacích vstupů senzorů. Napájení modulu je realizováno, kvůli potlačení rušivých vlivů impulsních odběrů číslicové části, odděleně od řídicí desky. Použit je nízkoubytkový lineární stabilizátor a příslušnými filtračními a blokovacími kapacitami. Z modulu je vyvedeno na konektor rozhraní SPI, řídicí signál převodníku s významem konec převodu (EOC), vstup externí reference napětí, nepoužité vstupy AD a GPIO linky. Navržené schéma je uvedeno na obr.3.5, soupiska součástek v tab.A.3 a vyrobená deska převodníku je na obr. 3.6.



Obrázek 3.5: Schéma zapojení převodníku

DPS pro modul převodníku jsou vyrobeny stejnou technologií jako je tomu u senzorů a výrobní podklady jsou uvedeny v příloze B.4



Obrázek 3.6: Deska převodníku

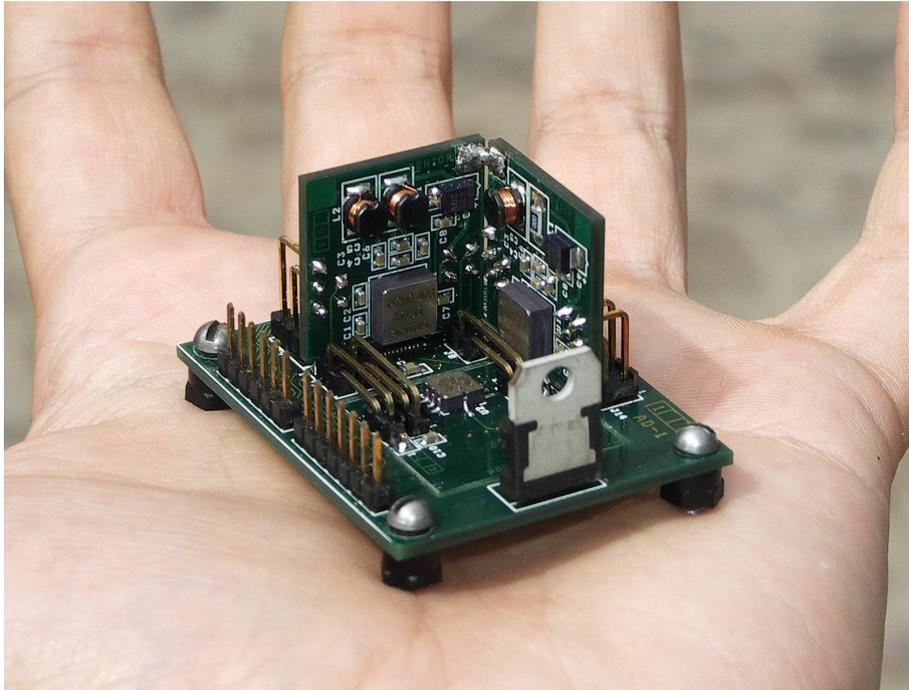
3.2.5 Celá sestava subsystému inerciálního měření

Celek tří desek se senzory je upevněn k desce s převodníkem a vzájemně tvoří pravoúhlý souřadnicový systém viz obr.3.7, který splňuje požadavky na měření polohy uvedené výše.

Celý inerciální subsystém byl vyvíjen od ideového návrhu až po finální použití. Byl vlastnoručně realizován a funkčně plně odzkoušen při syntetických zkouškách i letových testech, kde prokázal velice dobré parametry a v reálném provozu se plně osvědčil. Tento subsystém byl úspěšně použit i v jiném projektu [16], kde se uplatnila otevřenost návrhu.

3.3 Rozšíření systému senzorů

Pro stabilizaci polohy, měření, navigaci a orientaci v prostředí bylo provedeno rozšíření systému senzorů. Jedná se zejména o absolutní měření výšky a azimutu pro korekci driftů a dalších chyb měření realizované inerciální jednotky. Další senzory poskytují základ systému detekce překážek a orientace v prostředí.



Obrázek 3.7: Celá sestava modulu inerciálních měření

3.3.1 Výškoměr

Měření výšky je založeno na barometrickém principu, tedy na změně tlaku vzduchu v závislosti na nadmořské výšce. Pro tuto aplikaci můžeme zanedbat změnu tlaku vzduchu v čase, která je mnohem pomalejší, než časový horizont měření. Tlak vzduchu v závislosti na výšce můžeme přibližně určit podle vztahu:

$$p = p_0 \cdot e^{\frac{-r \cdot T}{g} \cdot \Delta h}$$

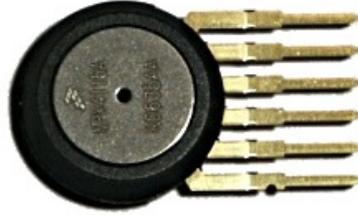
kde r je měrná plynová konstanta, T teplota v Kelvinech, p_0 referenční tlak, g tíhové zrychlení.

Rozdíl výšek je tedy:

$$\Delta h = -\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \cdot \frac{r \cdot T}{g}$$

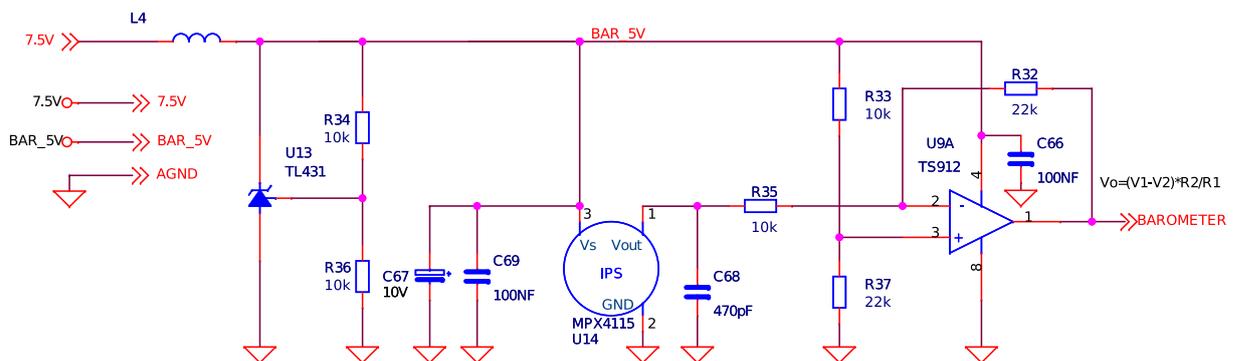
Pro měření atmosférického tlaku je použit absolutní senzor MPX4115a na obr.3.8 s těmito vlastnostmi:

- rozsah měření 15-115 kPa
- výstup napětí 0-4,9 V
- citlivost 45,9 mV/kPa



Obrázek 3.8: Tlakový senzor MPX4115a

Klíčový je tedy při návrhu použitý AD převodník a kvalitní řešení DPS. Pro 16bit převodník je teoretické rozlišení měření výšky v řádu centimetrů. Pro testování tlakového senzoru byl použit velice přesný 22bit převodník MCP3550-50E/MS se sériovým rozhraním. Byl potvrzen předpoklad, že tuto metodu lze použít i pro měření malých změn v řádu decimetrů až centimetrů. Nutná je však teplotní kompenzace a zaručení správného stínění a napájení obvodu AD převodníku. Ve své finální podobě je barometrický výškoměr umístěn přímo na desce řídicí elektroniky a převod na digitální reprezentaci zajišťuje obvod MAX1169 (AD převodník, 16bitů, I^2C) viz [4]. Schéma zapojení barometrického výškoměru je na obr.3.9. Jako oddělení senzoru a převodníku je využit operační zesilovač v rozdílovém zapojení se zesílením 2,2. Tím je upraven rozsah měření na běžné hodnoty tlaků a tím i zvýšena rozlišovací schopnost. Připojení AD převodníku je znázorněno ve schématu na obr. 5.9



Obrázek 3.9: Zapojení výškoměru

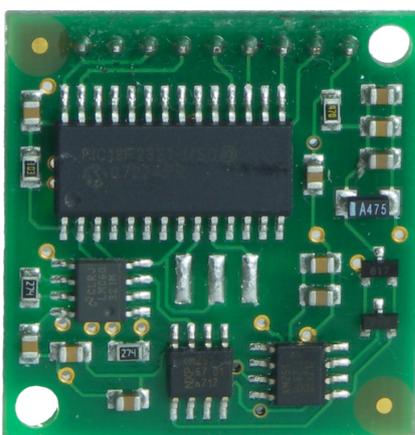
3.3.2 Magnetický kompas CMPS03

Pro korekci měření azimutu byl vybrán dvouosý magnetický kompas CMPS03 viz obr.3.10. Modul určuje azimut z měření navzájem kolmých složek zemského magnetického pole.

Takto získané hodnoty jsou závislé na náklonu magnetometrů. Pro získání správných hodnot je nutné tato data přepočítat pomocí úhlů náklonu, které nám poskytuje inerciální jednotka. Výstupem modulu je číslo udávající přímo azimut. Pro řízení na zadaný azimut je tedy třeba provést přepočet hodnot, aby nedocházelo k nespojitostem na přechodu 0-360°. Komunikace s modulem probíhá po sběrnici I2C. Je možné provést kalibraci a zvolit formát výstupních dat. Pro potlačení vlivu elektromagnetického rušení na síťové frekvenci lze zvolit periodu měření 20 ms nebo 33,3 ms.

Základní data CMPS03:

- počet měřených os magnetického pole 2
- rozsah měření 0-360°
- citlivost 0,1°
- napájení 5 V
- výstup PWM, I^2C



Obrázek 3.10: Magnetický kompas

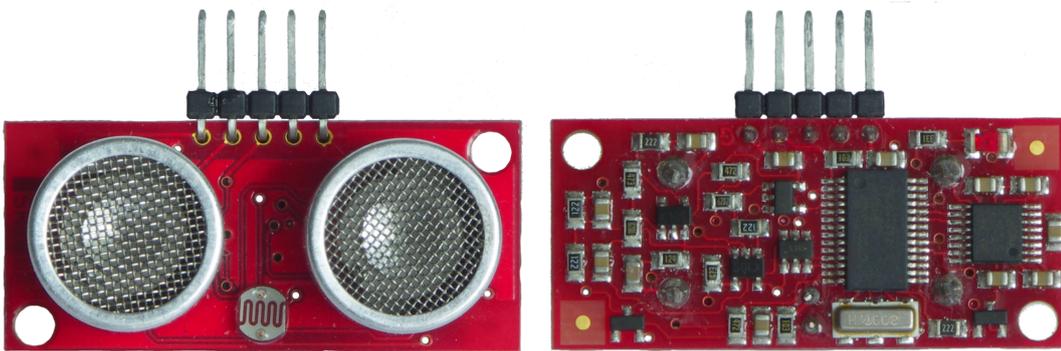
3.3.3 Ultrazvukový dálkoměr

Ultrazvukový dálkoměr zajišťuje především detekci kolizí. V důsledku vícenásobných odrazů v poměrně širokém úhlu se nehodí na úlohy mapování prostředí, ovšem poskytuje dobrou možnost detekce i menších předmětů a velmi vhodné je jeho použití společně s laserovým senzorem (detekce překážek mimo rovinu měření laseru). Kvůli výše uvedeným skutečnostem byl vybrán modul s menším rozptylem ultrazvukového kužele. Jedná se o

typ SRF08 viz obr.3.11(a). Modul je schopen měření v rozsahu od cca 3 cm do 6 m se charakteristikou, která je zobrazena na obr.3.11(c). Výstupem může být číslo vyjadřující přímo vzdálenost, nebo dobu letu akustického signálu. Měření jsou uložena v interních registrech modulu a je možné vyhodnocovat i vícenásobné odrazy. Konfigurace a komunikace probíhá po sběrnici I²C.

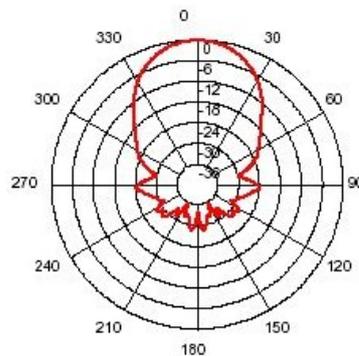
Základní data SRF08:

- rozsah měření 3 cm - 6 m
- nastavení rozsahu 255 kroků po 43 mm
- napájení 5 V
- odběr 12 mA
- výstup I^2C



(a) Modul dálkoměru

(b) Modul dálkoměru



(c) Směrová charakteristika ultrazvukového senzoru

Obrázek 3.11: Ultrazvukový dálkoměr

3.3.4 Laserový dálkoměr

Pro účely mapování prostoru a plánování letu v prostředí s překážkami je vhodné použít laserové měření vzdálenosti objektů. Pro naši aplikaci byly provedeny základní testy s modulem Hokuyo URG-04LX viz obr.3.12. Tento senzor provádí měření pomocí rozmítání laserového paprsku do roviny, která pokrývá kruhovou výseč v rozsahu 240° a vzdálenosti 20 mm až 4 m. Maximální frekvence měření je cca 10 Hz. Připojení je realizováno přes RS232 a pro ladění na PC je přítomno též rozhraní USB s emulací virtuálního sériového portu. Pro reálné použití k plánování letu, nebo mapování je potřeba zohlednit aktuální náklon stroje a získané hodnoty patřičně opravit přepočtem podle známého úhlu náklonu. Tato technologie nebyla v této fázi projektu testována přímo na quadrotoru, ovšem podle hmotnostní a výkonové bilance zpracované v [9] je nasazení této technologie možné a jejím využitím se významně rozšíří získané informace o okolním prostředí.



Obrázek 3.12: Laserový dálkoměr Hokuyo URG-04LX

Základní data Hokuyo URG-04LX

- měřená vzdálenost 20 cm 4 m
- výstup RS232
- napájení 5 V
- hmotnost 140 g

3.3.5 Přijímač GPS

Využití tohoto systému je velice vhodné při využití v exteriérech, kde je možné zachytit dostatečně kvalitní satelitní signál. Údaji z GPS je možno dlouhodobě korigovat data z

inerciální jednotky. Většina komerčně dostupných GPS jednotek je osazena rozhraním RS232 nebo SPI. S tím je počítáno i v návrhu palubní elektroniky. Jako vhodný pro toto použití byl vybrán modul iTrax300 obr.3.13.



Obrázek 3.13: GPS modul iTrax300

Základní data iTrax300:

- typ čipu SiRFIII
- počet kanálů 20
- přesnost polohy 1,5 m
- přesnost rychlosti 0,1 m/s
- přesnost určení času 1 μ s
- perioda měření 1 s
- výstup 2x RS232
- protokol NMEA0183, binární SiRF
- napájení 3,3 V
- hmotnost 1,6 g
- rozměry 16,2 mm x 18,8 mm x 2,3 mm

Kapitola 4

Zpracování dat z inerciální jednotky

4.1 Surová data a přepoččet

4.1.1 Popis senzorů a jejich parametrů

U použitých senzorů je jako měronosná veličina použitý analogový napěťový výstup. Tento signál je v 12-ti bitovém AD převodníku převeden na celé číslo typu unsigned integer v rozsahu $\langle 0, 4095 \rangle$. Pro přepoččet získaných hodnot na veličiny s fyzikálním rozměrem je nutné nejprve zjistit parametry senzoru, kterými jsou výstupní hodnota pro nulový vstup a citlivost senzoru. Zde jsou uvedeny potřebné hodnoty získané z katalogových listů. Skutečné hodnoty je potřeba aktualizovat před každým měřením, protože jsou zatíženy zejména teplotní závislostí. Vliv orientace na výstup akcelerometru je znázorněn na obr.4.1 a gyroskopu na obr. 4.2.

4.1.2 Princip určení hodnoty s fyzikálním rozměrem

Pro další použití při výpočtech a řízení je nutné provést přepoččet měřených dat na jednotky s daným fyzikálním rozměrem. Pro přepoččet použijeme hodnoty uvedené v předchozím odstavci.

Pro jednotlivé senzory postupujeme následovně:

Gyroskop:

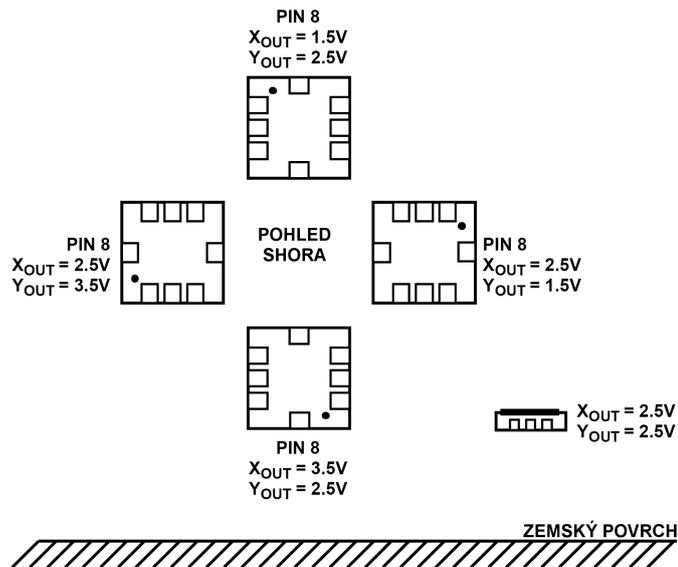
$$\omega = \frac{(x_{\omega}-offset)}{citlivost} [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Akcelerometr:

$$a = \frac{(x_a-offset)}{citlivost} \cdot g [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$$

Akcelerometry:

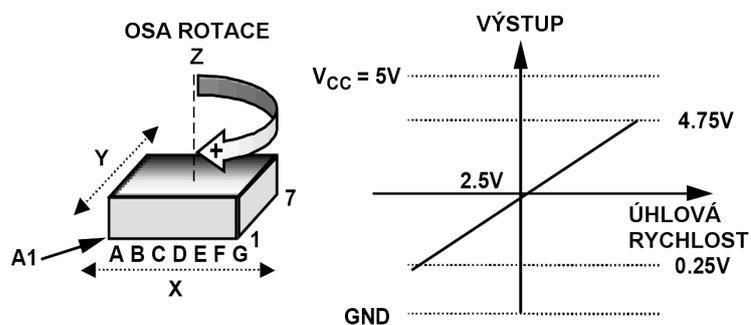
- Typ: Analog Devices - ADXL203
- Výstup v klidu: 2500 mV
- Citlivost: 1000 mV/g



Obrázek 4.1: Orientace a výstup akcelerometru

Gyroskopy:

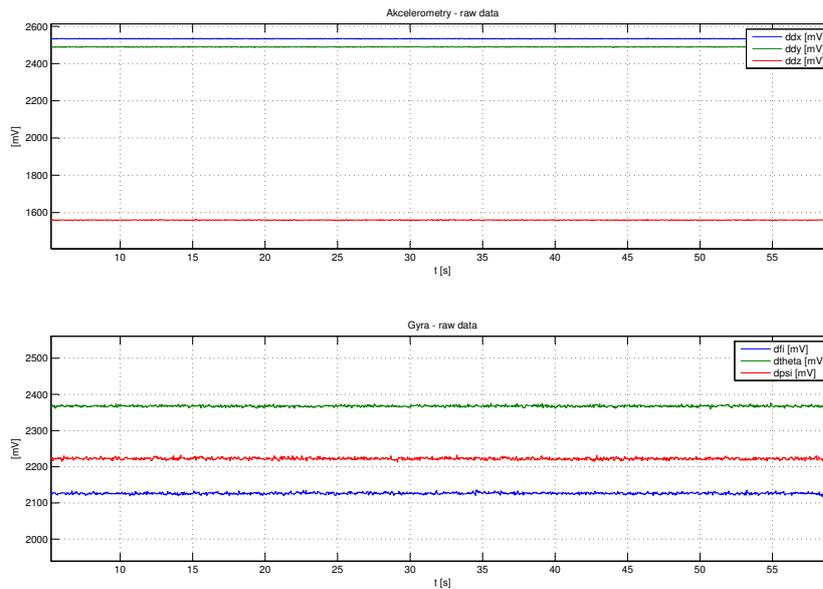
- Typ: Analog Devices ADXRS150
- Výstup v klidu: 2500 mV
- Citlivost: 12,5 mV/°/s



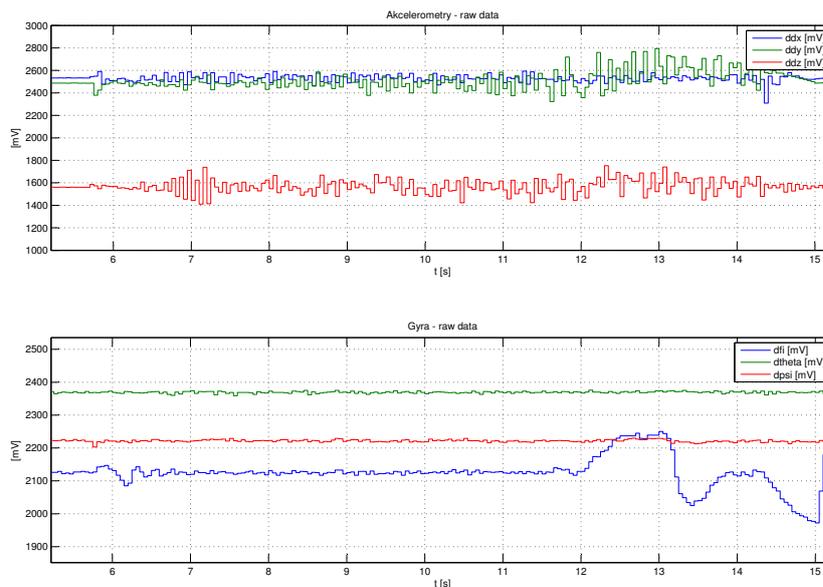
Obrázek 4.2: Orientace a výstup gyroskopu

4.1.3 Měření data

Jednotlivé senzory jsou umístěny tak, aby na sebe kolmé osy X, Y, Z tvořily pravotočivý souřadnicový systém. Měřicím subsystémem dostaneme data v tomto pořadí: zrychlení v osách X, Y, Z a úhlové rychlosti podél těchto os. Na grafech je zachycen průběh měřených signálů v klidu obr.4.3 a při pohybu obr.4.4.



Obrázek 4.3: Změřené hodnoty v klidu



Obrázek 4.4: Změřené hodnoty v pohybu (náklon kolem osy Y)

Naměřené klidové střední hodnoty pro jednotlivé senzory:

osa	hodnota [mV]
X	2533
Y	2490
Z	2559

Tabulka 4.1: Akcelerometry - klidové hodnoty

osa	hodnota [mV]
ϕ	2126
θ	2369
ψ	2224

Tabulka 4.2: Gyroskopy - klidové hodnoty

4.2 Rušení a chyby měření

Kromě užitečné měřené hodnoty je v měřeném signálu patrný vliv rušení. Největší zdroje rušení je potřeba identifikovat, zjistit jejich vliv a zaměřit se na jeho následnou eliminaci.

- Vlastní šum senzorů v klidu a rušení přenosové cesty
- Vliv vibrací pohonu
- Náhodné vlivy (náraz)

4.2.1 Vlastní šum senzorů a převodníku

Byla provedena měření vlastního šumu senzorů a převodníku. Při tomto experimentu byly regulátory motorů nastaveny na nulové otáčky. Pokusná sestava byla umístěna vodorovně v referenční poloze.

Z průběhů na obr.4.3 lze vypočítat střední hodnotu signálu, jejímž odečtením od naměřených hodnot vzniká nulová hodnota výstupu pro referenční polohu a standardní odchylku, která má uplatnění pro další zpracování při filtraci. Stejnoseměrné složky výstupu akcelerometrů jsou v tab.4.1 a gyroskopů v tab.4.2 a vypočtené standardní odchylky akcelerometrů v tab.4.3 a gyroskopů v tab.4.4.

osa	σ [mV]
X	0,8634
Y	0,8618
Z	0,8704

Tabulka 4.3: Akcelerometry - standardní odchylka σ

osa	σ [mV]
ϕ	2,4807
θ	2,2022
ψ	2,9026

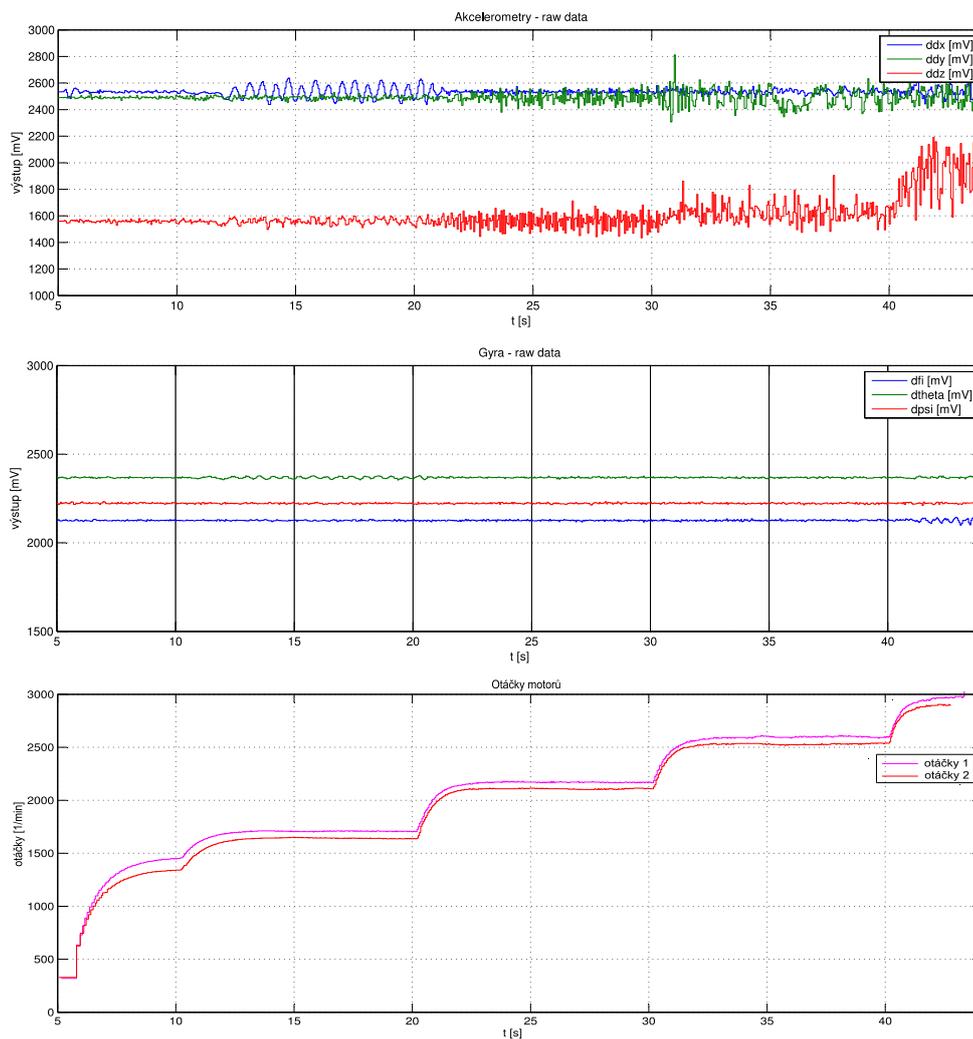
Tabulka 4.4: Gyroskopy - standardní odchylka σ

4.2.2 Vibrace pohonu

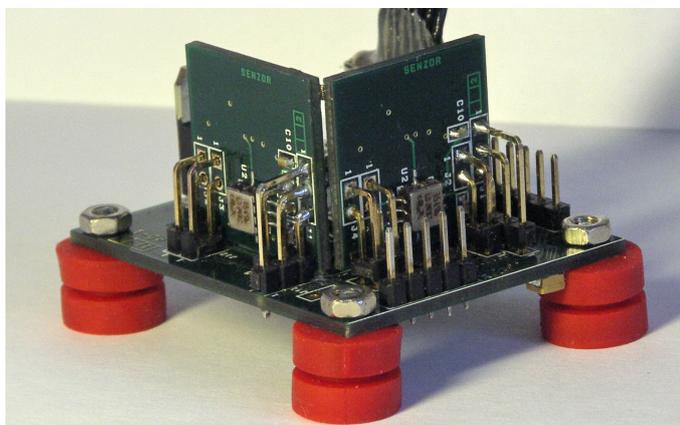
Pro zjištění vlivu vibrací bylo provedeno měření ve stejné konfiguraci ovšem se zapnutými motory. V grafu na obr.4.5 jsou uvedeny naměřené průběhy signálů senzorů a příslušné otáčky. Z naměřených hodnot viz tab.4.5 je vidět rostoucí vliv vibrací na senzory. Tento vliv je více patrný u akcelerometrů, protože vibrace se projevují posuvnými účinky. Toto měření bylo ovlivněno uložením stroje a bylo provedeno se dvěma motory. To je dobře patrné na grafu obr.4.7, kde došlo k mírné rezonanci v jedné ose. Na základě těchto zjištění byl použit upravený rám stroje s odlišnou konstrukcí a větší tuhostí. Dalším přínosem je umístění inerciální jednotky na silentbloky viz obr.4.6. Volbou jejich tuhosti je možné ovlivnit vliv přenášených vibrací různých amplitud a frekvencí.

otáčky	1400	1700	2150	2550
X	5,6256	53,0749	10,9356	16,4576
Y	7,4984	13,1799	40,4872	63,8832
Z	9,8512	22,4149	60,5437	71,6853
ϕ	2,2902	2,9917	2,9026	2,9018
θ	1,7277	5,7774	3,0310	2,7012
ψ	2,6732	2,7482	3,4860	3,0648

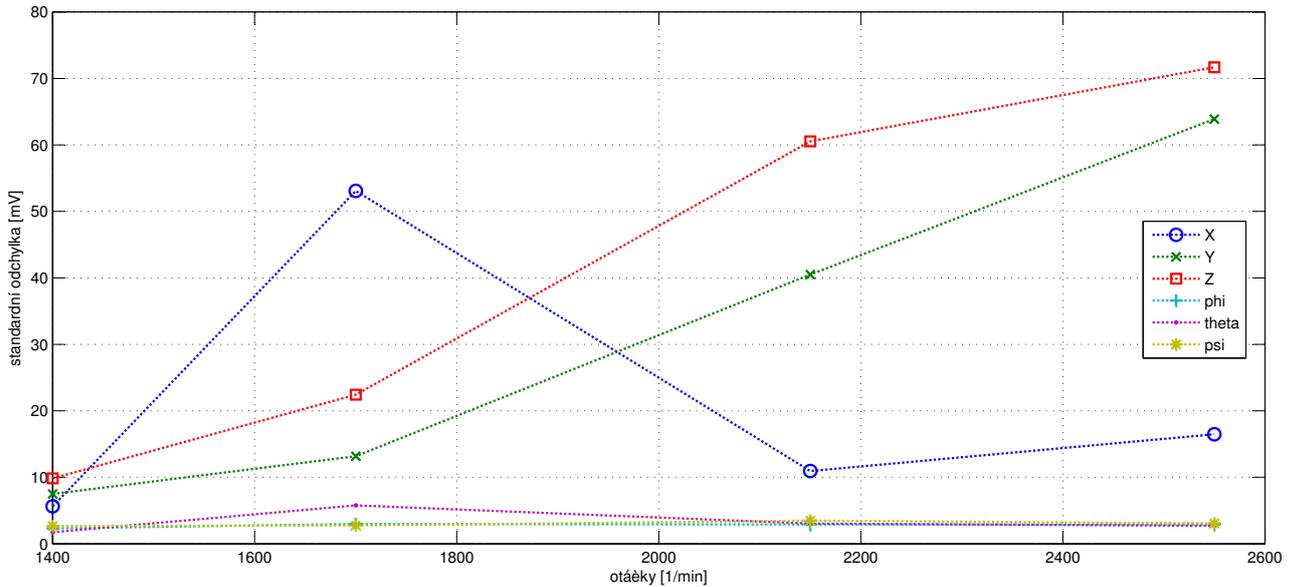
Tabulka 4.5: Vliv otáček na standardní odchylku σ



Obrázek 4.5: Změřené hodnoty s vibracemi motoru



Obrázek 4.6: Vylepšené uložení inerciální jednotky



Obrázek 4.7: Vliv otáček motorů na standardní odchylku

4.2.3 Další náhodné jevy - náraz na překážku

Během měření byly zaznamenány také další náhodné jevy, které měly na výsledek zásadní vliv. Jedná se zejména o náraz na překážku, který měl u gyroskopů za následek drobný posun nulové hodnoty. Tato skutečnost významně ovlivňuje výpočet úhlové rychlosti, protože pak dochází k neustálému načítání této chyby a tím ke driftu měřené polohy.

4.3 Navržené řešení výpočtu úhlů náklonu

Pro výpočet úhlu náklonu ze změřených dat můžeme použít dvě základní metody:

- Rozklad tíhového zrychlení
- Integrace úhlové rychlosti

4.3.1 Výpočet úhlu rozkladem tíhového zrychlení

V této metodě se využívá měření složek tíhového zrychlení inerciální jednotkou ve třech navzájem kolmých osách viz kap.3.2.5 za předpokladu, že na těleso nepůsobí další síly,

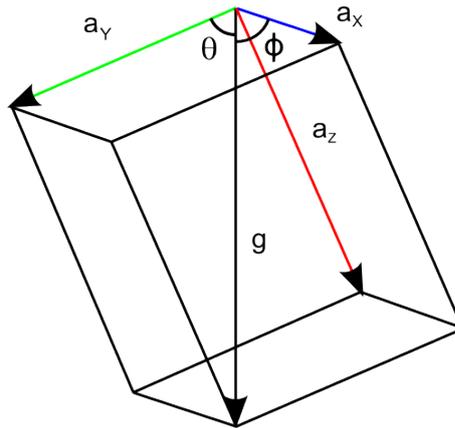
nebo je jejich působení v čase zanedbatelné oproti klidovému stavu. To je v praxi dobře splněno. Ze získaných složek je nejprve vypočtena celková velikost tíhového zrychlení geometrickým součtem, ta je samozřejmě teoreticky konstantní, ovšem při měření dochází k odchýlkám, a tak je nutné vždy vypočítat aktuální celkovou hodnotu měřenou akcelerometry.

$$g = \sqrt{a_X^2 + a_Y^2 + a_Z^2}$$

Poté je možné již určit úhel, který svírá tíhové zrychlení působící svislým směrem s jednotlivými složkami, jak je naznačeno na obr.4.8.

$$\phi = \arccos\left(\frac{a_Y}{g}\right) [\text{rad}]$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{a_X}{g}\right) [\text{rad}]$$



Obrázek 4.8: Rozklad měřených zrychlení při náklonu ve dvou osách

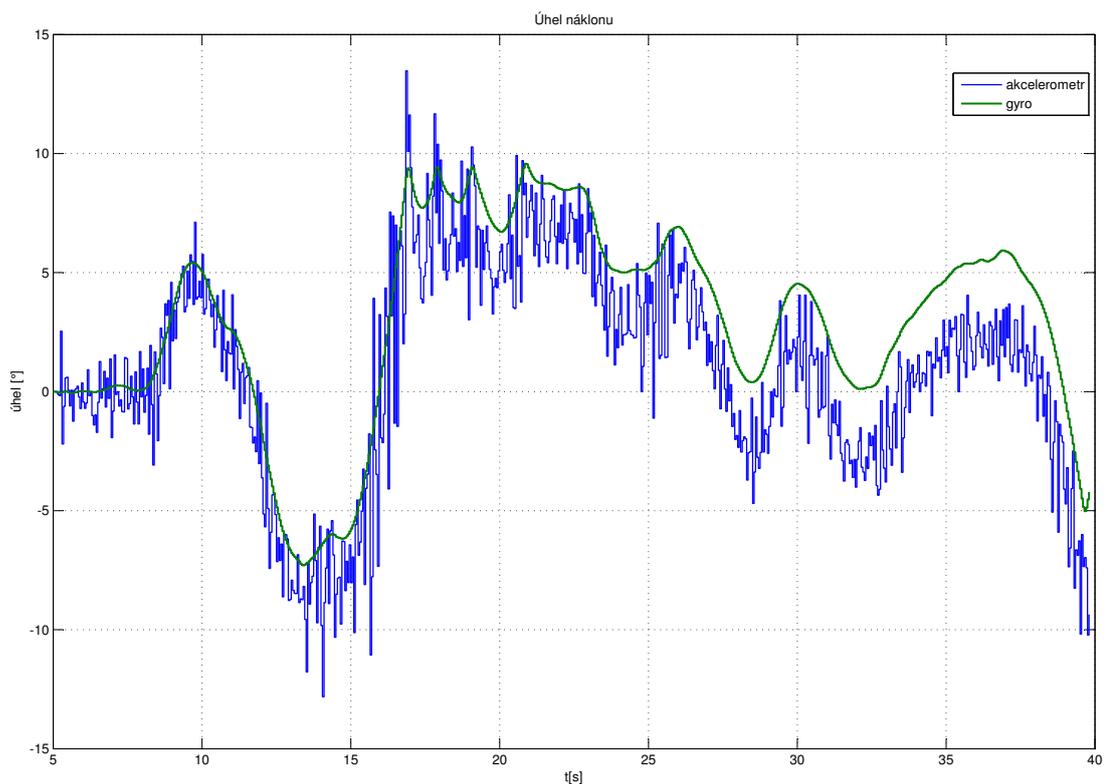
4.3.2 Výpočet úhlu integrací úhlové rychlosti

Uvažujeme-li počátek měření v čase nula, pak velikost úhlu dosaženou v čase \$t\$ můžeme vypočítat integrací úhlové rychlosti podle času:

$$\phi = \int_0^t \omega d\tau [\text{rad}]$$

4.3.3 Srovnání metod

Způsob výpočtu pomocí rozkladu tíhového zrychlení poskytuje okamžitou absolutní hodnotu úhlu narozdíl od integrace úhlové rychlosti, která dává výsledek relativní vzhledem k okamžiku počátku integrace. Tento nedostatek lze vyřešit započítáním měření a integrace v definovaném stavu např. $\phi = 0$. Z měření je možné vysledovat, že výpočet pomocí rozkladu tíhového zrychlení je působením rušení na akcelerometry znehodnocen do takové míry, že ho nelze bez dalších úprav použít. Tento jev je už do značné míry potlačen omezením šířky pásma senzoru RC filtrem typu dolní propust a pro další použití je v softwaru prováděno průměrování měřených hodnot. U gyroskopů není vliv rušení tak významný, metoda integrace úhlové rychlosti tento vliv navíc potlačuje (integrace působí jako dolní propust). Zde se však vlivem časového a teplotního driftu senzoru a vnějších vlivů (vibrace, nárazy) projevuje posun vypočtené hodnoty v důsledku integrace nenulové chyby. Na obr. 4.9 jsou účinky na měřená data dobře patrné.

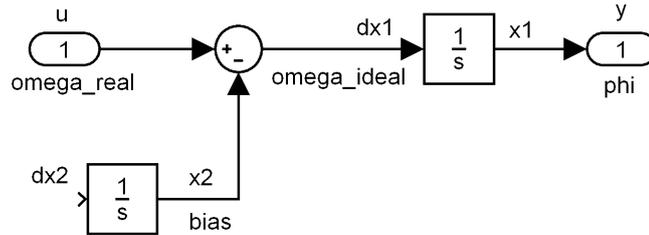


Obrázek 4.9: Srovnání vlivu rušení na hodnoty úhlů

4.4 Filtrace

Vztahy uvedené v kapitole 4.1 popisující přepočítání údajů na hodnoty se správným fyzikálním rozměrem uvažují ideální senzory, které lze popsat dvojicí parametrů: offset (tj. posun stejnosměrné složky) a citlivost. V praxi se ale setkáváme s časovým a teplotním driftem parametrů, který do výpočtu zanáší další chybu. Tato chyba je se projevuje velmi znatelně jako aditivní zejména u gyroskopů, kde je kvůli posunu nuly prostá metoda integrace úhlové rychlosti prakticky nepoužitelná. Tuto chybu budeme dále označovat, v souladu s anglickou literaturou, jako *bias*.

Pro další práci můžeme gyroskop, použitý pro měření úhlu, modelovat jako systém druhého řádu, jehož stavy budou úhel a *bias* viz obr.4.10. *Bias* zde vystupuje jako neřiditelný stav a můžeme ho chápat jako poruchu. Kdyby jsme však znali jeho velikost, mohli bychom správnou hodnotu úhlové rychlosti vypočítat jako: $\omega_{ideal} = \omega_{real} - \omega_{bias}$.



Obrázek 4.10: Model gyroskopu pro Kalmanův filtr

Rovnice systému:

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= \omega_{ideal} = \omega_{real} - \omega_{bias} \\ \dot{\omega}_{bias} &= 0\end{aligned}$$

Stavové rovnice:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= u - x_2 \\ \dot{x}_2 &= 0 \\ y &= x_1\end{aligned}$$

Matice systému:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

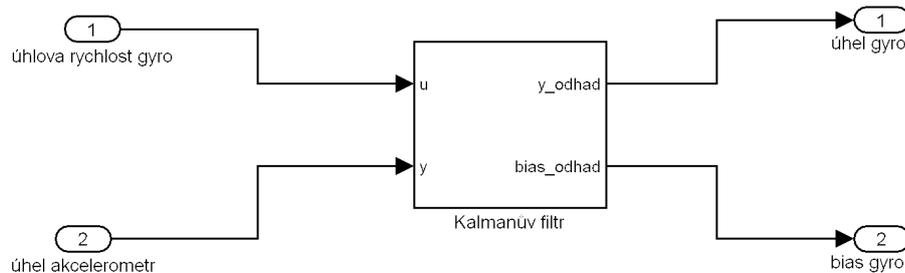
$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = [0]$$

Matice diskretizovaného systému (s periodou T_s):

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & -T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} T_s \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = [0]$$

Pro odhad stavů použijeme Kalmanův filtr obr.4.11. Jako vstup pro Kalmanův filtr bereme měřenou hodnotu úhlové rychlosti z gyroskopu a pro korekci výstupu hodnotu vypočtenou z akcelerometrů, která není zatížena driftem. Výstupem je odhad stavů, kterými jsou skutečný úhel a bias (chyba měření úhlové rychlosti). Snadno můžeme určit také opravenou hodnotu úhlové rychlosti.



Obrázek 4.11: Schéma Kalmanova filtru

4.5 Implementace

Pro snadné použití při ladění parametrů byl vytvořen blok pro Simulink obr.4.13, který provede výpočet jednoho kroku Kalmanova filtru. Blok je tvořen funkcí napsanou v prostředí Embedded Matlab language viz obr.4.12. Tento blok je možné použít jak při simulacích, tak i přímo pro xPC Target. Blok je koncipován pro obecné použití a po inicializaci potřebných vstupů (stavové matice, počáteční podmínky, matice Kalmanova filtru) je ho možné využít pro libovolnou úlohu obyčejného Kalmanova filtru. Tento kód je implementován i na platformě s procesorem ARM7 viz kap. 6.4.

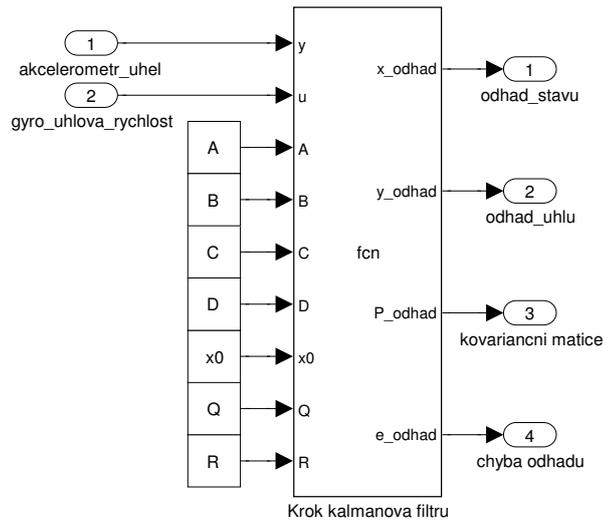
Kód pro Kalmanův filtr:

```

1 function [x_odhad,y_odhad,P_odhad,e_odhad] = fcn(y,u,A,B,C,D,x0,Q,R)
2
3
4 % Inicializace promennych pri prvni volani
5 persistent xp;
6 persistent P;
7 if isempty(xp)
8     xp = x0;
9     P = Q;
10 end
11
12 %----- Datovy krok KF
13 yp = C*xp + D*u;           %odhad vystupu yp(k|k-1)
14 ep = y - yp;               %chyba odhadu vystupu e(k|k-1)
15 L = P*C'*inv(C*P*C'+R);   %Kalmanovo zesileni
16 P = P - L*C*P;           %kovariancni matice P(k|k)
17 xp = xp + L*ep;          %odhad stavu x(k|k)
18 yp = C*xp + D*u;        %odhad vystupu y(k|k)
19
20 %----- Ulozeni dat
21
22 x_odhad = xp;
23 y_odhad = yp;
24 P_odhad = P;
25 e_odhad = ep;
26
27 %----- Casovy krok KF
28 xp = A*xp + B*u;         %odhad stavu x(k+1|k)
29 P = A*P*A' + Q;         %kovariancni matice P(k+1|k)

```

Obrázek 4.12: Obsah bloku Kalmanova filtru



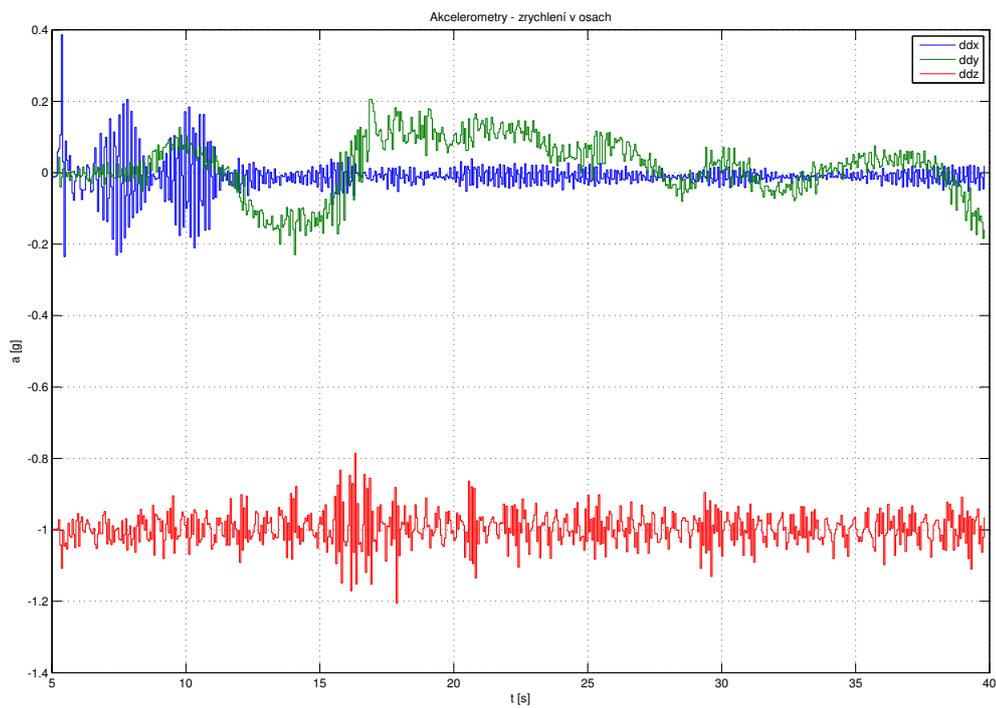
Obrázek 4.13: Zapojení a inicializace bloku Kalmanova filtru

4.6 Simulace a měření

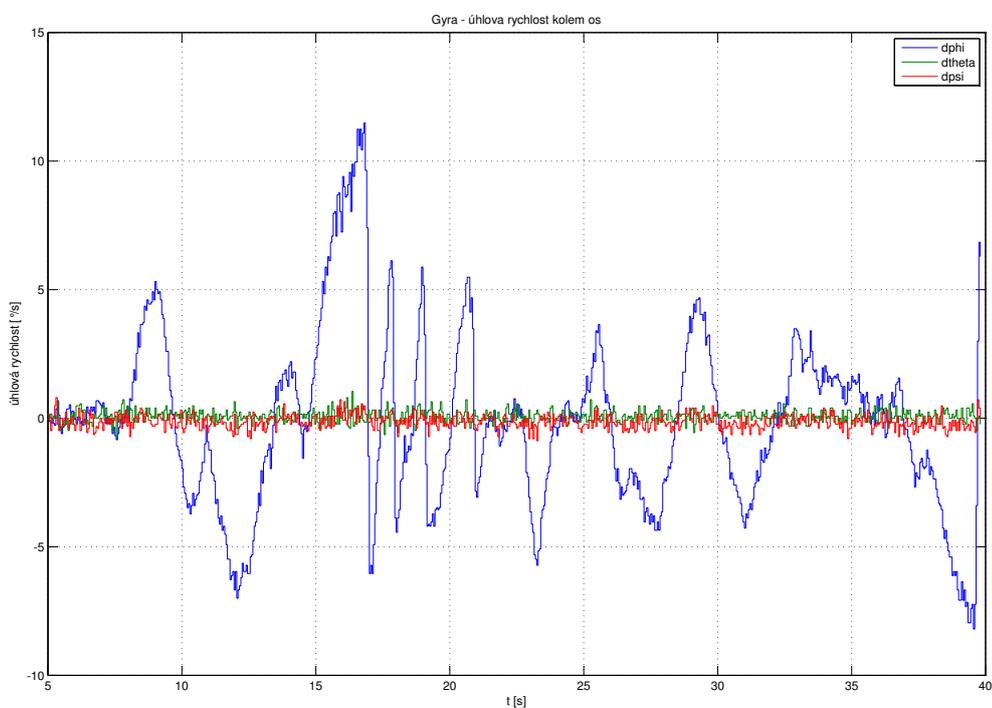
Pro ověřování a nastavení Kalmanova filtru byl vytvořen skript v Matlabu, který vypočte ze změřených dat potřebné parametry a poté provede výpočet Kalmanova filtru. Na grafech jsou vidět vstupní hodnoty akcelerometrů obr.4.14, gyroskopů obr.4.15, stavy Kalmanova filtru obr.4.16 a srovnání vypočtených úhlů všemi metodami obr.4.17.

4.7 Závěr

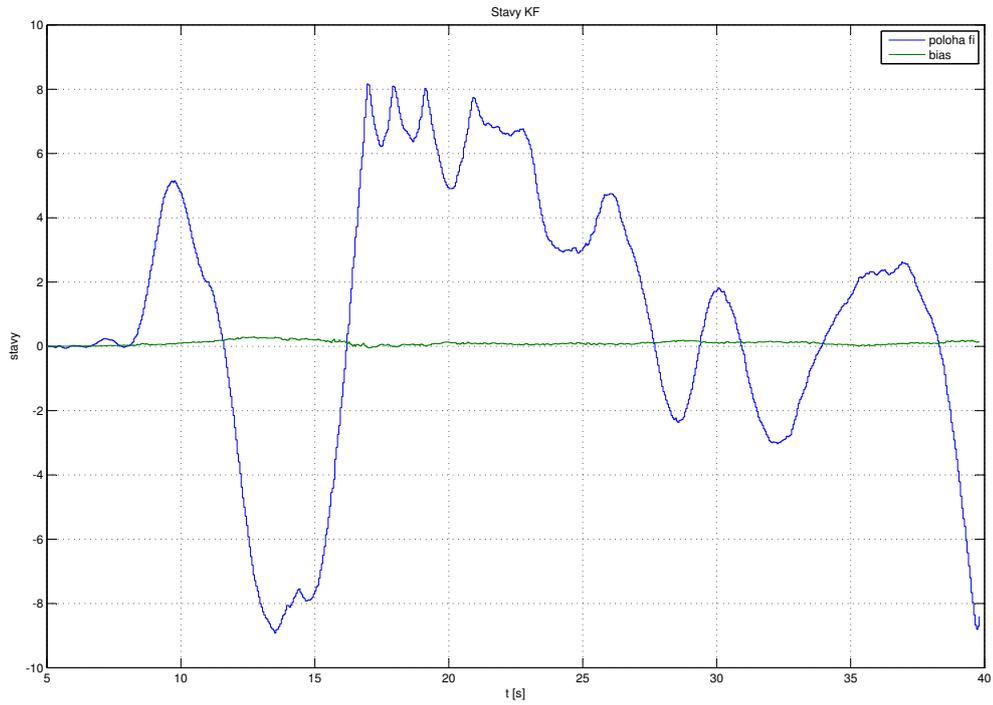
Výsledkem výše popsané filtrace dat jsou úhly natočení stroje v horizontální rovině, ve kterých jsou účinně potlačeny chyby dané vlastnostmi, resp. samotnou konstrukcí senzorů. Podstatou tohoto řešení je syntéza dat získaných z akcelerometrů a z gyroskopů realizovaná Kalmanovou filtrací, která se pro tuto aplikaci velmi hodí. Z výsledků měření je patrné, že tato metoda nepřináší do procesu měření žádné další zpoždění a užitečný signál je sledován velice dobře. Takto získané úhly lze tedy využít přímo pro stabilizaci quadrotoru (viz [9]).



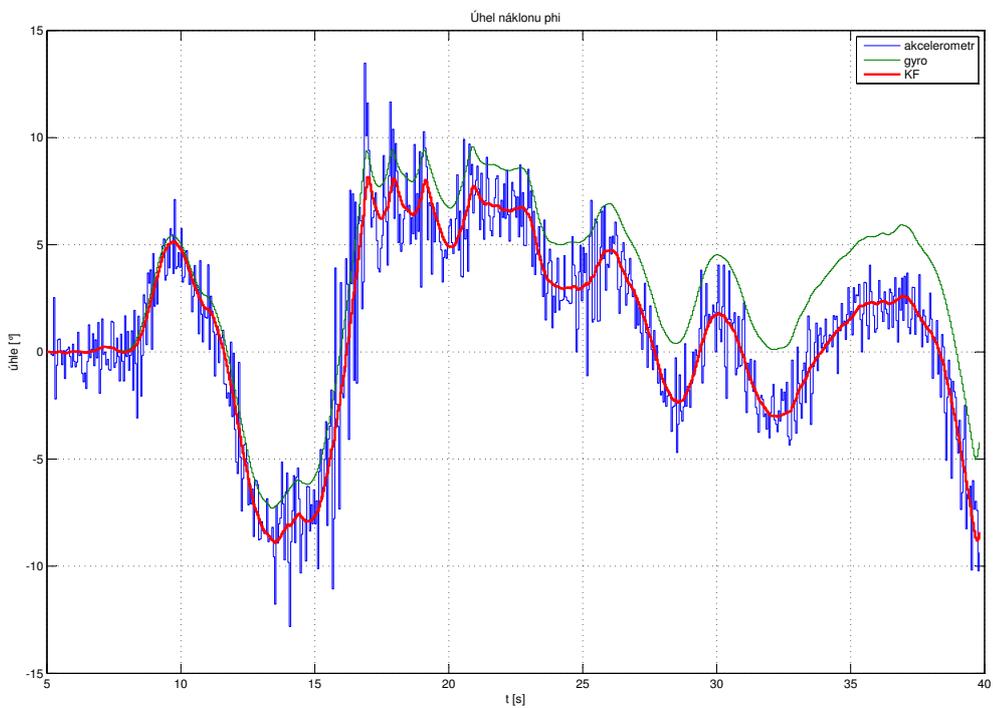
Obrázek 4.14: Akcelerometry zrychlení



Obrázek 4.15: Gyroskopy - úhlová rychlost



Obrázek 4.16: Odhadované stavy Kalmanova filtru



Obrázek 4.17: Srovnání vypočtených úhlů

Kapitola 5

Palubní elektronika

5.1 Hardware pro základní experimenty a xPC

Target

V souladu s koncepcí uvedenou v [9], byla navržena a realizována řídicí deska, která umožňuje komunikaci s pozemní stanicí tvořenou PC s xPC Targetem Matlabu, zajišťuje generování řídicího PWM signálu pro střídače motorů a provádí obsluhu sensorového subsystému. Komunikace s PC probíhá po asynchronní sériové lince. Jádrem zapojení je osmibitový mikroprocesor řady AVR ATmega128.

5.1.1 Výčet základních vlastností ATmega128

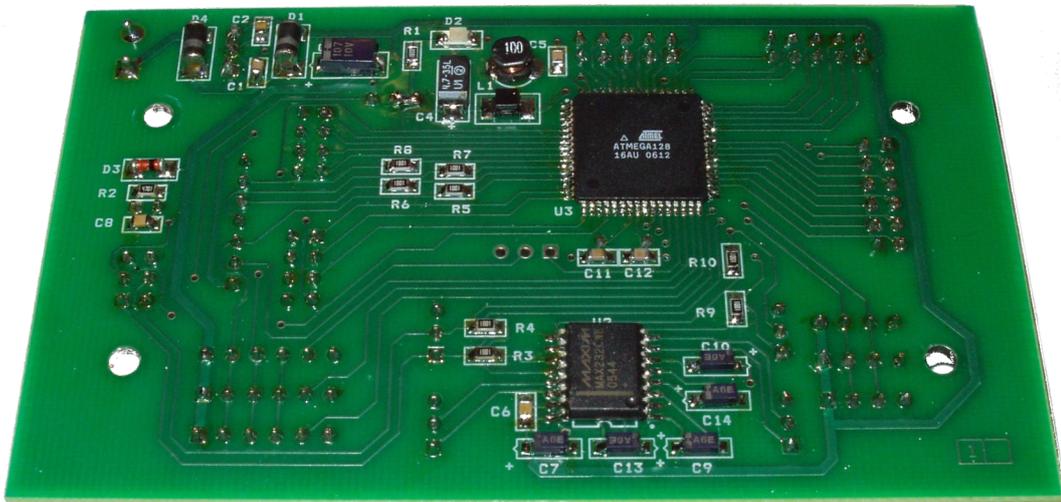
- 6 PWM s rozlišením až 16 bitů
- 2x USART
- podpora sběrnice SPI, TWI (I2C)
- výpočetní výkon až 16MIPS
- propracovaný systém přerušování
- podpora programování a ladění v aplikaci
- možnost využití vyšších programovacích jazyků

Podrobné informace jsou obsaženy katalogovém listu výrobce Atmel[1].

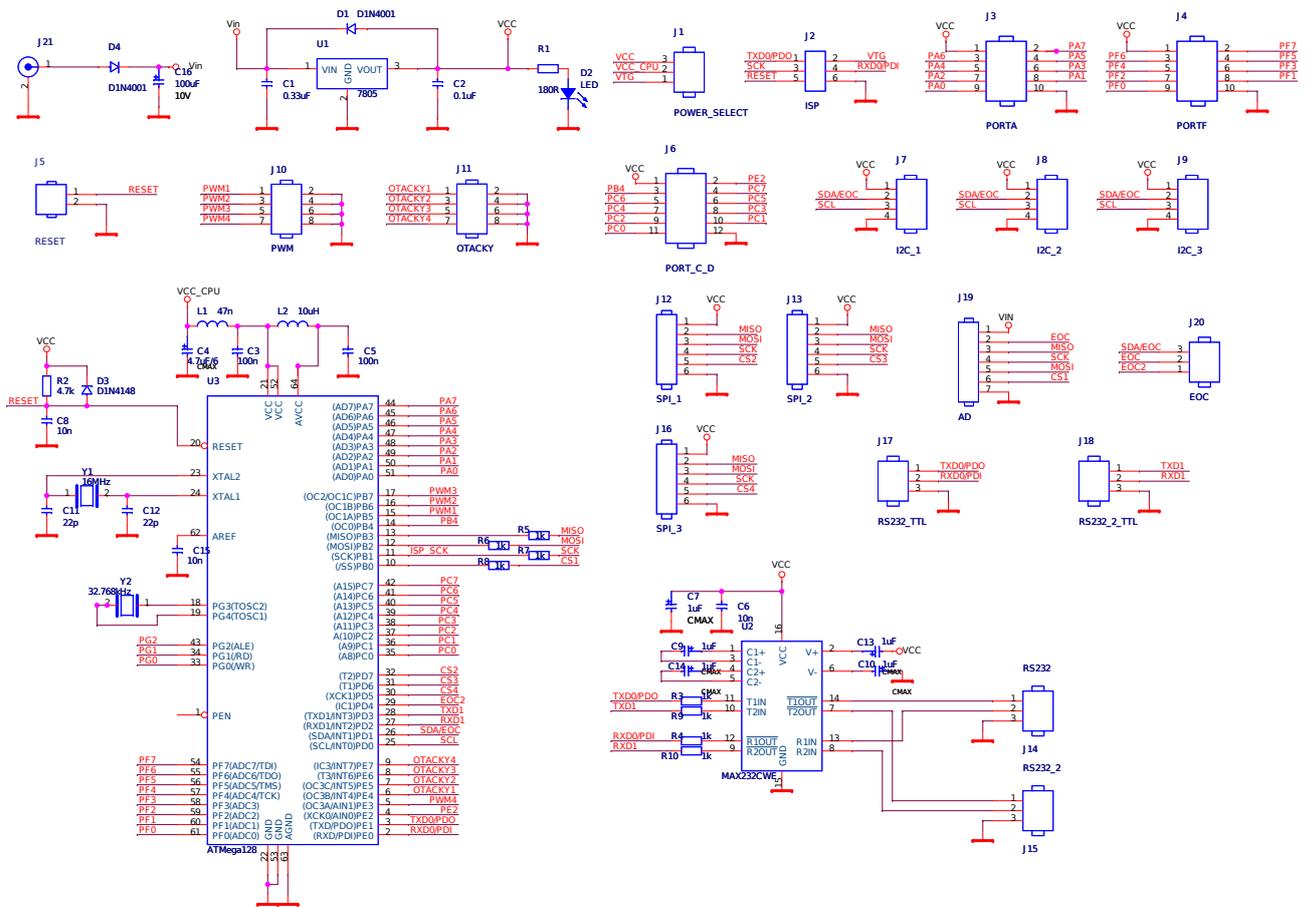
Na tomto HW byly otestovány možnosti vývoje a ladění s pomocí balíku xPCTarget. S touto koncepcí byla provedena měření charakteristik pohonů, analýza dat získaných ze senzorů a ladění regulačních algoritmů.

5.1.2 Popis realizované desky s ATmega128

Na desce jsou vyvedeny všechny potřebné periferie procesoru v podobě pinových lišt pro snadné připojení a testování, externích komponent. Schéma zapojení je na obr.5.2. Na navržené a realizované desce viz obr.5.1 je osazen MAX232CWE 2x budič a přijímač RS232, který zajišťuje převod napěťových úrovní TTL \leftrightarrow RS232 pro USART0 a USART1. Pro připojení inerciálních senzorů s AD převodníkem bylo vytvořeno rozhraní, na něž je připojena sběrnice SPI, napájení a řídicí signál konce převodu. K dispozici jsou další tři konektory na sběrnici SPI a tři konektory na sběrnici TWI (I2C) pro připojení barometrického výškoměru a magnetického kompasu. Na všech těchto konektorech je pro snadnější manipulaci vyvedeno napájení 5 V. Vstup napájení je opatřen filtrem a potřebná úroveň napětí +5 V je získána lineárním stabilizátorem 7805, případně low-drop ekvivalentem. U všech integrovaných obvodů jsou osazeny potřebné blokovací kondenzátory. Zbylé vstupně-výstupní brány mikrokontroléru jsou také propojeny na konektory a je tedy k dispozici například až 26 digitálních vstupů/výstupů nebo 8 analogových SE vstupů v závislosti na nastavené konfiguraci. Toho je možné dobře využít při ladění aplikací.



Obrázek 5.1: Řídicí deska s ATmega128



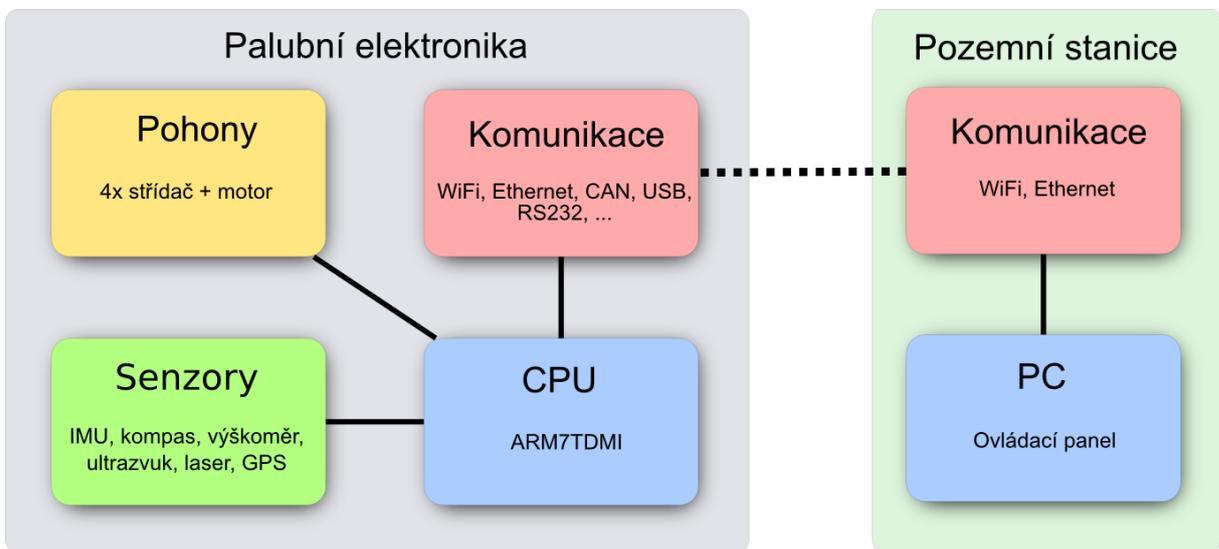
Obrázek 5.2: Schéma zapojení desky s ATmega128

5.1.3 Závěr a výsledky

Navržené a realizované řešení se ukázalo jako dostatečné pro testy a první zkoušky. Řídící deska pojatá jako rozhraní mezi PC a řízeným systémem je velice dobré řešení z hlediska jednoduchosti obsluhy a možnosti snadné změny algoritmů řízení, nebo parametrů přímo z grafického prostředí Simulinku bez nutnosti úpravy programu v mikrokontroléru. Během testů se ovšem ukázalo, že omezujícím faktorem je zejména spolehlivost a rychlost komunikace a regulace ve smyčce s xPC Targetem. Proto byla přehodnocena koncepce řízení s použitím xPC a bylo navrženo nové řešení, kde je PC použito pouze jako operátorský terminál a datové úložiště a algoritmy řízení zpracovává palubní počítač.

5.2 Nová platforma řízení s ARM7

Kvůli změně koncepce, vyšším požadavkům na výpočetní výkon a rychlost odezvy řídicího systému při použití periférií jako Ethernet a dalších, byla vybrána výkonnější platforma pro palubní řídicí počítač. Díky otevřenému návrhu se jedná pouze o výměnu základní desky s procesorem, ke které lze připojit stávající senzorický subsystém. Dosud vyvíjené softwarové vybavení v jazyce C je možné použít po úpravě rozhraní na nový HW. Blokové schéma na obr.5.3 popisuje základní vazby mezi subsystémy.



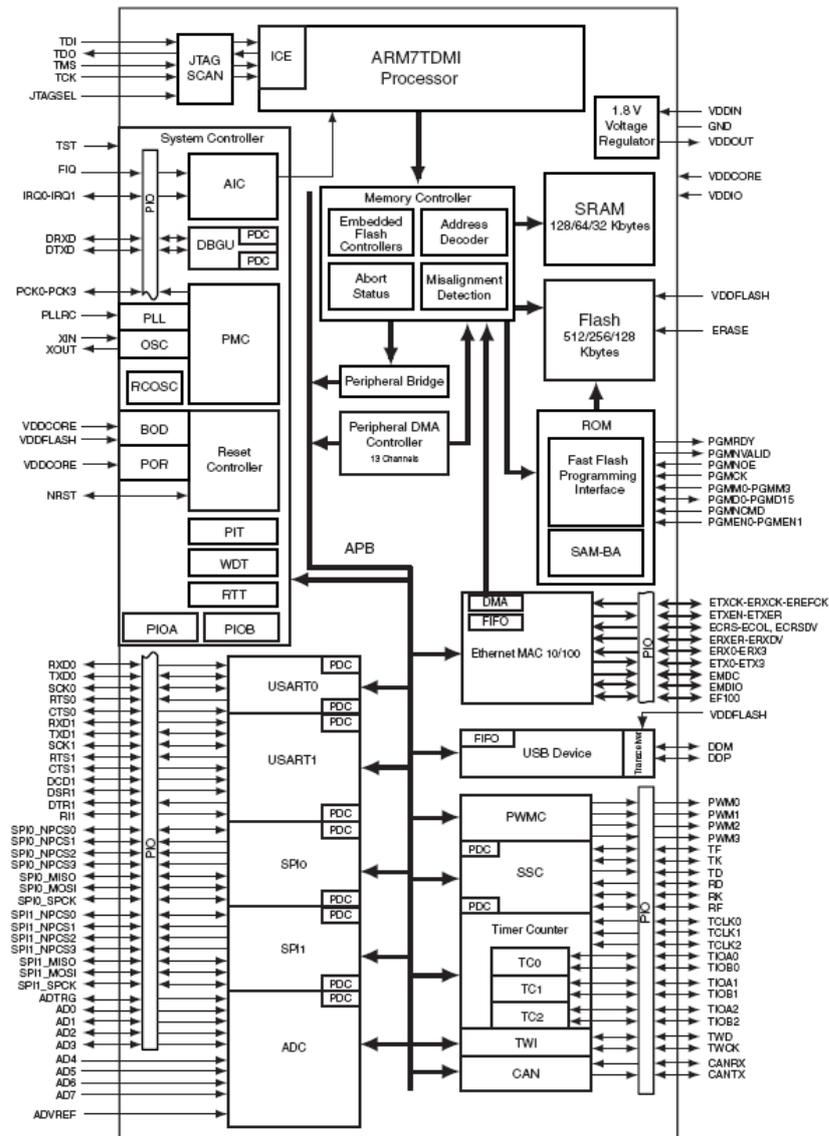
Obrázek 5.3: Blokové schéma elektroniky

5.2.1 Procesor

Po srovnání dostupných možností byl vybrán systém postavený na procesoru ARM7. Jedná se o střední model řady ARM7TDMI od firmy Atmel, který obsahuje celou řadu periférií, jak je ilustrováno na obrázku 5.4.

5.2.1.1 Základní data procesoru AT91SAM7X256

- Jádru ARM7TDMI®ARM®Thumb®Processor
- Instrukční soubor 32-bitů RISC, nebo 16-bitová redukovaná instrukční sada
- Flash paměť 256 Kb
- SRAM 64 Kb
- Integrovaný generátor signálu reset
- Generátor hodin – RC Oscilátor a PLL
- Správce napájení
- Vylepšený řadič přerušení – individuální maskování, osm úrovní priority
- UART ladicí rozhraní
- Intervalový časovač (čítač 20 bitů), Watchdog, čítač reálného času
- Dva paralelní V/V řadiče (62 individuálně nastavitelných linek)
- Řadič přímého přístupu do paměti
- USB 2.0 Full Speed
- Ethernet MAC 10/100 base-T
- CAN řadič (2.0A, 2.0B)
- Synchronní sériový řadič
- USART
- SPI rozhraní 2x, programovatelná délka slova, čtyři linky výběru čipu
- Šestnáctibitový tříkanálový čítač/časovač
- Čtyřkanálový generátor PWM, rozlišení 16 bitů
- TWI (I^2C) rozhraní
- Osmikanálový AD převodník, rozhraní 10 bitů
- SAM-BA™ Boot program
- JTAG rozhraní
- 5V tolerantní vstupy/výstupy
- Integrovaný regulátor 1,8V
- Pracovní frekvence 55 MHz 1.65V
- pouzdro LQFP100

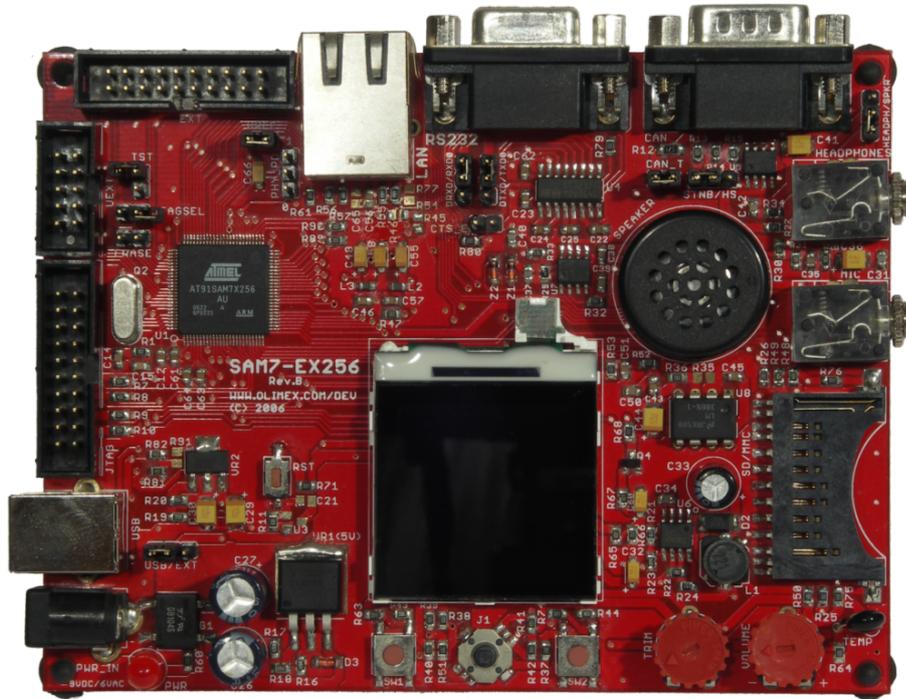


Obrázek 5.4: Struktura a periferie procesoru AT91SAM7X256

5.2.2 Vývojová deska Olimex

Pro tvorbu a ladění programů byla zvolena vývojová deska SAM7-EX256 od firmy Olimex. Jedná se o kit osazený 32 bitovým mikroprocesorem AT91SAM7X-256. Pro naše účely má deska vyvedeny všechny potřebné HW periferie procesoru, zejména rozhraní I2C, SPI, RS232, CAN, USB, která jsou opatřena potřebnými převodníky úrovní. Dále obsahuje uživatelsky konfigurovatelné I/O linky, které pracují na napěťových úrovních 3,3 V, jsou však kompatibilní i s 5 V logikou. Na desce je realizována fyzická vrstva ethernetového

rozhraní. Zvolený procesor umožňuje ladění programu přímo v HW přes rozhraní JTAG, které je také vyvedeno.



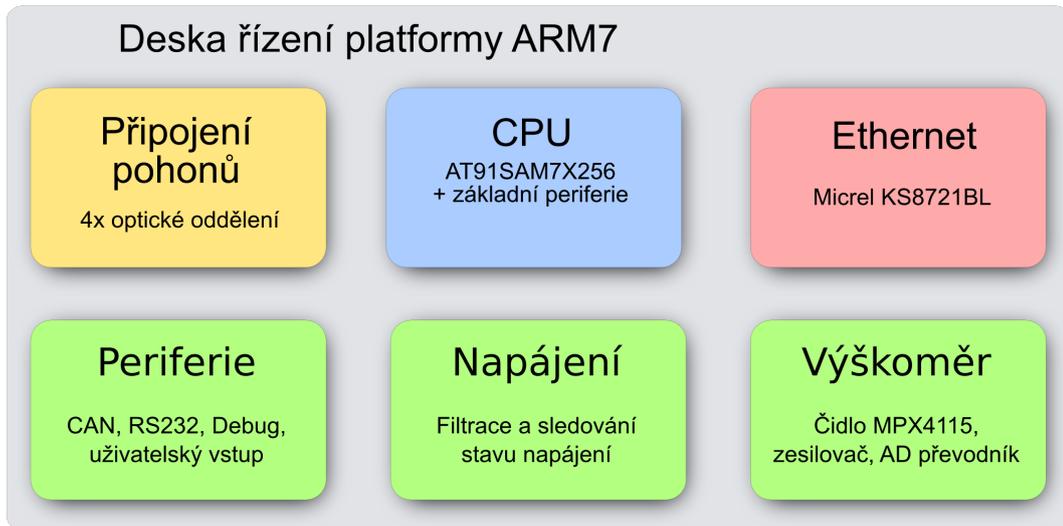
Obrázek 5.5: Vývojová deska Olimex SAM7-EX256

Na vývojovém kitu byla otestována kompatibilita a funkčnost sensorového subsystému s novou platformou a ověřena možnost propojení a komunikace s nadřazeným PC přes ethernet a WiFi. Provedené testy potvrdily správnost volby uvedeného CPU a dostatečný výkon pro tuto aplikaci.

5.2.3 Finální realizace desky řízení

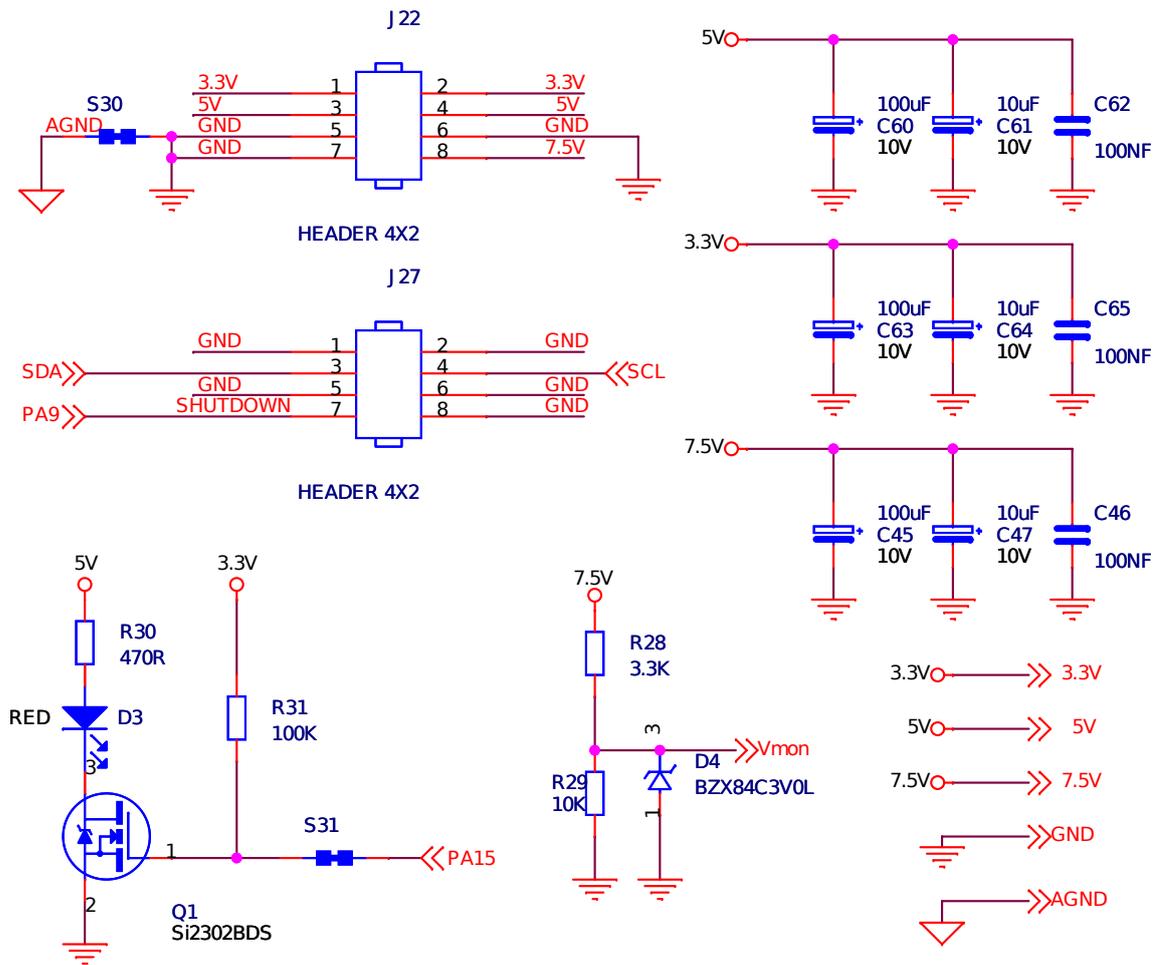
Pro konečné použití na palubě stroje bylo potřeba navrhnout pro novou procesorovou platformu upravenou desku řízení. Bylo nutné zajistit možnost připojení všech externích sensorových modulů a možnost budoucího rozšíření. Některé senzory byly integrovány přímo na tuto hlavní desku. V návaznosti na provedené testy a ze zkušeností s vývojovou deskou Olimex obr.5.5 byly do návrhu zahrnuty úpravy týkající se zejména EMC, fyzického propojení sensorů k desce s ohledem na dostupnost součástkové základny. Schéma celého systému bylo pro přehlednost rozděleno na několik funkčních bloků viz obr.5.6.

Napájecí zdroj pro veškerou palubní elektroniku je součástí konstrukce stroje a je

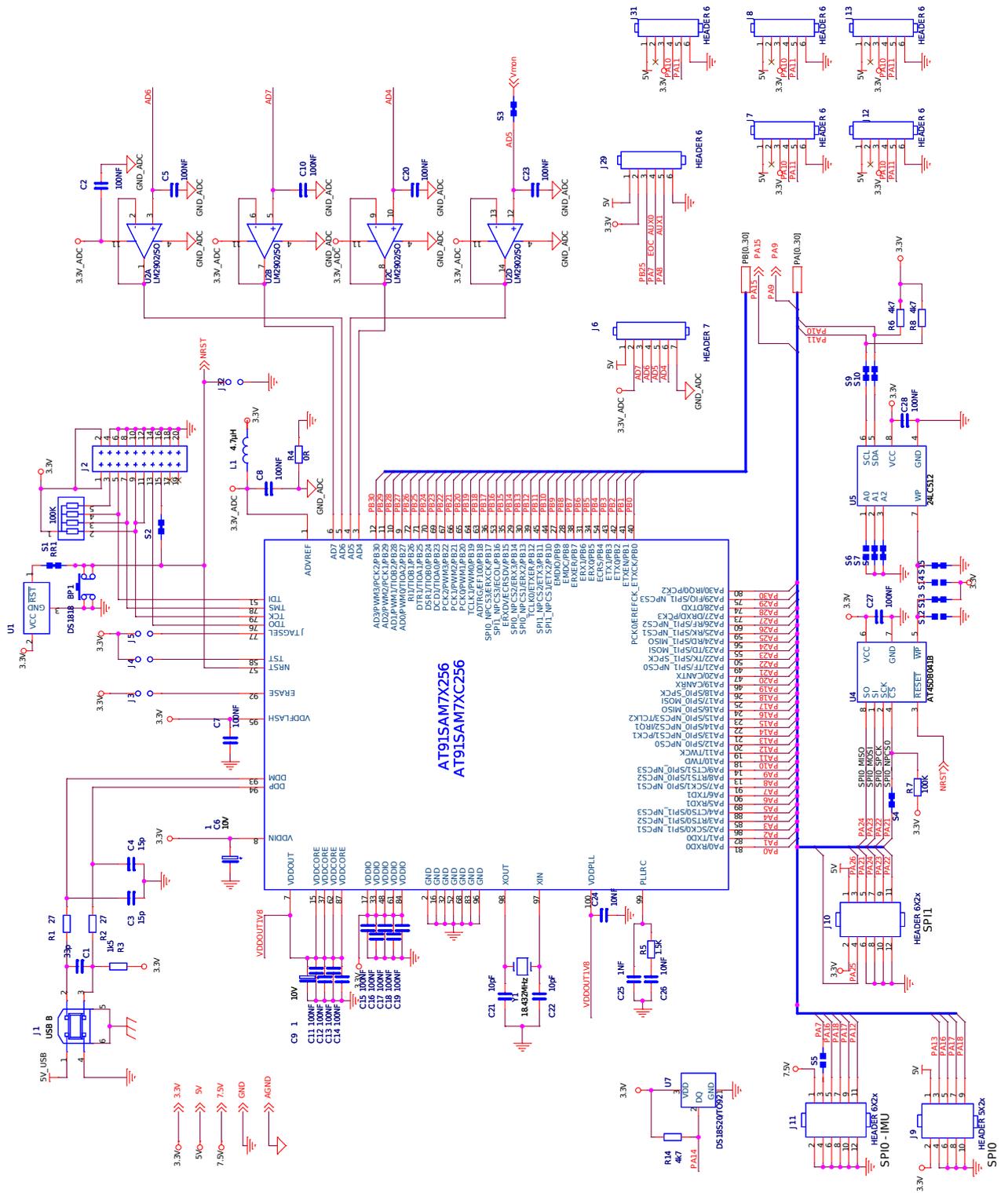


Obrázek 5.6: Bloky řídicí desky elektroniky platformy ARM7

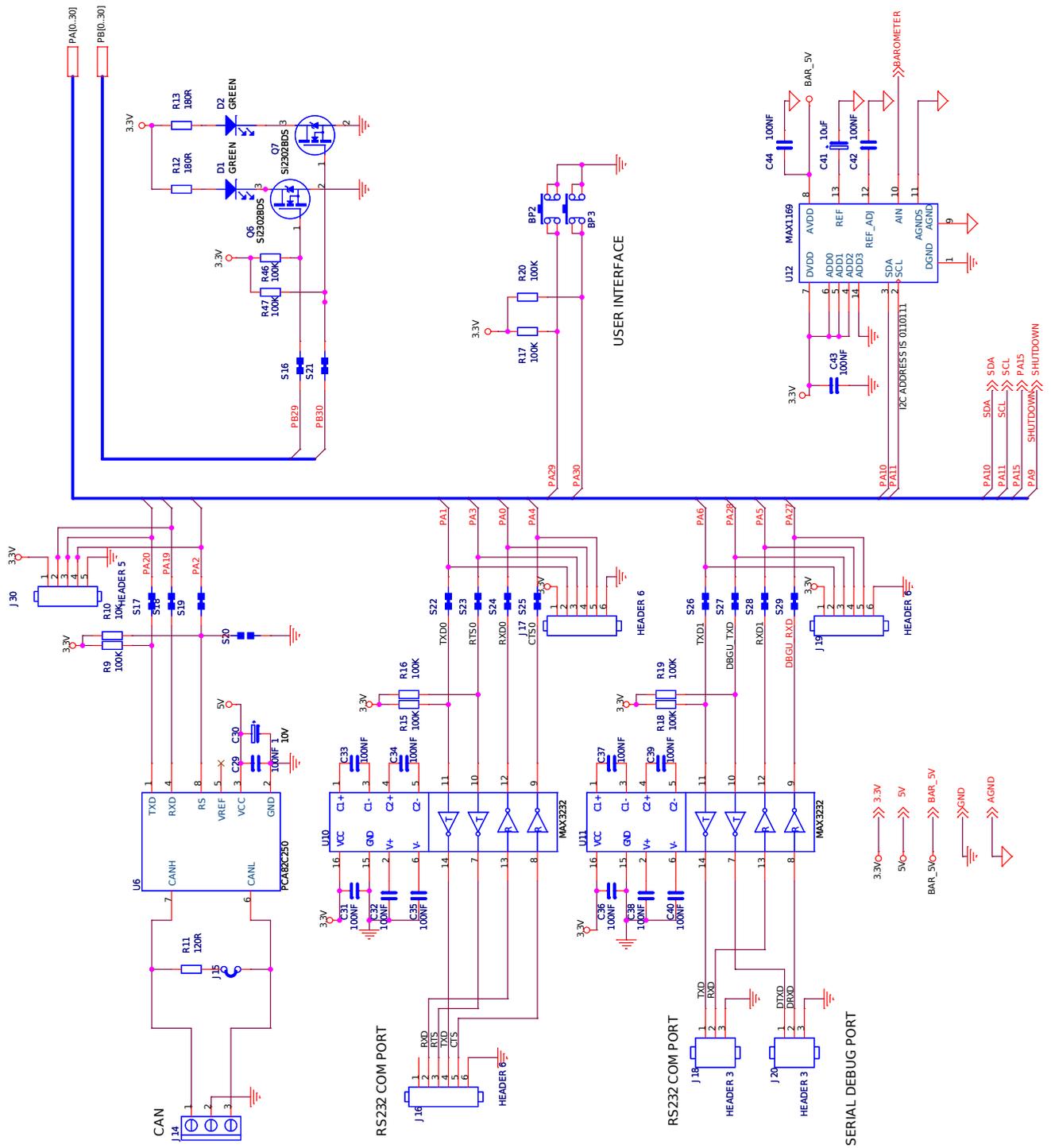
realizován a popsán v [9]. Pro řídicí desku je provedena dodatečná filtrace, aby nebylo napájení nepříznivě ovlivněno dalšími odběry z napájecí soustavy. Schéma napájecích obvodů je na obr. 5.7. Schéma zapojení mikroprocesoru je na obr. 5.8. Kromě mikroprocesoru jsou zde rozkreslena připojení základních periférií. Jedná se hlavně o rozhraní SPI pro připojení inerciální jednotky, sběrnici I^2C pro dálkoměr a kompas, rozhraní USB, port JTAG pro ladění a programování a vstup AD převodníku. Kvůli možnosti ukládání dat bylo do návrhu přidáno i rozhraní pro sériové paměti EEPROM, které není zatím programem využíváno. Další periferní rozhraní jsou na obr. 5.9. Vyvedeny jsou dvě rozhraní USART s převodníky na RS232, ladicí sériové rozhraní také s převodníkem a sběrnice CAN s budičem. Dále je zde uvedeno zapojení AD převodníku pro barometrický výškoměr, který je připojen na sběrnici I^2C . V neposlední řadě je zde také zakresleno rozhraní pro indikaci stavů jednotky pomocí dvou LED a dvě uživatelsky konfigurovatelná tlačítka. Rozhraní pro fyzickou vrstvu ethernetu je na obr.5.10. Připojení pohonů přes optočleny je ve schématech na obr.5.11 a obr.5.12.



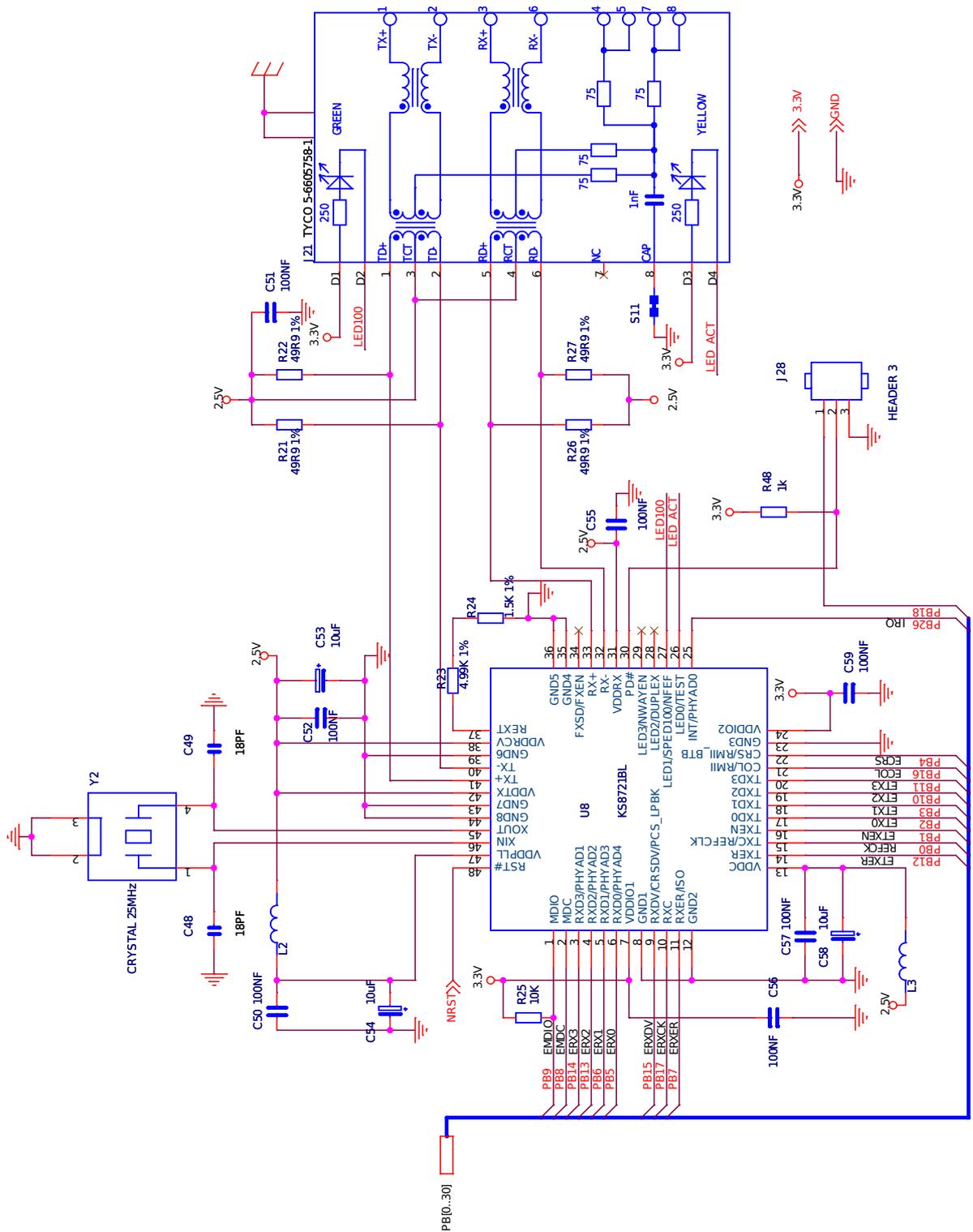
Obrázek 5.7: Filtrace a sledování napájení



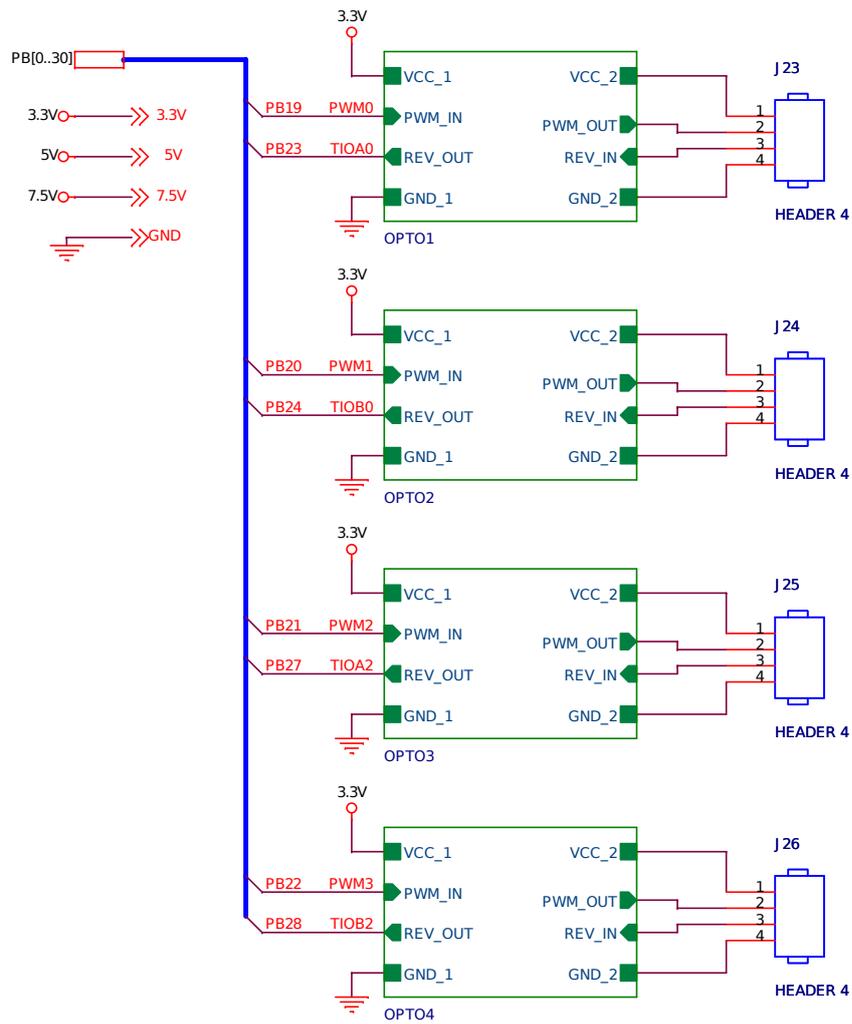
Obrázek 5.8: Schéma zapojení CPU



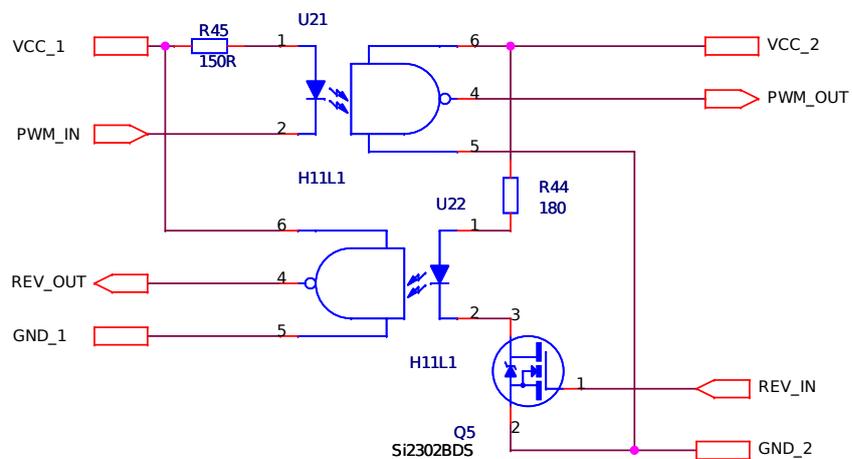
Obrázek 5.9: Zapojení dalších periférií



Obrázek 5.10: Zapojení fyzické vrstvy ethernetu

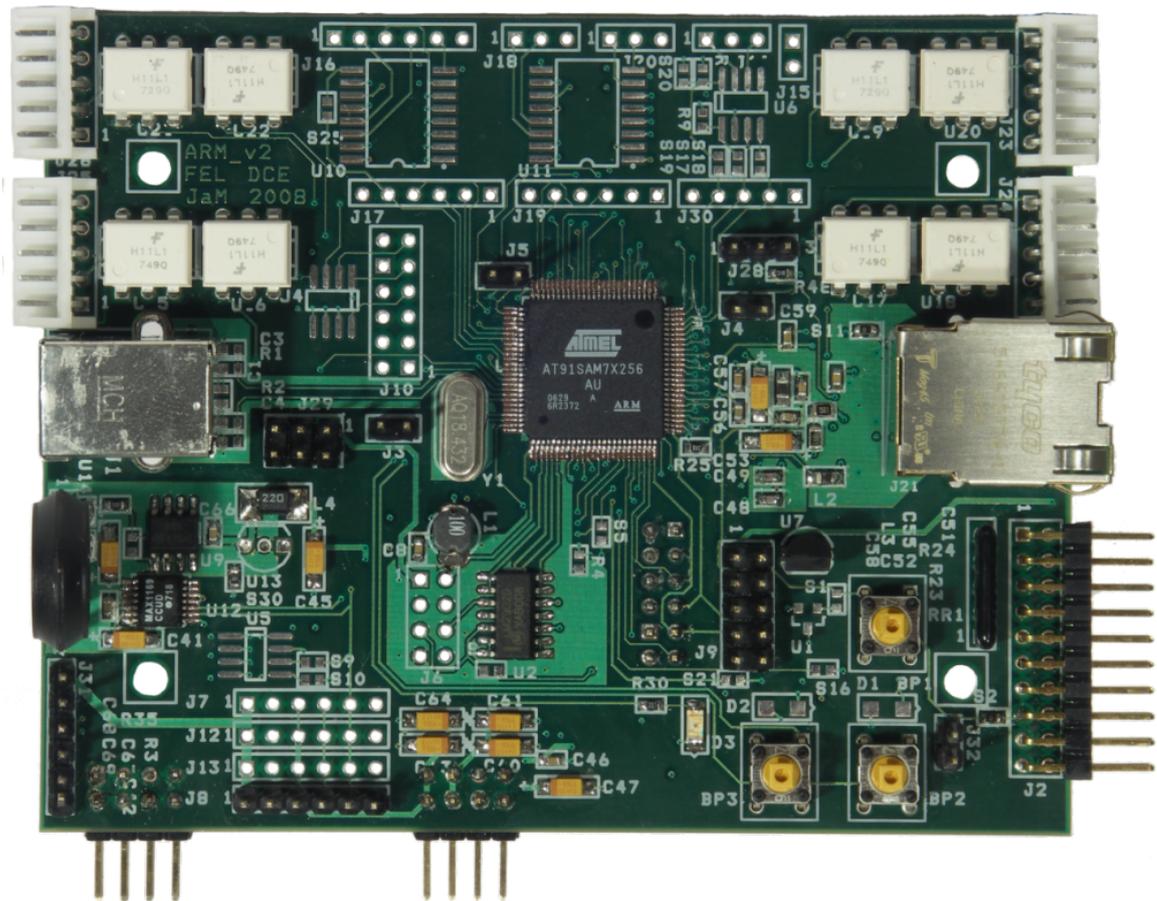


Obrázek 5.11: Zapojení střídačů



Obrázek 5.12: Optické oddělení

Realizovaná deska pro platformu ARM7 na obr.5.13.



Obrázek 5.13: Řídicí deska na platformě ARM7

5.3 Komunikační subsystém

V komunikačním subsystému zůstala kvůli zachování kompatibility možnost komunikace po RS232. Komunikační možnosti byly dle zadání rozšířeny o možnost bezdrátové komunikace s modelem přes WiFi. Bezdrátové připojení zajišťuje modul WiPort obr.5.14 firmy Lantronix [5].

5.3.1 Lantronix WiPort

Jedná se o integrované řešení poskytující 2x RS232, ethernetové 10Base-T/100Base-TX síťové rozhraní, 802.11 b/g kompatibilní radiovou část. Dále jsou obsaženy uživatelsky konfigurovatelné vstupy/výstupy. Pro vyhledání modulu v síťovém prostředí slouží výrobcem dodaný software DeviceInstaller. Pomocí tohoto programu lze nastavit parametry modulu nebo lze pro konfiguraci též použít integrovaný webový server či sériovou konzoli.

Podporované režimy provozu:

- RS232 \longleftrightarrow WiFi
- RS232 \longleftrightarrow Ethernet 10Base-T/100Base-TX
- Ethernet \longleftrightarrow WiFi (transparentní most)

Režimy zabezpečení bezdrátové sítě:

- Bez zabezpečení
- WEP 64/128
- WPA – PSK, TKIP, AES

Topologie bezdrátové sítě:

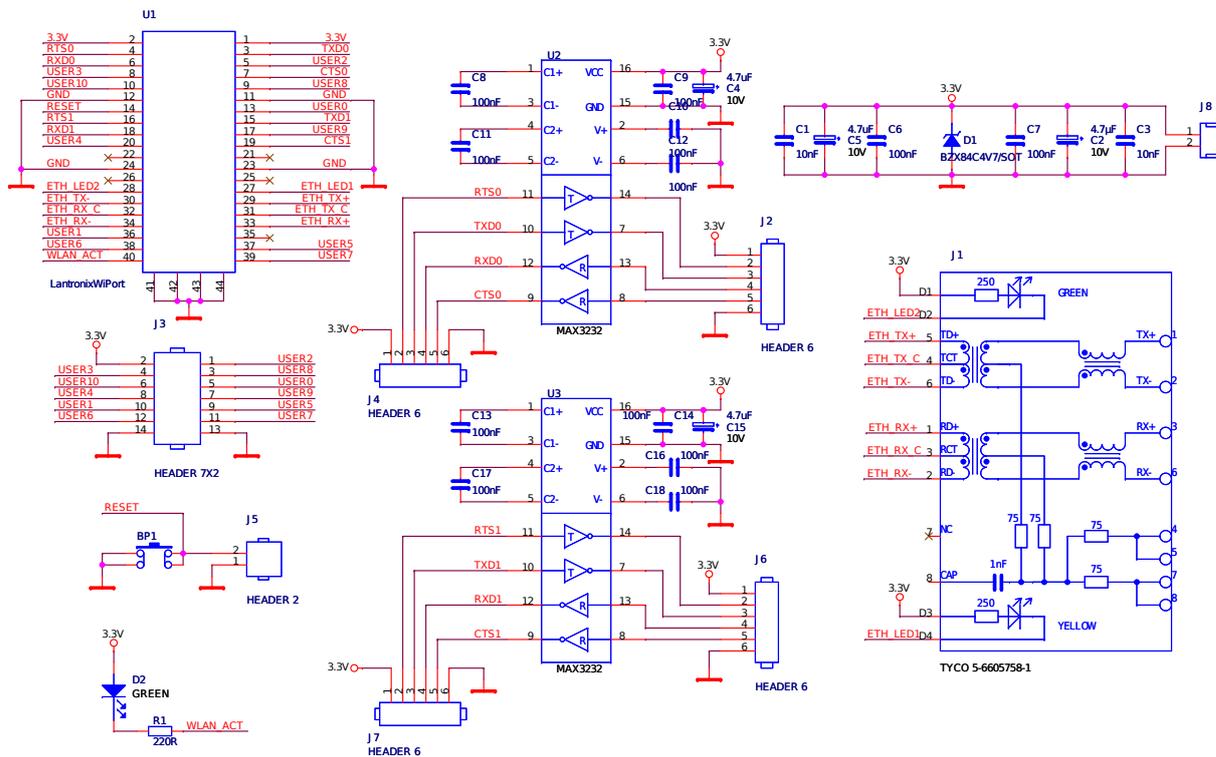
- ad-hoc
- infrastruktura

Podporované protokoly:

- ARP, TCP, UDP, ICMP, BOOTP, SNMP, DHCP, Auto IP
- Telnet, HTTP, SMTP, TFTP



Obrázek 5.14: WiFi modul Lantronix WiPort



Obrázek 5.15: Schéma pro WiFi modul



Obrázek 5.16: Deska pro WiFi modul

Pro tuto aplikaci bylo zvoleno nastavení ad-hoc, bez zabezpečení, jako transparentní most ethernet \longleftrightarrow WiFi. Toto nastavení je vhodné pro mobilní připojení nadřazeného PC v podobě notebooku. Pro připojení k pevně umístěnému přístupovému bodu je vhodnější

použít režim infrastruktura. Po nastavení modulu do režimu transparentní most, není možné použít konfigurační nástroj výrobce ani vestavěný webserver, ale je nutné případné změny v konfiguraci realizovat přes sériovou konzoli. Detailní informace o nastavení jsou k dispozici v dokumentaci výrobce [5]. Modul je možné prostřednictvím patice osadit na desku plošných spojů technologií povrchové montáže, proto bylo navrženo schéma zapojení viz obr.5.15 a deska plošných spojů viz obr.5.16, kde je kromě modulu umístěn filtr napájení, ethernetové rozhraní, převodníky úrovní pro konfiguraci s PC a vyvedeny jsou na konektorové liště uživatelsky konfigurovatelné vstupy/výstupy. Byl tedy vytvořen funkční celek, který naplňuje požadavek zadání na bezdrátovou komunikaci pro stroj quadrotor, ale je možné jej případně použít i samostatně.

Kapitola 6

Palubní software

6.1 Software pro AVR ATmega128

Pro systém palubní elektroniky na platformě ATmega128 byl vytvořen software zajišťující funkci rozhraní pro xPC target. Jeho funkce je především:

- kalibrace senzorů
- měření data
- komunikace s pozemní stanicí (xPC Target)
- generování signálů pro střídače motorů + měření otáček

Program je vytvořen v jazyce C v prostředí CodeVision AVR. Hlavní část kódu je umístěna v nekonečné smyčce, kde je zajištěn příjem povelů, měření a obsluha senzorů a odesílání dat do PC. Komunikace s PC přes sériovou linku je řešena pomocí přerušovacího systému procesoru. Mimo hlavní vlákno je implementována podpora vnějších přerušování pro měření periody otáčkových pulsů ze střídačů motorů. Části kódu a některé ověřené algoritmy, zejména z oblasti komunikace se senzory a měření dat, byly poté, díky zápisu v jazyce C, úspěšně přeneseny na novou platformu s ARM7 a integrovány do konečného řešení. Kompletní zdrojové kódy softwaru pro platformu ATmega128 jsou obsaženy v příloze na CD viz D.

6.2 Software pro platformu s ARM7

Pro práci a programování na nové hardwarové platformě s procesorem ARM7 přicházejí v úvahu zejména následující tři možnosti:

- monolitický vlastní kód
- plnohodnotný operační systém s RT podporou
- jednoduchý RT systém

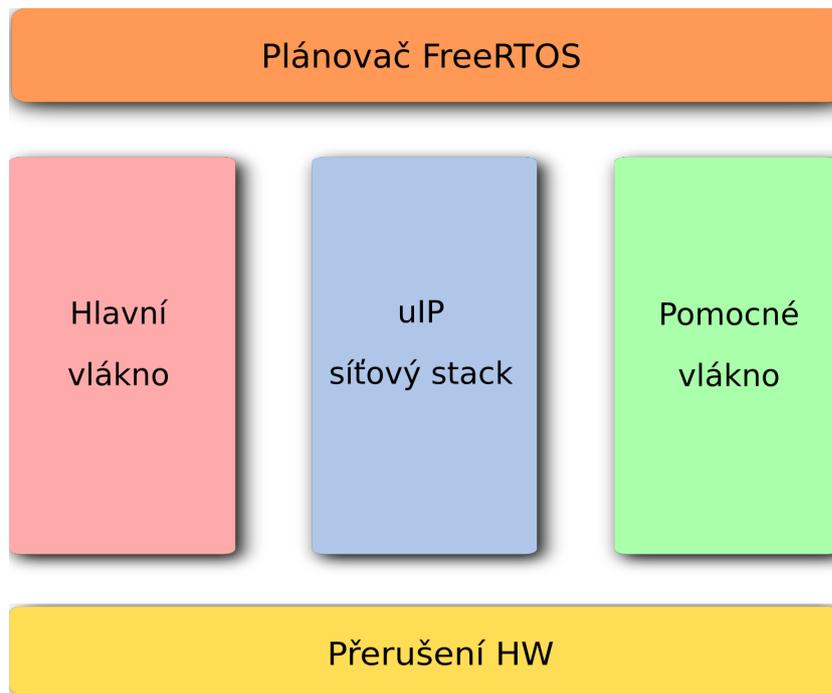
Vývoj celého vlastního kódu může být pro tuto aplikaci vhodný, ovšem při větším rozsahu již nedosahuje dostatečné pružnosti hlavně v možnostech modularity a dalšího rozšíření. Použití plnohodnotného OS poskytuje také celou řadu výhod, ovšem složitost takového řešení je poměrně značná. Navíc také klade větší nároky na použitý HW. Jako nejlepší se ukázala třetí možnost, která v podstatě spojuje výhody obou předchozích, tedy použití jednoduchého RT systému. Zde je možné využít výhody plánovače úloh a meziprocesní komunikace, programátorovi je ovšem ponechán dostatek prostoru pro implementaci kritických částí kódu (např. obsluha přerušení).

6.3 FreeRTOS

Během implementace softwaru pro palubní elektroniku byly úspěšně portovány dva různé RT OS a to NutOS[6] a FreeRTOS[3]. Finální podoba softwaru je založena na systému FreeRTOS, který má lépe řešenu správu procesů, meziprocesní komunikaci a poskytuje konzistentní rozhraní pro přístup k obsluze HW přerušení periférií procesoru. Tato vlastnost je v kódu aplikace využívána, protože bylo nutné implementovat obsluhu pro v návrhu použitá rozhraní I2C, SPI, RS232, PWM a další. Kompletní výčet funkcí a detailní popis programátorského rozhraní je k dispozici v [3]. K vývoji celého palubního softwarového vybavení byly použity nejen zdrojové kódy FreeRTOS, které jsou dostupné pod licencí GPL (GNU General Public License), ale také hlavičkové soubory s popisem HW od výrobců Atmel [1], Maxim IC[4] a komponenta pro síťové služby uIP, která je rovněž volně dostupná a to pod licencí BSD. Originální zdrojové kódy i upravené verze jsou umístěny v příloze na CD viz D.

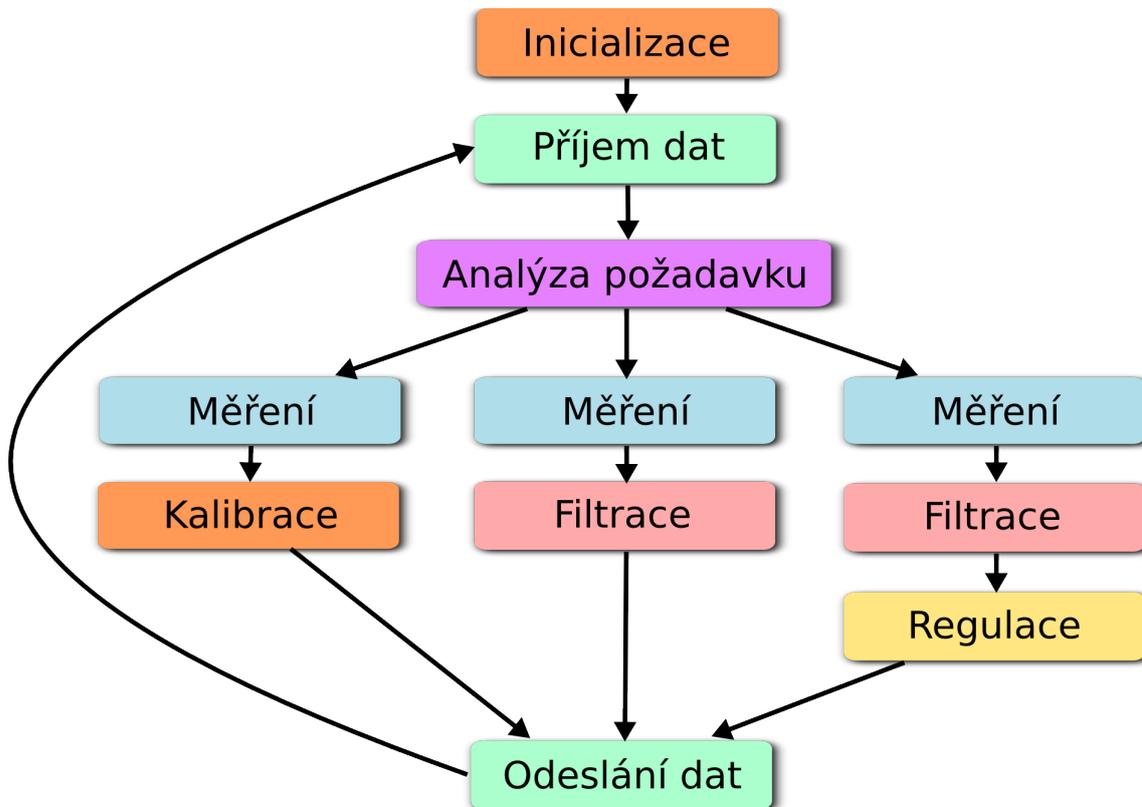
6.4 Struktura programu

Hrubá struktura programu je znázorněna na obr.6.1. Program se skládá ze zavaděče, kde je nejprve provedena inicializace procesoru a jeho periférií, poté jsou vytvořena všechna vlákna a nakonec je spuštěn plánovač OS, ten potom běží v nekonečné smyčce.



Obrázek 6.1: Blokové schéma struktury programu

Celkem jsou v systému plánována tři vlákna. Hlavní vlákno zajišťuje časově kritické sekce, kde je nutná zaručená konstantní odezva. Blokově je znázorněna struktura hlavního vlákna na obr. 6.2. Z diagramu je dobře patrné, že hlavní vlákno může po inicializaci, která je společná, provádět tři různé činnosti. Výběr, která větev vlákna se bude provádět, závisí na datech přijatých z pozemní stanice. V klidovém stavu před startem je prováděno pouze měření a z klidových hodnot je určována kalibrace pro nulovou hodnotu senzorů. Další možností je předstartovní fáze. Zde probíhá měření a filtrace dat Kalmanovým filtrem, která jsou odesílána na pozemní stanici. Během této fáze není počítáno řízení a blok PID regulace je inicializován na výchozí hodnoty. V posledním případě se jedná o letovou konfiguraci, kdy je na základě požadavku z pozemní stanice a ze změřených a vyfiltrovaných dat počítáno a realizováno řízení pohonů. Vlákno uIP zajišťuje běh síťové komunikace a jeho aktivace je možná periodicky pro obsluhu TCP spojení nebo pomocí přerušení při příchodu dat. V posledním vlákně jsou umístěny části, které nepožadují tak vysokou rychlost zpracování, například komunikace po I^2C . Mimo tato plánovaná vlákna dochází k HW i SW přerušením, která jsou zpracována buď hned v kódu obsluhy přerušení, nebo je upozorněno příslušné vlákno.



Obrázek 6.2: Blokové schéma hlavního vlákna

6.5 Algoritmy řízení

Navržený palubní software zajišťuje snadné zahrnutí dalších vlastností a funkcí. Toho bylo využito při implementaci kódů PID regulátoru, který byl navržen v [9]. Jednalo se zejména o přizpůsobení rozhraní a volbu datových struktur pro ukládání dat. Tento kód je umístěn v hlavním vlákne viz obr.6.2 v bloku Regulace.

6.6 Komunikační protokol

Datové propojení palubního systému a pozemní stanice je zprostředkováno přes bezdrátové WiFi připojení. Použitý komunikační protokol je TCP, jedná se tedy o spojovanou, spolehlivou transportní službu. Implementace tohoto protokolu je realizována v balíku síťových služeb uIP[20]. Obsluha TCP spojení v uIP předpokládá realizaci stavového automatu

viz obr.6.3 dle příznaků, které jsou definovány v této implementaci. Jedná se o stavy připojení, odpojení, přerušování spojení, ztrátu paketu, přijatá data a další. TCP spojení je na straně palubního systému jako server a pozemní stanice vystupuje v komunikaci jako klient, který inicializuje spojení.

Stavový automat obsluhy TCP spojení:

```

1 void myTCP_appcall(void) {
2     struct AMessage *pxMessageForTx;
3     struct AMessage *pxMessage;
4     int charswaiting = 0;
5
6     if (uip_connected()) {
7         s.state = STATE_CONNECTED;
8         sprintf(buff, "Hlavicka souboru ...\r\n");
9         uip_send(buff, strlen(buff));
10        return;
11    }
12    if (uip_newdata()) {
13        pxMessage = &RxMessage;
14        pxMessage->ucMessageID = 2;
15        strncpy(pxMessage->ucData, uip_appdata, uip_len);
16        *(pxMessage->ucData+uip_len)='\0';
17        xQueueSendToFront(s.xRxdChars, ( void * ) &pxMessage, tcpNO_BLOCK);
18    }
19    if (uip_closed()){
20        s.state = STATE_CLOSED;
21    }
22    if (uip_aborted()){
23        s.state = STATE_ABORTED;
24    }
25    if (s.state == STATE_CONNECTED) {
26        charswaiting = uxQueueMessagesWaiting(s.xCharsForTx);
27        if (charswaiting) {
28            if (xQueueReceive( s.xCharsForTx, &( pxMessageForTx ), tcp1MS_BLOCK ) == pdTRUE) {
29                uip_send(pxMessageForTx->ucData, strlen(pxMessageForTx->ucData));
30            }
31        }
32    }
33 }

```

Obrázek 6.3: Zjednodušený stavový automat pro obsluhu TCP spojení

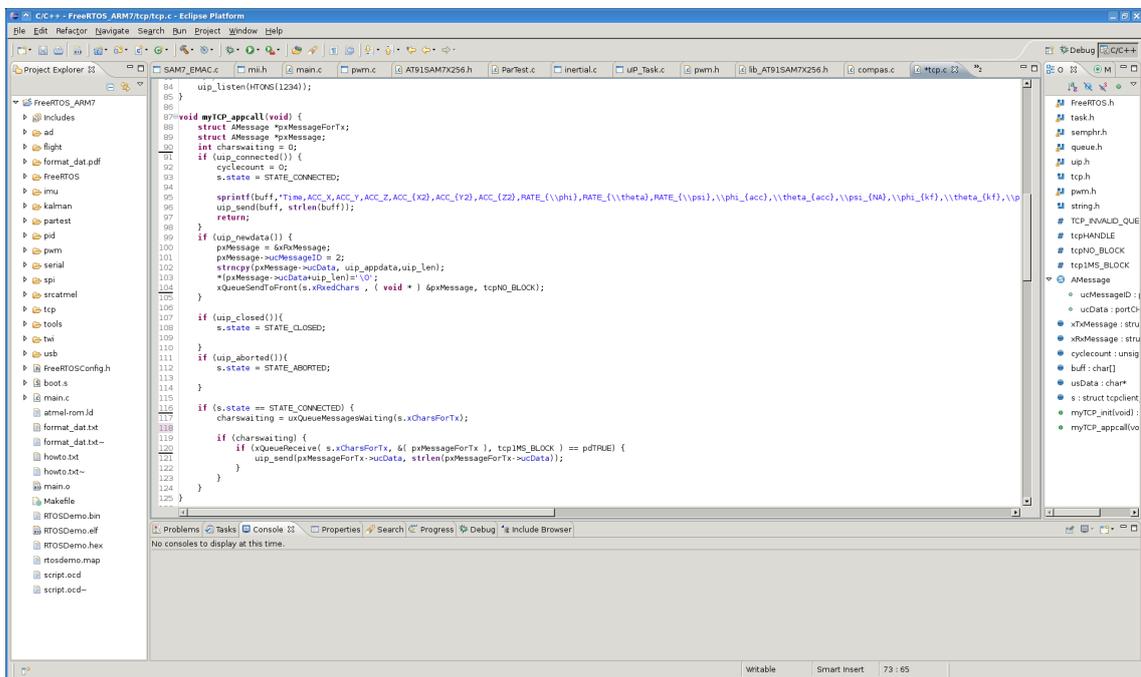
Tento kód je spouštěn plánovačem v rámci úlohy uIP viz obr. 6.1 a je zavolán při každé síťové události, proto je potřeba přijatá data ihned zpracovat. Zpracování dat v tomto místě programu by bylo nevhodné, proto je použita fronta zpráv, kterou nabízí programátorské rozhraní FreeRTOS. Data jsou touto frontou odeslána a zpracována mohou být až v hlavním vlákne. Stejný postup mezivláknové komunikace prostřednictvím fronty je použit i při odesílání dat. Pro snížení datové a výpočetní náročnosti není frontou posílán celý balík dat, ale pouze odkaz na strukturu zprávy, kde jsou tato data uložena. Formát odesílaných dat je zvolen jako textový. To přináší výhodu snadného zpracování, kontroly a ukládání. Pro přenos dat se používají znaménková celá čísla v rozsahu Int32. Textový

řetězec je naformátován pomocí funkce jazyka C printf. Tím lze skladbu přenášených dat snadno a rychle změnit.

6.7 Vývojový řetězec

Pro práci na palubním software byl odladěn vývojový řetězec, který pokrývá celý proces návrhu software od tvorby a správy kódu ve vývojovém prostředí obr.6.4, přes překlad programu a zápis do flash paměti procesoru až po ladění vytvořené aplikací přímo na cílovém HW. Použity jsou tyto aplikace:

- vývojové prostředí Eclipse s rozšířením CDT (C Development Tools)
- překladač gcc
- ladicí nástroj gdb
- interface pro programování a ladění v hardwaru OpenOCD



Obrázek 6.4: Vývojové prostředí Eclipse CDT

Všechny tyto aplikace jsou volně dostupné a šiřitelné. Celý tento řetězec byl realizován pod systémem GNU/Linux, ale všechny uvedené aplikace jsou dostupné i ve verzi pro MS Windows. To je nesporná výhoda oproti uzavřenému řešení třetích stran.

Kapitola 7

Software pozemní stanice

7.1 Testovací software pro platformu AVR

Pozemní stanice je realizována v [9]. Pro účely prvních testů s platformou AVR ATmega128 (tj. ověření komunikace, testy připojení pohonů, měření charakteristik vrtulí) byl rámci této práce vytvořen jednoduchý software v jazyce C#. Tento program umožňuje z grafického uživatelského rozhraní viz obr.7.1 připojení k řídicí jednotce a přímé ovládání PWM řídicích signálů pro střídače motorů. Zároveň do stavového okna vypisuje diagnostická data posílaná řídicí jednotkou a opatřená časovou značkou. Data je možné archivovat do textového souboru pro pozdější analýzu. Zdrojový kód ve formě projektu pro Visual Studio 2005 je umístěn v příloze na CD. Pro detailní analýzu a řízení byla pozemní stanice realizována jako xPC Target z balíku Matlab viz. [9]. Tato koncepce, se osvědčila na testy a měření, avšak kvůli nedostatečné spolehlivosti byla nahrazenou novým řešením.

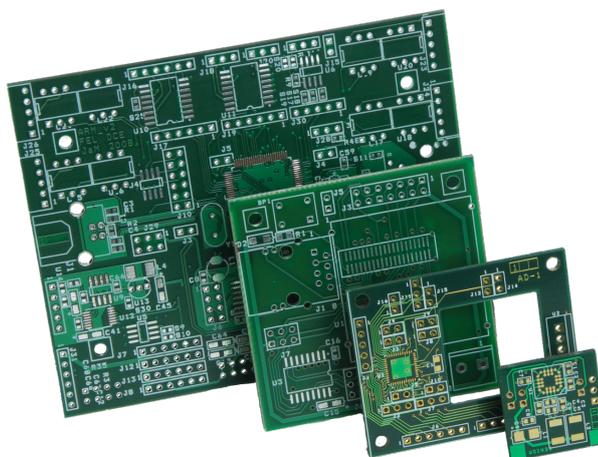
7.2 Operátorský panel pro novou koncepci

Programové vybavení pro uživatelský vstup je stejně jako původní řešení s xPC realizováno v [9], kde je uveden podrobnější popis pozemní stanice. Jedná se o grafické rozhraní obr.7.2 se síťovou komunikací přes TCP. Zadávání vstupu se uskutečňuje pomocí pákového ovladače. Uživatelé jsou graficky prezentována měřená data. Další možnosti komunikace je použití programu Telnet, což se dobře hodí pro ladění a rychlé otestování funkčnosti spojení.

Kapitola 8

Realizace palubní elektroniky

Součástí práce nebyl pouze kompletní vývoj palubní elektroniky, ale důraz byl kladen také na její realizaci a odladění. Práce na realizaci přinesla nové zkušenosti a poznatky, související s kompletní technologií návrhu desek a osazováním plošných spojů. Zahrnuje tvorbu předloh v návrhovém systému OrCAD, kde je nutné vzít v úvahu technické požadavky na výsledné zařízení, dostupnost součástkové základny, technologické možnosti výrobce a způsob konečné úpravy desek a jejich osazování. Dalším krokem je příprava kompletní výrobní dokumentace pro externího výrobce, tedy zejména generování validních elektronických podkladů. Z hlediska konečné úpravy desek a jejich osazování je nutné zohlednit, zda se jedná o strojové zpracování, nebo ruční výrobu. Tomu je nutné přizpůsobit velikosti pájecích plošek a způsob jejich připojení k vodivým cestám. Tato problematika je velice dobře zpracována v [19] a [18]. Výsledek návrhu je na obr.8.1.



Obrázek 8.1: Vyrobené desky plošných spojů pro řídicí počítač s ARM7, WiFi modul a inerciální jednotku

Většina použitých komponent je v pouzdrech pro technologii povrchové montáže (SMT). Tento typ pouzder přináší lepší vlastnosti z hlediska parametrů součástek a díky menší velikosti dovoluje minimalizovat propojovací cesty na deskách plošných spojů. To celkově vede k lepší odolnosti vůči rušení a zároveň může být výsledná deska menší a levnější. Této technologii je ovšem potřeba přizpůsobit technologii pájení a osazování. Ještě výraznější je tato potřeba zejména s příchodem direktivy RoHS (Restriction of the use of Hazardous Substances) zakazující použití nebezpečných látek v elektrických a elektronických výrobcích a nutností používat některé komponenty v provedení pro bezolovnaté pájení. Pro realizaci vlastními silami je tedy nezbytné použít kvalitní pájecí přípravky viz obr.8.2, které významně zkvalitňují práci a snižují tepelné namáhání součástek. Pájení součástek v běžných pouzdrech je bezproblémové, ovšem moderní integrované obvody použité i v této práci jsou stále častěji určeny výhradně pro strojové pájení. Jedná se o pouzdra QFP (Quad Flat Package) s roztečí nohou cca 0,5 mm, QFN (Quad Flat No leads), kde jsou jen plošky na pouzdru součástky a BGA (ball grid array), kde jsou pájecí body ve formě kuliček umístěny na spodní stěně. Tato pouzdra je možné pájet pouze přetavením. Proto byla použita horkovzdušná pájecí stanice na obr.8.3 s níž se podařilo všechny potřebné součástky osadit.

Všechny elektronické díly hardwarové části byly navrženy a vyrobeny vlastními silami. Byly odskoušeny a jsou plně v provozuschopném stavu. I když byla tato práce z hlediska řešení podpůrného charakteru, zabrala poměrně hodně času, iniciativy a odvahy. Strojní osazování by bylo samozřejmě možné, trvalo by však déle a bylo by neúměrně drahé.



Obrázek 8.2: Moderní pájecí přípravky



Obrázek 8.3: Horkovzdušná a klasická pájecí stanice

Kapitola 9

Závěr

Výsledkem této práce je komplexně navržený a realizovaný systém palubní elektroniky. Tento systém byl osazen do quadrotoru a v průběhu letových zkoušek byla ověřena jeho funkčnost jako celku. Jednotlivé části jsou pro přehlednost okomentovány samostatně.

9.1 Deska řízení

Během práce na vývoji byla nejprve realizována deska řízení jako rozhraní mezi platformou xPC a strojem quadrotor. Tato koncepce se během zkoušek ukázala jako ne zcela vyhovující, proto byla vyvinuta na základě těchto zkušeností nová řídicí deska s procesorem ARM7, která nyní zajišťuje běh algoritmů řízení. Tato nová koncepce značně rozšiřuje možnosti palubní elektroniky a tím i celého stroje. Zároveň poskytuje dostatečný prostor pro další rozšiřování. Tato zásadní zlepšení umožnila použít pokročilé možnosti filtrace dat na palubě a přenosový kanál mezi strojem a pozemní stanicí realizovat bezdrátově prostřednictvím WiFi.

9.2 Jednotka inerciálních měření

Jednotka inerciálních měření byla v rámci této práce kompletně vyvinuta od ideového návrhu až po realizaci celého modulu. Ten byl vlastními silami realizován, oživen a jeho funkčnost byla ověřena během syntetických testů i reálných letových zkoušek, kde bylo dosaženo z hlediska měření výborných výsledků. Díky použití Kalmanova filtru, pro od-

had úhlů natočení stroje v horizontální rovině, na měřená data z inerciálních senzorů bylo možné zajistit účinné potlačení jak časových a teplotních driftů použitých gyroskopů, tak i značnou citlivost akcelerometrů na vibrace stroje. Získaná měření poskytují kompletní sadu dat pro popis polohy tělesa se šesti stupni volnosti. Ze změřených dat při letových zkouškách však bylo zjištěno, že není možné použít metodu integrace posuvného zrychlení přímo pro určení polohy stroje v prostoru bez dalších prostředků. Na úrovni softwaru se může jednat například o implementaci Kalmanova filtru pro odhad stavů celého stroje, dle matematického modelu uvedeného v [9], na úrovni hardwaru je řešením použití absolutních senzorů polohy.

9.3 Podpora orientace v prostředí

Základ pro orientaci v prostředí tvoří výše uvedená jednotka inerciálních měření. Sama ovšem není schopna, jak bylo uvedeno, poskytnout data pro delší sledování polohy v prostoru. Proto byl do návrhu zahrnut, navržen a realizován barometrický výškoměr a zakoupen magnetický kompas. Návrh HW řešení počítá i s použitím GPS. Tato data již poskytují kompletní krátkodobou i dlouhodobou informaci o absolutní poloze v prostoru. V návrhu je zapracován koncept detekce překážek a kolizí pomocí ultrazvukových dálkoměrů a mapování prostředí laserovým dálkoměrem. Vzhledem k obrovskému rozsahu byl navržen a realizován hardware viz odst.9.1, který s touto aplikací počítá a poskytuje možnost snadného připojení všech těchto senzorů, ale konkrétní zpracování dat již není součástí této práce.

9.4 Software

Softwarová výbava pro palubní elektroniku je koncipována modulárně s použitím operačního systému FreeRTOS. Tím je umožněno snadné zpracovávání více úloh, jejich vzájemná komunikace a je zajištěno další snadné rozšiřování v průběhu vývoje. V software je implementován kód zajišťující měření a filtraci dat z inerciální jednotky pro přímé použití pro regulaci, která je zde také součástí programu. Pro další rozšíření systému senzorů nebo pro pokročilejší zpracování již dostupných dat je vytvořen základní softwarový rámec, na který je možno navázat konkrétním algoritmem. Veškeré programy jsou ve zdrojové

formě a ve formě přeložené pro danou aplikaci Quadrotor vzhledem k jejich rozsahu uvedeny na příloženém CD diplomové práce viz D. Pro tvorbu palubního software byl použit a odladěn vývojový řetězec zahrnující uživatelské IDE, překlad kódu, programování a ladění programu přímo v aplikaci. Celý tento balík poskytuje vysoký komfort práce a dále přispívá ke snadnější integraci nových vlastností do programu. Všechny použité aplikace jsou šířitelné volně na platformě Linux i Windows.

9.5 Shrnutí

V rámci práce se podařilo kompletně navrhnout, vytvořit a otestovat systém palubních senzorů a elektroniky. Ten tvoří ucelený řetězec pro měření s vyřešeným bezdrátovým přenosem do PC. Je tak připraven systém, na kterém lze velice jednoduše realizovat měření se strojem, identifikaci parametrů a následně řízení, bez dalších dodatečných prostředků. Další možností rozšíření a vylepšení tohoto systému se nachází zejména v oblasti hlubší analýzy, filtrace a zpracování dat z inerciální jednotky, případně integrace těchto dat s měřeními z dalších senzorů.

Příloha A

Soupisky součástek

A.1 Deska řízení s ATmega128

Počet	Reference	Hodnota	Počet	Reference	Hodnota
1	C1	0.33uF	2	J10	CONN 2X4
2	C2,C3,C5	100nF	3	J12	CONN 1X6
1	C4	4.7uF	6	J1,J13,J14,J15,J17,J18,J20	CONN 1X3
3	C6,C8,C15	10nF	1	J19	CONN 1X7
5	C7,C9,C10,C13,C14	1uF	1	J21	M_ARK120/2
2	C11,C12	22pF	1	L1	47uH
1	C16	100uF	1	L2	10uH
2	D1,D4	D1N4001	1	R1	180R
1	D2	LED	1	R2	4.7k
1	D3	D1N4148	8	R3,R4,R5,R6,R7,R8,R9,R10	1k
1	J2	CONN 2X3	1	U1	7805
2	J3,J4,J11	CONN 2X5	1	U2	MAX232CWE
1	J5	CONN 1X2	1	U3	ATMega128
1	J6	CONN 2X6	1	Y1	16MHz
3	J7,J8,J9	CONN 1X4	1	Y2	32.768kHz

Tabulka A.1: Soupiska součástek pro desku ATmega128

A.2 Deska řízení s ARM7

Počet	Reference	Hodnota	Počet	Reference	Hodnota
3	BP1, BP2, BP3	tlacitko	2	R1, R2	27R
1	C1	33p	3	R6, R8, R14	4k7
44	C2, C5, C7, C8, C10, C11, C12, C13, C14, C15, C16, C17, C18, C19, C20, C23, C27, C28, C29, C31, C32, C33, C34, C35, C36, C37, C38, C39, C40, C42, C43, C44, C46, C50, C51, C52, C55, C56, C57, C59, C62, C65, C66, C69	100nF	32	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11, S12, S13, S14, S15, S16, S17, S18, S19, S20, S21, S22, S23, S24, S25, S26, S27, S28, S29, S30, S31	0R-0603
2	C3, C4	15p	1	R11	120R
2	C21, C22	10pF	2	R12, R13	180R
2	C24, C26	10nF	4	R21, R22, R26, R27	49R9 1%
1	C25	1nF	1	R23	4k99 1%
10	C6, C9, C30, C41, C47, C53, C54, C58, C61, C64	10uF	3	R3, R5, R24	1k5 1%
3	C45, C60, C63	100uF	1	R28	3k3
2	C48, C49	22pF	1	R30	470R
1	C67	1uF	2	R32, R37	22k
1	C68	470pF	1	R38	100R
2	D1, D2	Led Green	4	R38, R40, R42, R44	180R
1	D3	Led Red	4	R39, R41, R43, R45	150R
1	D4	BZX84C3V0L	1	R48	1k
1	J1	USB.B 90	7	R10, R25, R29, R33, R34, R35, R36	10k
1	J2	CONN 2X10	1	U1	DS1818
5	J3, J4, J5, J15, J32	jumper	1	U2	LM2902/SO
1	J6	pinová lišta 7	1	U3	AT91SAM7X256 TQFP100
9	J7, J8, J12, J13, J16, J17, J19, J29, J31	pinová lišta 6	1	U4	AT45DB041B
1	J9	pinová lišta 5X2	1	U5	24LC512
2	J10, J11	pinová lišta 6X2	1	U6	PCA82C250 SO8
1	J14	MKDS 1/3-3.81	1	U7	DS18S20TO92
3	J18, J20, J28	pinová lišta 3	1	U8	KS8721BL
1	J21	Tyco 5-6605758-1	1	U9	TS912
2	J22, J27	pinová lišta 4X2	2	U10, U11	MAX3232
4	J23, J24, J25, J26	pinová lišta 4	1	U12	MAX1169
1	J30	pinová lišta 5	1	U13	TL431
1	L1	4.7 μ H-220 mA CMS	1	U14	MPX4115
2	L2, L3	Feritová perlička	8	U15, U16, U17, U18, U19, U20, U21, U22	H11L1
7	Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7	SI2302BDS	1	Y1	HC49SUB-18.432MHZ
12	RR1, R7, R9, R15, R16, R17, R18, R19, R20, R31, R46, R47	100k	1	Y2	krystal 25MHz smd
1	Z1	jumper 2.54			

Tabulka A.2: Soupiska součástek pro desku ARM7

A.3 Deska převodníku

Počet	Reference	Hodnota	Poznámka
2	C1,C4,C5	100nF	0805
2	C2,C3	1uF	B
1	C6	0.33uF	0805
1	J1	pinová lišta 1x5	
3	J2,J7,J11	pinová lišta 1x3	senzor J1
9	J3,J4,J5,J8,J9,J10,J12,J14,J15	pinová lišta 1x2	senzor J2-J4
1	J6	pinová lišta 1x6	
1	J13	pinová lišta 1x7	
1	U1	MAX1258	
1	U2	7805	TO220

Tabulka A.3: Soupiska součástek pro desku převodníku

A.4 Deska senzorů

Počet	Reference	Hodnota	Poznámka
4	C1,C3,C7,C5	100n	0603
1	C2	Cout	0603
2	C4,C6	22n	0603
1	C8	47n	0603
1	C9	4.7uF	B
2	C10,C11	Cxy	0603
1	J1	pin lišta 1x3	90°
3	J2,J3,J4	pin lišta 1x2	90°
1	L1	22uH	TL43
1	U1	ADXRS150	
1	U2	ADXL203	

Tabulka A.4: Soupiska součástek pro desku senzorů

A.5 Deska WiFi

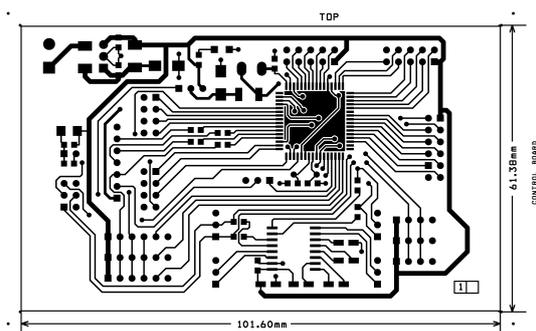
Počet	Reference	Hodnota
1	BP1	B3S
2	C1, C3	10nF
1	C2	4.7 μ F
3	C4, C5, C15	4.7uF
12	C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C13, C14, C16, C17, C18	100nF
1	D1	BZX84C4V7/SOT
1	D2	Led Green
1	J1	TYCO 5-6605758-1
4	J2,J4,J6,J7	pinová lišta 6
1	J3	pinová lišta 7X2
1	J5	pinová lišta 2
1	J8	konektor 2x 5,08mm
1	R1	220R
1	U1	LantronixWiPort
2	U2,U3	MAX3232

Tabulka A.5: Soupiska součástek pro desku WiFi

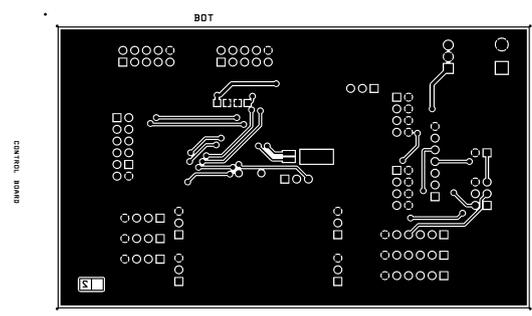
Příloha B

Motivy desek plošných spojů

B.1 Deska řízení s ATmega128

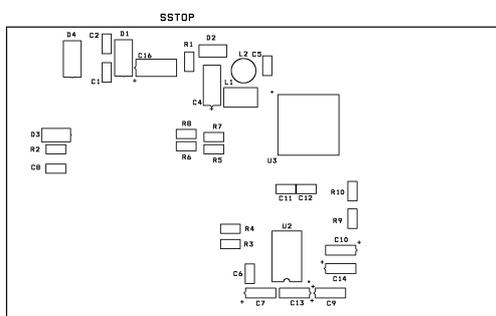


(a) Vrstva TOP

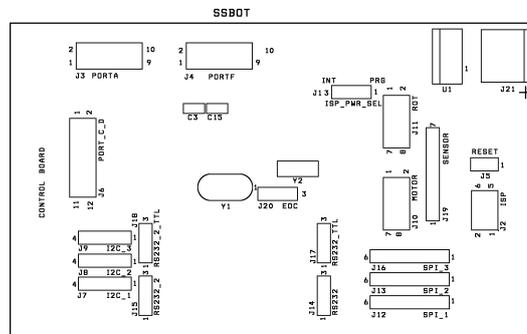


(b) Vrstva BOT

Obrázek B.1: Vnější vrstvy spojů

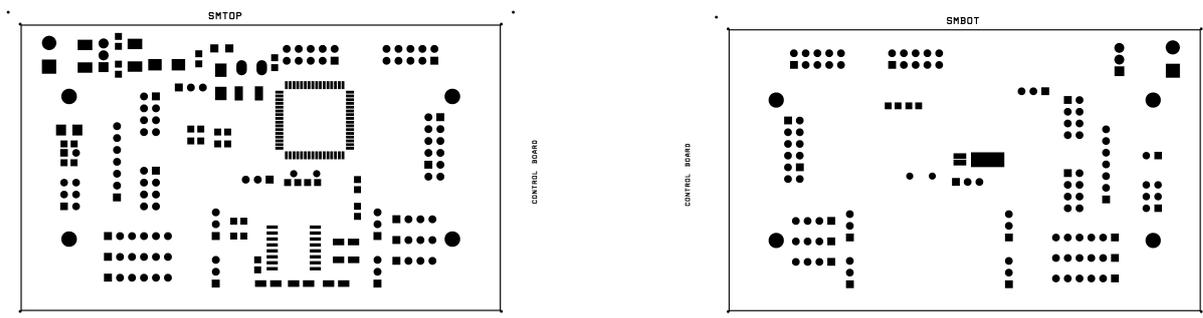


(a) Vrstva SSTOP



(b) Vrstva SSBOT

Obrázek B.2: Vrstvy servisního potisku

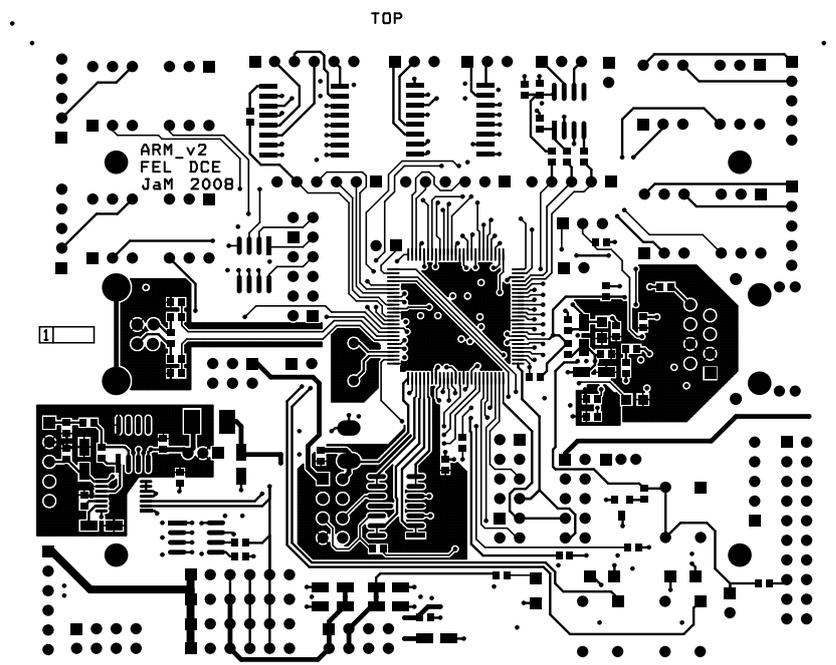


(a) Vrstva SMTOP

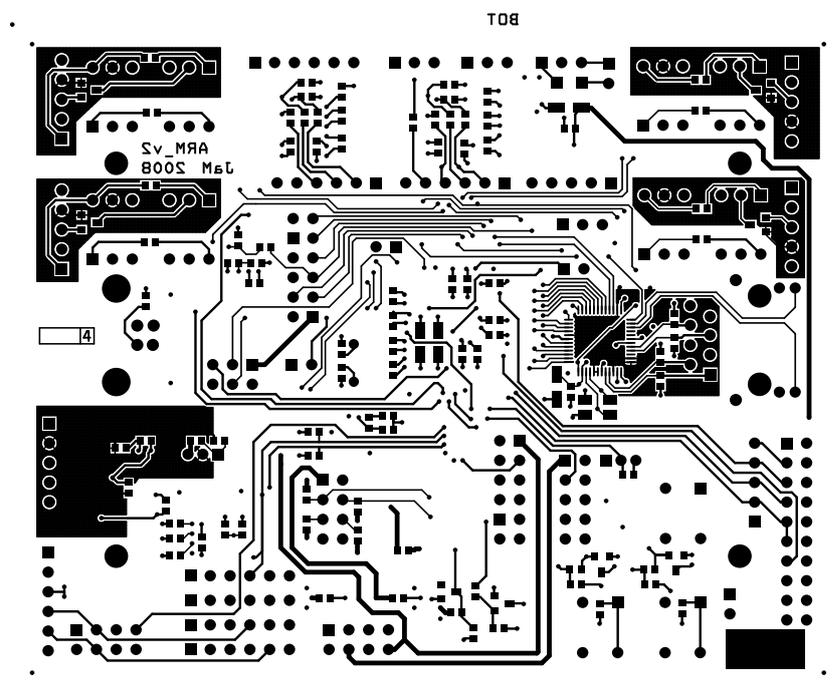
(b) Vrstva SMBOT

Obrázek B.3: Vrstvy nepájivých masek

B.2 Deska řízení s ARM7

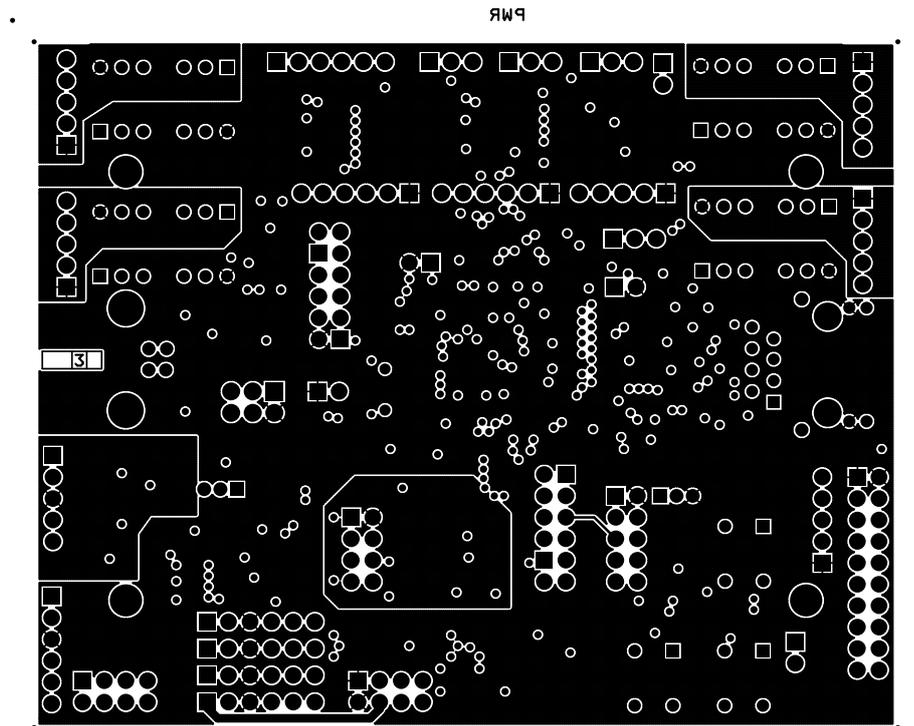


(a) Vrstva TOP

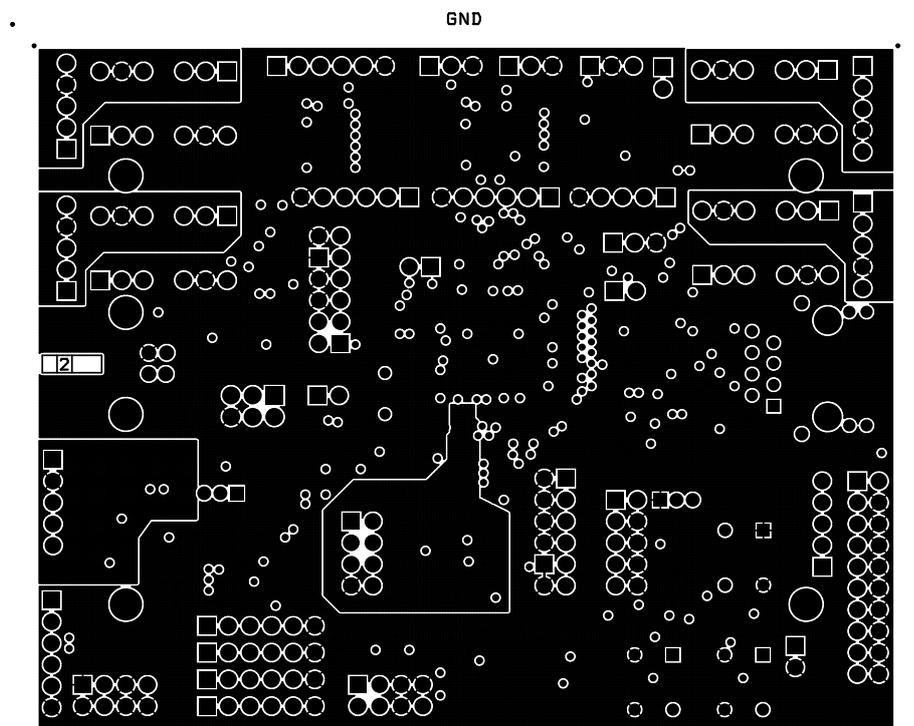


(b) Vrstva BOT

Obrázek B.4: Vnější vrstvy spojů

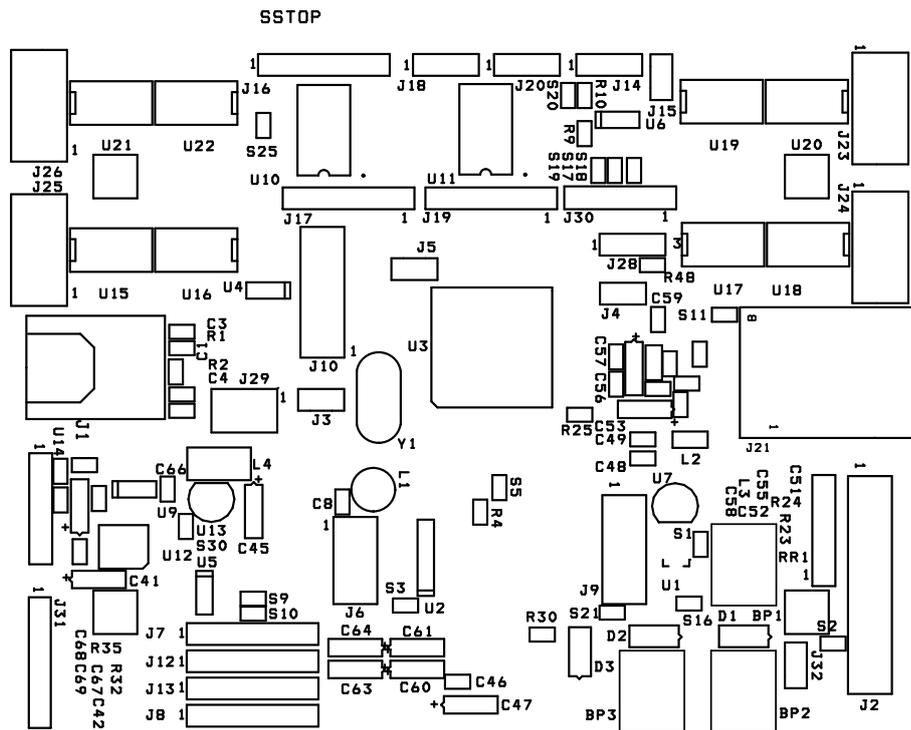


(a) Vrstva PWR

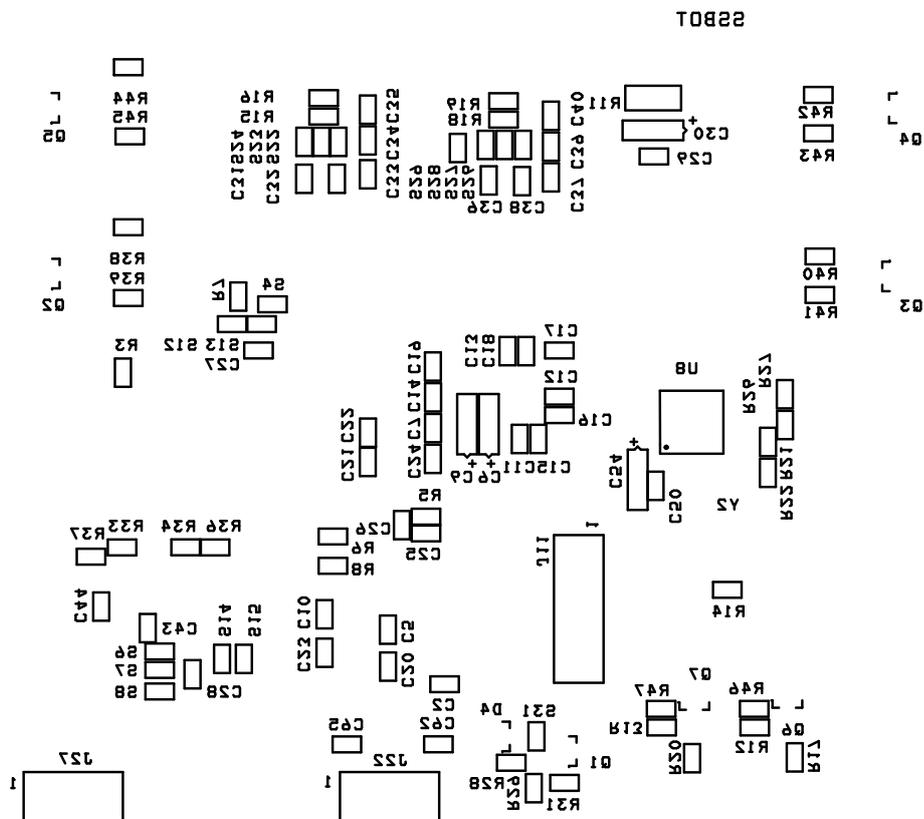


(b) Vrstva GND

Obrázek B.5: Vnitřní vrstvy spojů

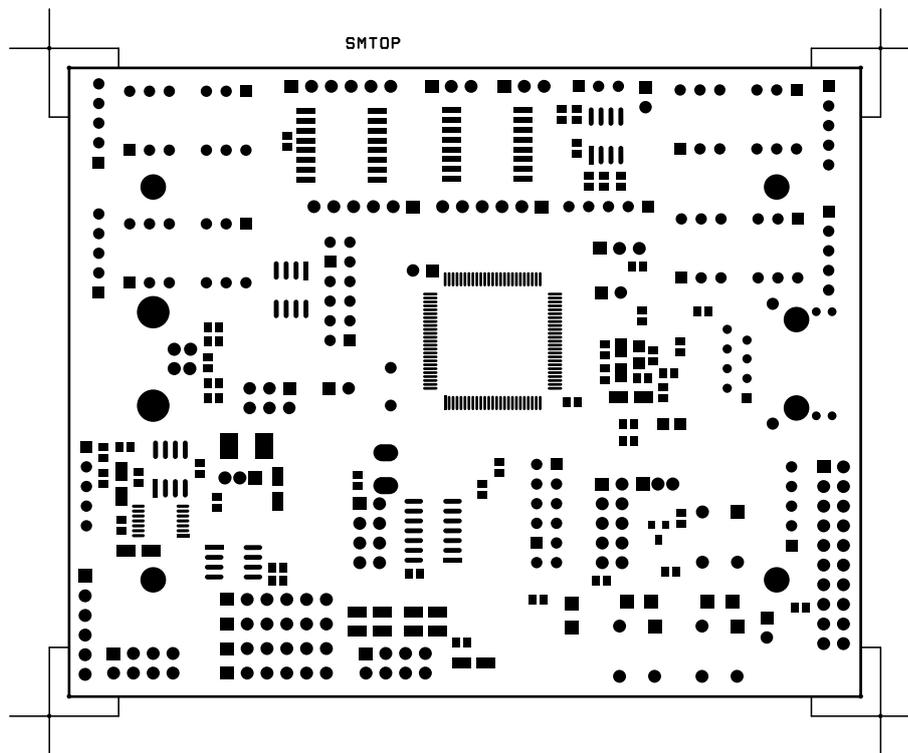


(a) Vrstva SSTOP

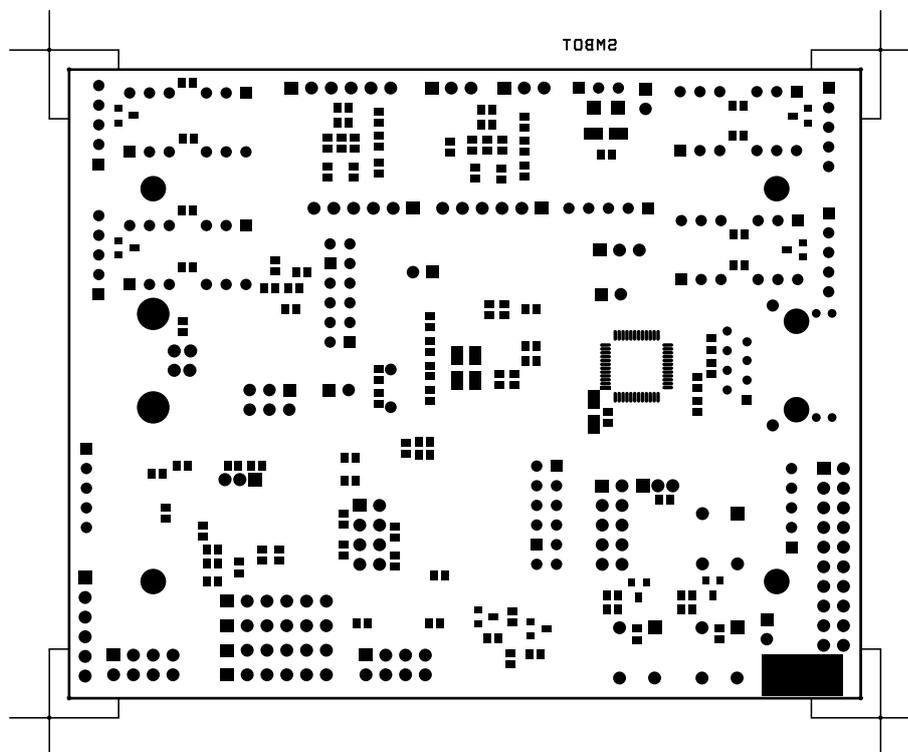


(b) Vrstva SSBOT

Obrázek B.6: Vrstvy servisního potisku



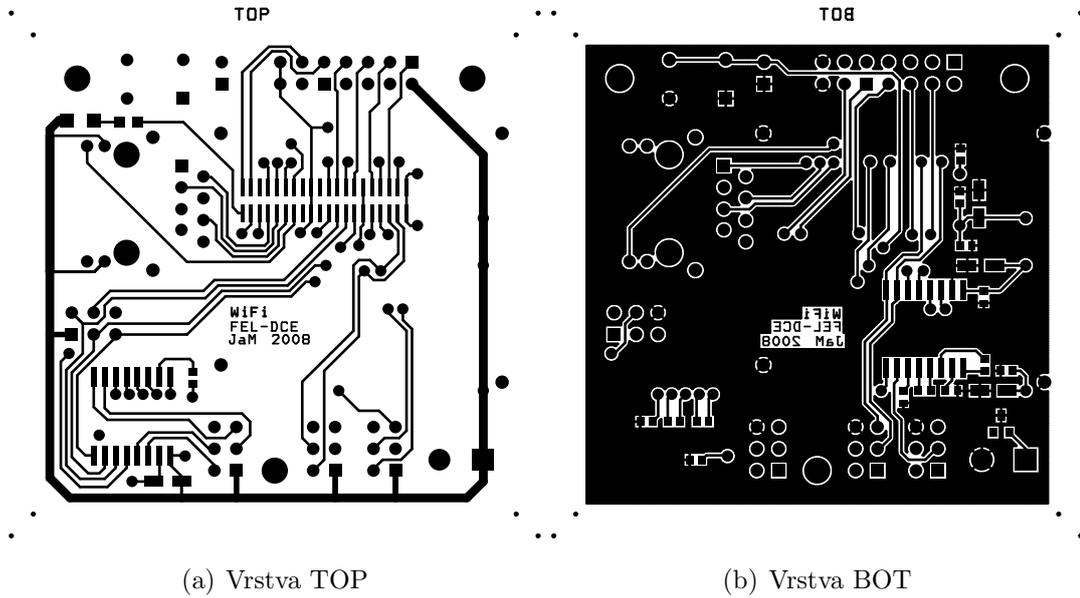
(a) Vrstva SMTOP



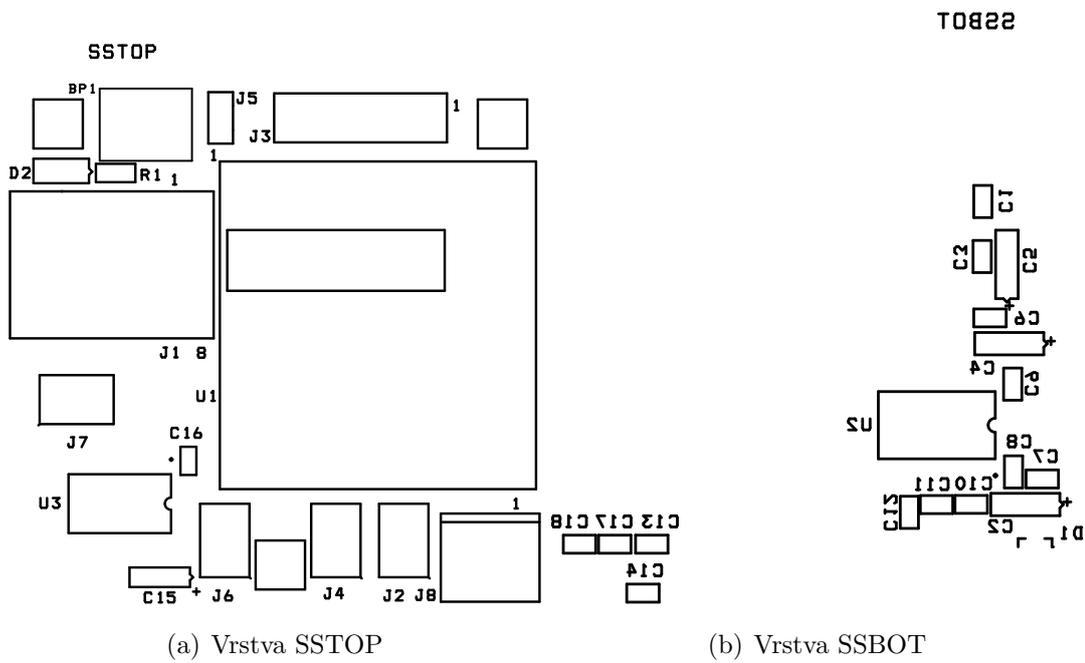
(b) Vrstva SMBOT

Obrázek B.7: Vrstvy nepájivých masek

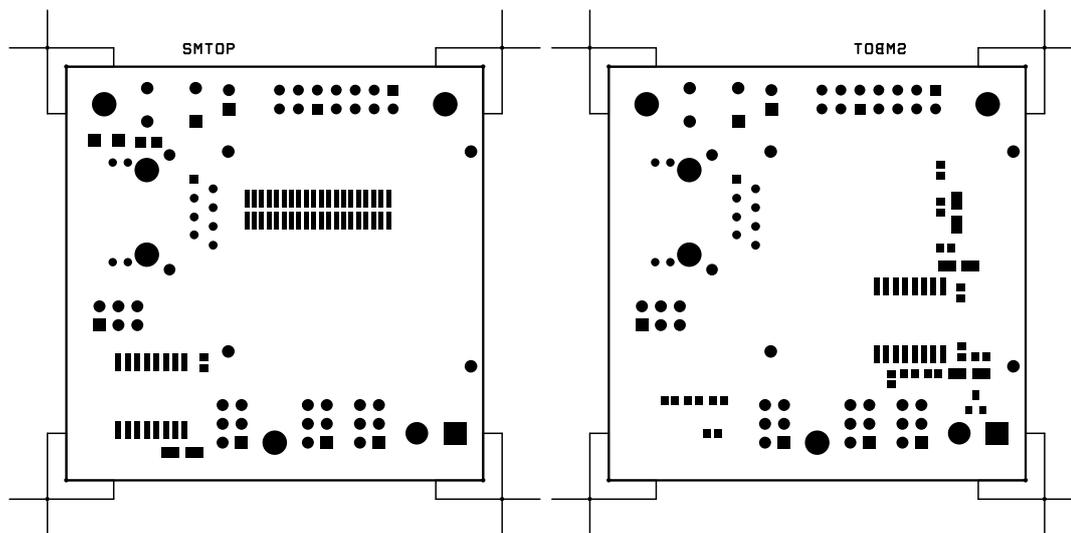
B.3 Deska WiFi



Obrázek B.8: Vnější vrstvy spojů



Obrázek B.9: Vrstvy servisního potisku

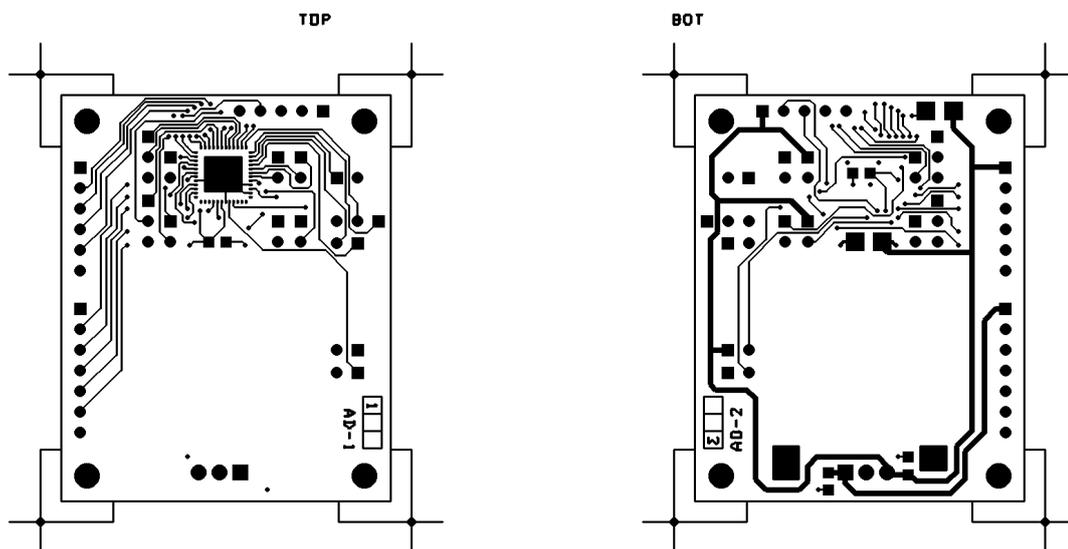


(a) Vrstva SMTOP

(b) Vrstva SMBOT

Obrázek B.10: Vrstvy nepájevých masek

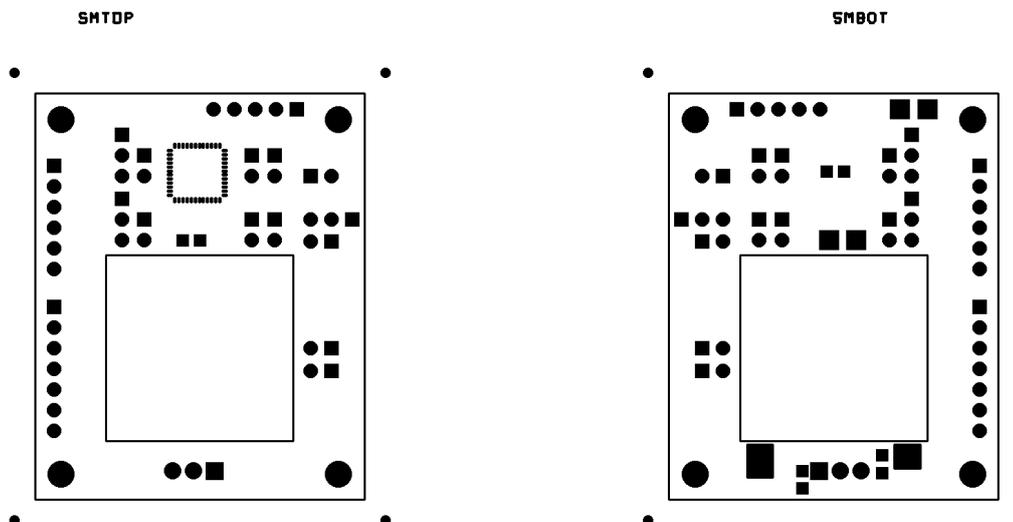
B.4 Deska převodníku



(a) Vrstva TOP

(b) Vrstva BOT

Obrázek B.11: Vnější vrstvy spojů

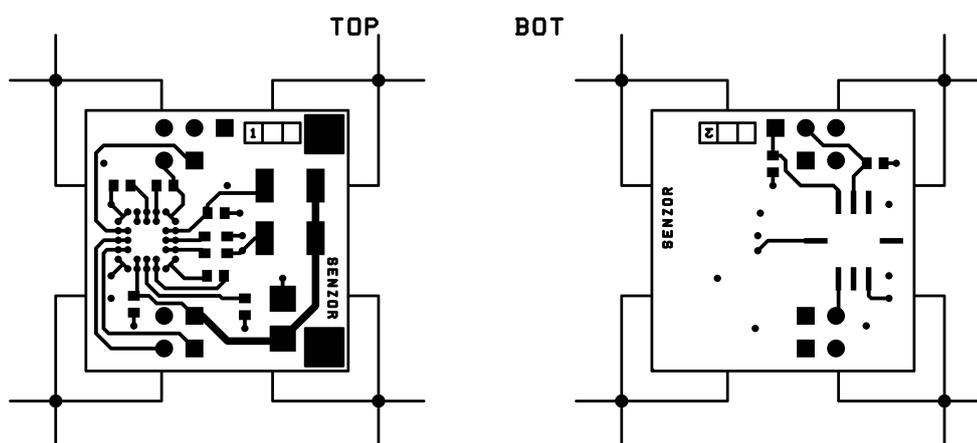


(a) Vrstva SMTOP

(b) Vrstva SMBOT

Obrázek B.14: Vrstvy nepájivých masek

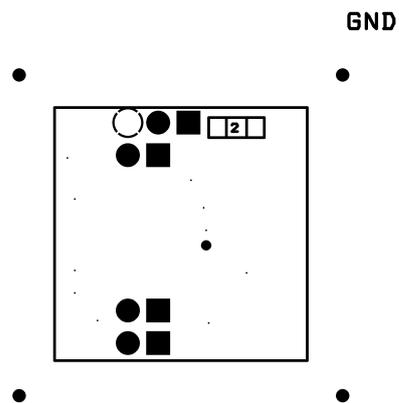
B.5 Deska senzorů



(a) Vrstva TOP

(b) Vrstva BOT

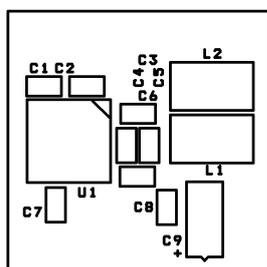
Obrázek B.15: Vnější vrstvy spojů



(a) Vrstva GND

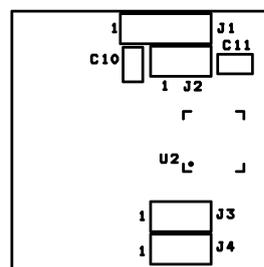
Obrázek B.16: Vnitřní vrstvy spojů

SSTOP



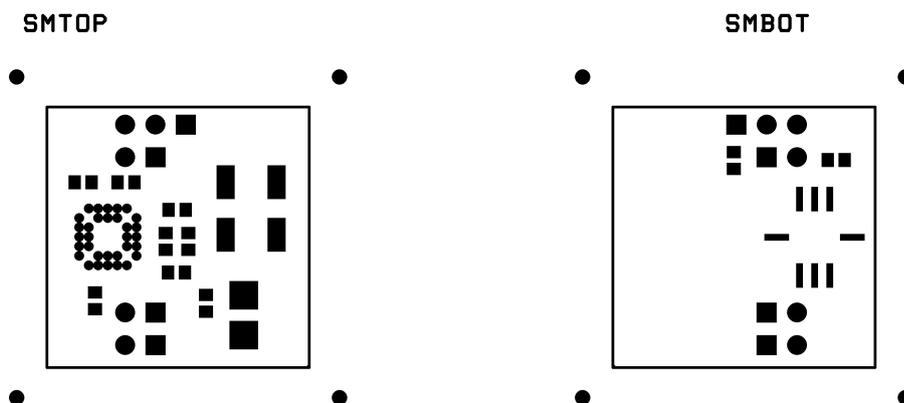
(a) Vrstva SSTOP

SSBOT



(b) Vrstva SSBOT

Obrázek B.17: Vrstvy servisního potisku



(a) Vrstva SMTOP

(b) Vrstva SMBOT

Obrázek B.18: Vrstvy nepájivých masek

Příloha C

Popis konektorů a signálů

C.1 Deska řízení s ATmega128

pin	signál	poznámka
1	PWM1	řízení motoru 1
3	PWM2	řízení motoru 2
5	PWM3	řízení motoru 3
7	PWM4	řízení motoru 4
2,4,6,8	GND	zem

Tabulka C.1: J10 - PWM pro motory

pin	signál	poznámka
1	OTACKY1	otáčky motoru 1
3	OTACKY2	otáčky motoru 2
5	OTACKY3	otáčky motoru 3
7	OTACKY4	otáčky motoru 4
2,4,6,8	GND	zem

Tabulka C.2: J11 - Otáčky motorů

pin	signál	poznámka
1	Vin	napájení modulu senzorů
2	EOC	konec převodu MAX
3	MISO	SPI vstup dat
4	SCK	SPI hodiny
5	MOSI	SPI výstup dat
6	CS1	výběr zařízení
7	GND	zem

Tabulka C.3: J19 - Rozhraní pro AD převodník

pin	signál	poznámka
1	VCC	napájení +5V
2	MISO	SPI vstup dat
3	MOSI	SPI výstup dat
4	SCK	SPI hodiny
5	CS2,CS3,CS4	výběr zařízení
6	GND	zem

Tabulka C.4: J12,J13,J16 - SPI rozhraní

pin	signál	poznámka
1	EOC2	vstup pro pooling EOC
2	EOC	konec převodu MAX
3	SDA/EOC	vstup ext. přerušování

Tabulka C.5: J20 - Výběr vstupu pro signál konce převodu

pin	signál	poznámka
1	TxD	vysílání
2	RxD	příjem
3	GND	zem

Tabulka C.6: J14,J15 - Rozhraní RS232 1 a 2

pin	signál	poznámka
1	TxD	vysílání
2	RxD	příjem
3	GND	zem

Tabulka C.7: J17,J18 - Seriové rozhraní úroveň TTL

pin	signál	poznámka
1	VCC	+5V pro ext. zařízení
2	SDA/EOC	data
3	SCL	hodiny
4	GND	zem

Tabulka C.8: J7,J8,J9 - Rozhraní I2C

pin	signál	poznámka
1	VCC	+5V pro ext. zařízení
2	PF7	PORTF bit 7 (AD7)
3	PF6	PORTF bit 6 (AD6)
4	PF5	PORTF bit 5 (AD5)
5	PF4	PORTF bit 4 (AD4)
6	PF3	PORTF bit 3 (AD3)
7	PF2	PORTF bit 2 (AD2)
8	PF1	PORTF bit 1 (AD1)
9	PF0	PORTF bit 0 (AD0)
10	GND	zem

Tabulka C.9: J4 - V/V brána F

pin	signál	poznámka
1	VCC	+5V pro ext. zařízení
2	PA7	PORTA bit 7
3	PA6	PORTA bit 6
4	PA5	PORTA bit 5
5	PA4	PORTA bit 4
6	PA3	PORTA bit 3
7	PA2	PORTA bit 2
8	PA1	PORTA bit 1
9	PA0	PORTA bit 0
10	GND	zem

Tabulka C.10: J3 - V/V brána A

pin	signál	poznámka
1	VCC	+5V pro ext. zařízení
2	PE2	PORTE bit 2
3	PB4	PORTB bit 4
4	PC7	PORTC bit 7
5	PC6	PORTC bit 6
6	PC5	PORTC bit 5
7	PC4	PORTC bit 4
8	PC3	PORTC bit 3
9	PC2	PORTC bit 2
10	PC1	PORTC bit 1
11	PC0	PORTC bit 0
12	GND	zem

Tabulka C.11: J6 - V/V brána C + PB4,PE2

pin	signál	poznámka
1	TXD0/PDO	výstup dat
2	VTG	napájení programátor
3	SCK	hodiny
4	RXD0/PDI	vstup dat
5	RESET	reset procesoru
6	GND	zem

Tabulka C.12: J2 - Programovací rozhraní ISP

pin	signál	poznámka
1	VCC	externí napájení
2	VCC_CPU	napájení mikroprocesoru
3	VTG	napájení programátoru

Tabulka C.13: J1 - Výběr napájení

pin	signál	poznámka
1	RESET	reset mikroprocesoru
2	GND	zem

Tabulka C.14: J5 - Tlačítko reset

C.2 Deska převodníku

pin	signál	poznámka
1	X	zrychlení X
2	Y	zrychlení Y
3	GND	zem

Tabulka C.15: J2,J7,J11 - propojení s senzorem

pin	signál	poznámka
1	TEMP	teplota gyroskopu
2	R	úhlová rychlost

Tabulka C.16: J5,J10,J15 - propojení s senzorem

pin	signál	poznámka
1	VCC	Napájení +5V
2	ST3	test akcelerometru

Tabulka C.17: J3,J8,J12 - propojení s senzorem

pin	signál	poznámka
1	ST1	test gyroskopu 1
2	ST2	test gyroskopu 2

Tabulka C.18: J4,J9,J14 - propojení s senzorem

pin	signál	poznámka
1	VCC	napájení +5V
2	AIN12	analogový vstup 12
3	AIN13	analogový vstup 13
4	AIN14/REF2	analogový vstup 14/reference 2
5	AIN15/CNVST	analogový vstup 15/start převodu
6	GND	zem

Tabulka C.19: J6 - pomocné analogové vstupy

pin	signál	poznámka
1	VCC	napájení +5V
2	GPIOC0	TTL vstup/výstup
3	GPIOB0	TTL vstup/výstup
4	GPIOA0	TTL vstup/výstup
5	GND	zem

Tabulka C.20: J1 - TTL vstupy/výstupy

pin	signál	poznámka
1	Vin	napájení modulu senzorů
2	EOC	konec převodu MAX
3	MISO	SPI výstup dat
4	SCK	SPI hodiny
5	MOSI	SPI vstup dat
6	CS1	výběr zařízení
7	GND	zem

Tabulka C.21: J13 - Rozhraní pro řídicí desku

pin	signál	poznámka
1	ref1	vstup externí reference napětí
2	GND	zem

Tabulka C.22: J16 - Externí reference

C.3 Deska senzorů

pin	signál	poznámka
1	X	zrychlení X
2	Y	zrychlení Y
3	GND	zem

Tabulka C.23: J1 - propojení s převodníkem

pin	signál	poznámka
1	TEMP	teplota gyroskopu
2	R	úhlová rychlost

Tabulka C.24: J2 - propojení s převodníkem

pin	signál	poznámka
1	VCC	Napájení +5V
2	ST3	test akcelerometru

Tabulka C.25: J3 - propojení s převodníkem

pin	signál	poznámka
1	ST1	test gyroskopu 1
2	ST2	test gyroskopu 2

Tabulka C.26: J4 - propojení s převodníkem

C.4 Deska řízení s ARM7

pin	signál	poznámka
1	+5V	napájení USB
2	DDM	data -
3	DDP	data +
4	GND	zem

Tabulka C.27: J1 - Rozhraní USB 2.0

pin	signál	poznámka
1, 2	+3,3V	napájení JTAG
4,6,8,10,12,14,16,18,20	GND	zem
3	+3,3V	přes 100k
5	TDI	linka JTAG
7	TMS	linka JTAG
9	TCK	linka JTAG
11	TCK	linka JTAG
13	TDO	linka JTAG
15	RST	reset procesoru
17	NC	nezapojeno
19	NC	nezapojeno

Tabulka C.28: J2 - Rozhraní JTAG

pin	signál	poznámka
1	+3,3V	napájení 3,3V
2	ERASE	pro zkratovací propojku

Tabulka C.29: J3 - Volba ERASE procesoru ARM

pin	signál	poznámka
1	+3,3V	napájení 3,3V
2	TST	pro zkratovací propojku

Tabulka C.30: J4 - Volba TST procesoru ARM

pin	signál	poznámka
1	+3,3V	napájení 3,3V
2	JTAGSEL	pro zkratovací propojku

Tabulka C.31: J5 - Volba JTAGSEL procesoru ARM

pin	signál	poznámka
1	+5V	napájení 5V
2	+3,3V	napájení 3,3V
3	AD7	vstup AD7
4	AD6	vstup AD6
5	AD5	vstup AD5
6	AD4	vstup AD4
7	GND	zem

Tabulka C.32: J6 - Vstupy AD převodníku

pin	signál	poznámka
1	+5V	napájení 5V
2	NC	nezapojeno
3	+3,3V	Napájení 3,3V
4	SDA	I2C data
5	SCL	I2C clock
6	GND	zem

Tabulka C.33: J7, J8, J12, J13, J31 - Rozhraní I2C

pin	signál	poznámka
1	+5V	napájení 5V
2	+3,3V	napájení 3,3V
4,6,8,10	GND	zem
3	CS1	signál CS1 SPI0
5	MISO	signál MISO SPI0
7	MOSI	signál MOSI SPI0
9	SCLK	signál SCLK SPI0

Tabulka C.34: J9 - Rozhraní SPI0

pin	signál	poznámka
1	+5V	napájení 5V
2,	+3,3V	
4,	CS1	signál CS1 SPI1
6,8,10,12	GND	zem
3	CS2	signál CS2 SPI1
5	CS0	signál CS0 SPI1
7	MISO	signál MISO SPI1
9	MOSI	signál MOSI SPI1
11	SCLK	signál SCLK SPI1

Tabulka C.35: J10 - RozhraníSPI1

pin	signál	poznámka
1	+7,5V	oddělené napájení inerce
2,4,6,8,10,12	GND	zem
3	EOC	konec převodu inerce
5	MISO	signál MISO SPI0
7	SCLK	signál SCLK SPI0
9	MOSI	signál MOSI SPI0
11	CS	signál CS0 SPI0

Tabulka C.36: J11 - Rozhraní pro IMU (SPI0)

pin	signál	poznámka
1	CANH	signál CANH
2	GND	zem
3	CANL	signál CANL

Tabulka C.37: J14 - Rozhraní CAN

pin	signál	poznámka
1	CANH	CANH 120R
2	CANL	CANL

Tabulka C.38: J15 - Terminátor rozhraní CAN

pin	signál	poznámka
1	NC	nezapojeno
2	RXD	data in
3	RTS	ready to send
4	TXD	data out
5	CTS	clear to send
6	GND	zem

Tabulka C.39: J16 - Rozhraní RS232 0

pin	signál	poznámka
1	NC	nezapojeno
2	RXD	data in
3	RTS	ready to send
4	TXD	data out
5	CTS	clear to send
6	GND	zem

Tabulka C.40: J17 - USART 0

pin	signál	poznámka
1	TXD	data out
2	RXD	data in
3	GND	zem

Tabulka C.41: J18 - Rozhraní RS232 1

pin	signál	poznámka
1	DTXD	debugdata out
2	DRXD	debugdata in
3	GND	zem

Tabulka C.42: J20 - Rozhraní DEBUG RS232

pin	signál	poznámka
1	+3,3V	napájení 3,3V
2	TXD	data out
3	DTXD	debugdata out
4	RXD	data in
5	DRXD	debugdata in
6	GND	zem

Tabulka C.43: J20 - DEBUG + USART 1

RJ45	Ethernet
------	----------

Tabulka C.44: J21 - Ethernet

pin	signál	poznámka
1, 2	+3,3V	napájení 3,3V
3, 4	+5V	napájení 5V
5, 6, 7	GND	zem
8	+7,5V	napájení 7,5V

Tabulka C.45: J22 - Napájení

pin	signál	poznámka
1	VCC2	oddělené napájení ze střídače +5V
2	PWM OUT	výstup PWM
3	REV IN	vstup otáček
4	GND2	oddělená zem střídače

Tabulka C.46: J23, J24, J25, J26 - rozhraní motorů

pin	signál	poznámka
1, 2, 5, 6, 8	GND	zem
3	SDA	I2C data
4	SCL	I2C clock
7	SHUDDOWN	vypnutí motorů

Tabulka C.47: J27 - Napájení 2

pin	signál	poznámka
1	PB18	ovládání z procesoru
2	PD	vstup signálu vypnutí
3	GND	zem

Tabulka C.48: J28 - Odpojení Ethernetu

pin	signál	poznámka
1	+5V	napájení 5V
2,	+3,3V	napájení 3,3V
3,	PB25	pomocný V/V
4	PA7	pomocný V/V
5	PA8	pomocný V/V
6	GND	zem

Tabulka C.49: J29 - Pomocné linky

pin	signál	poznámka
1,	+3,3V	napájení 3,3V
2,	PA19	pomocný V/V
3,	PA20	pomocný V/V
4	PA2	pomocný V/V
5	GND	zem

Tabulka C.50: J30 - Pomocné linky při nezapojeném CANu

pin	signál	poznámka
1	RESET	reset procesoru
2	GND	zem

Tabulka C.51: J32 - vstup resetu

C.5 Deska WiFi

RJ45	Ethernet
------	----------

Tabulka C.52: J21 - Ethernet

pin	signál	poznámka
1	+3,3V	napájení 3,3V
2	RTS	ready to send
3	TXD	data out
4	RXD	data in
5	CTS	clear to send
6	GND	zem

Tabulka C.53: J2 - RS232 0, J6 - RS232 1

pin	signál	poznámka
1	+3,3V	napájení 3,3V
2	RTS	ready to send
3	TXD	data out
4	RXD	data in
5	CTS	clear to send
6	GND	zem

Tabulka C.54: J4 - USART 0, J7 - USART 1

pin	signál	poznámka
1	USER2	uživatelský V/V
2	+3,3V	napájení 3,3V
3	USER8	uživatelský V/V 8
4	USER3	uživatelský V/V 3
5	USER0	uživatelský V/V 0
6	USER10	uživatelský V/V 10
7	USER9	uživatelský V/V 9
8	USER4	uživatelský V/V 4
9	USER5	uživatelský V/V 5
10	USER1	uživatelský V/V 1
11	USER7	uživatelský V/V 7
12	USER6	uživatelský V/V 6
13,14	GND	zem

Tabulka C.55: J3 - Uživatelský port

Příloha D

Struktura přiloženého CD

Na CD jsou umístěny originální i upravené zdrojové kódy programů ve složce Software dle příslušné platformy. Ve složce Hardware jsou navržena řešení všech částí palubní elektroniky. Katalogové listy a dokumentace výrobců je umístěna ve složce Datasheet a složka DP obsahuje text této diplomové práce.

- Software
 - ATmega128
 - ARM7
 - PC
- Hardware
- Datasheet
- DP

Seznam obrázků

1.1	De Bothezat Helicopter	3
1.2	Orientace stroje	4
1.3	Základní prvky pohonu	4
3.1	Blokové schéma senzorů	8
3.2	Princip funkce MEMS gyroskopu	10
3.3	Schéma modulu inerciálních senzorů	12
3.4	Deska senzorů	12
3.5	Schéma zapojení převodníku	13
3.6	Deska převodníku	14
3.7	Celá sestava modulu inerciálních měření	15
3.8	Tlakový senzor MPX4115a	16
3.9	Zapojení výškoměru	16
3.10	Magnetický kompas	17
3.11	Ultrazvukový dálkoměr	18
3.12	Laserový dálkoměr Hokuyo URG-04LX	19
3.13	GPS modul iTrax300	20
4.1	Orientace a výstup akcelerometru	22
4.2	Orientace a výstup gyroskopu	22
4.3	Změřené hodnoty v klidu	23
4.4	Změřené hodnoty v pohybu (náklon kolem osy Y)	23
4.5	Změřené hodnoty s vibracemi motoru	26
4.6	Vylepšené uložení inerciální jednotky	26
4.7	Vliv otáček motorů na standardní odchylku	27
4.8	Rozklad měřených zrychlení při náklonu ve dvou osách	28
4.9	Srovnání vlivu rušení na hodnoty úhlů	29

4.10	Model gyroskopu pro Kalmanův filtr	30
4.11	Schéma Kalmanova filtru	31
4.12	Obsah bloku Kalmanova filtru	32
4.13	Zapojení a inicializace bloku Kalmanova filtru	33
4.14	Akcelerometry zrychlení	34
4.15	Gyroskopy - úhlová rychlost	34
4.16	Odhadované stavy Kalmanova filtru	35
4.17	Srovnání vypočtených úhlů	35
5.1	Řídicí deska s ATmega128	37
5.2	Schéma zapojení desky s ATmega128	38
5.3	Blokové schéma elektroniky	39
5.4	Struktura a periferie procesoru AT91SAM7X256	41
5.5	Vývojová deska Olimex SAM7-EX256	42
5.6	Bloky řídicí desky elektroniky platformy ARM7	43
5.7	Filtrace a sledování napájení	44
5.8	Schéma zapojení CPU	45
5.9	Zapojení dalších periferií	46
5.10	Zapojení fyzické vrstvy ethernetu	47
5.11	Zapojení střídačů	48
5.12	Optické oddělení	48
5.13	Řídicí deska na platformě ARM7	49
5.14	WiFi modul Lantronix WiPort	50
5.15	Schéma pro WiFi modul	51
5.16	Deska pro WiFi modul	51
6.1	Blokové schéma struktury programu	55
6.2	Blokové schéma hlavního vlákna	56
6.3	Zjednodušený stavový automat pro obsluhu TCP spojení	57
6.4	Vývojové prostředí Eclipse CDT	58
7.1	Testovací program	60
7.2	Uživatelské rozhraní pozemní stanice	60
8.1	Vyrobené desky plošných spojů pro řídicí počítač s ARM7, WiFi modul a inerciální jednotku	61

8.2	Moderní pájecí přípravky	63
8.3	Horkovzdušná a klasická pájecí stanice	63
B.1	Vnější vrstvy spojů	V
B.2	Vrstvy servisního potisku	V
B.3	Vrstvy nepájivých masek	VI
B.4	Vnější vrstvy spojů	VII
B.5	Vnitřní vrstvy spojů	VIII
B.6	Vrstvy servisního potisku	IX
B.7	Vrstvy nepájivých masek	X
B.8	Vnější vrstvy spojů	XI
B.9	Vrstvy servisního potisku	XI
B.10	Vrstvy nepájivých masek	XII
B.11	Vnější vrstvy spojů	XII
B.12	Vnitřní vrstvy spojů	XIII
B.13	Vrstvy servisního potisku	XIII
B.14	Vrstvy nepájivých masek	XIV
B.15	Vnější vrstvy spojů	XIV
B.16	Vnitřní vrstvy spojů	XV
B.17	Vrstvy servisního potisku	XV
B.18	Vrstvy nepájivých masek	XVI

Seznam tabulek

4.1	Akcelerometry - klidové hodnoty	24
4.2	Gyroskopy - klidové hodnoty	24
4.3	Akcelerometry - standardní odchylka σ	25
4.4	Gyroskopy - standardní odchylka σ	25
4.5	Vliv otáček na standardní odchylku σ	25
A.1	Soupiska součástek pro desku ATmega128	I
A.2	Soupiska součástek pro desku ARM7	II
A.3	Soupiska součástek pro desku převodníku	III
A.4	Soupiska součástek pro desku senzorů	III
A.5	Soupiska součástek pro desku WiFi	IV
C.1	J10 - PWM pro motory	XVII
C.2	J11 - Otáčky motorů	XVII
C.3	J19 - Rozhraní pro AD převodník	XVIII
C.4	J12,J13,J16 - SPI rozhraní	XVIII
C.5	J20 - Výběr vstupu pro signál konce převodu	XVIII
C.6	J14,J15 - Rozhraní RS232 1 a 2	XVIII
C.7	J17,J18 - Seriové rozhraní úroveň TTL	XIX
C.8	J7,J8,J9 - Rozhraní I2C	XIX
C.9	J4 - V/V brána F	XIX
C.10	J3 - V/V brána A	XX
C.11	J6 - V/V brána C + PB4,PE2	XX
C.12	J2 - Programovací rozhraní ISP	XXI
C.13	J1 - Výběr napájení	XXI
C.14	J5 - Tlačítko reset	XXI
C.15	J2,J7,J11 - propojení s senzorem	XXI

C.16 J5,J10,J15 - propojení s senzorem	XXII
C.17 J3,J8,J12 - propojení s senzorem	XXII
C.18 J4,J9,J14 - propojení s senzorem	XXII
C.19 J6 - pomocné analogové vstupy	XXII
C.20 J1 - TTL vstupy/výstupy	XXII
C.21 J13 - Rozhraní pro řídicí desku	XXIII
C.22 J16 - Externí reference	XXIII
C.23 J1 - propojení s převodníkem	XXIII
C.24 J2 - propojení s převodníkem	XXIII
C.25 J3 - propojení s převodníkem	XXIV
C.26 J4 - propojení s převodníkem	XXIV
C.27 J1 - Rozhraní USB 2.0	XXIV
C.28 J2 - Rozhraní JTAG	XXV
C.29 J3 - Volba ERASE procesoru ARM	XXV
C.30 J4 - Volba TST procesoru ARM	XXV
C.31 J5 - Volba JTAGSEL procesoru ARM	XXV
C.32 J6 - Vstupy AD převodníku	XXVI
C.33 J7, J8, J12, J13, J31 - Rozhraní I2C	XXVI
C.34 J9 - Rozhraní SPI0	XXVI
C.35 J10 - RozhraníSPI1	XXVII
C.36 J11 - Rozhraní pro IMU (SPI0)	XXVII
C.37 J14 - Rozhraní CAN	XXVII
C.38 J15 - Terminátor rozhraní CAN	XXVIII
C.39 J16 - Rozhraní RS232 0	XXVIII
C.40 J17 - USART 0	XXVIII
C.41 J18 - Rozhraní RS232 1	XXVIII
C.42 J20 - Rozhraní DEBUG RS232	XXIX
C.43 J20 - DEBUG + USART 1	XXIX
C.44 J21 - Ethernet	XXIX
C.45 J22 - Napájení	XXIX
C.46 J23, J24, J25, J26 - rozhraní motorů	XXIX
C.47 J27 - Napájení 2	XXX
C.48 J28 - Odpojení Ethernetu	XXX
C.49 J29 - Pomocné linky	XXX
C.50 J30 - Pomocné linky při nezapojeném CANu	XXX

C.51 J32 - vstup resetu	XXXI
C.52 J21 - Ethernet	XXXI
C.53 J2 - RS232 0, J6 - RS232 1	XXXI
C.54 J4 - USART 0, J7 - USART 1	XXXI
C.55 J3 - Uživatelský port	XXXII

Literatura

- [1] Atmel. online. www.atmel.com.
- [2] Analog Devices. online. www.analog.com.
- [3] FreeRTOS. online. <http://www.freertos.org/>.
- [4] Maxim IC. online. www.maximic.com.
- [5] Lantronix. online. <http://www.lantronix.com>.
- [6] NutOS. online. <http://www.ethernut.de/en/software/index.html>.
- [7] HAVLENA, V. *Moderní teorie řízení - doplňkové skriptum*. Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [8] HAVLENA, V. *Odhadování a filtrace (doplňkové skriptum)*. ČVUT, 2002.
- [9] HEINRICH, P. *Experimentální létající stroj - základní řízení*. Diplomová práce, ČVUT, 2008.
- [10] HEINRICH, P.; MAREČEK, J. Závěrečná zpráva za i. tříměsíční etapu v projektu cepot. Technical report, ČVUT, 2006.
- [11] HEINRICH, P.; MAREČEK, J. Závěrečná zpráva za ii. tříměsíční etapu v projektu cepot. Technical report, ČVUT, 2006.
- [12] HEINRICH, P.; MAREČEK, J. Závěrečná zpráva za iii. tříměsíční etapu v projektu cepot. Technical report, ČVUT, 2007.
- [13] HEINRICH, P.; MAREČEK, J. Závěrečná zpráva za iv. tříměsíční etapu v projektu cepot. Technical report, ČVUT, 2007.
- [14] HEINRICH, P.; MAREČEK, J. Závěrečná zpráva za v. tříměsíční etapu v projektu cepot. Technical report, ČVUT, 2008.

- [15] HEROUT, P. *Učebnice jazyka C, III. upravené vydání*. KOPP, 2001.
- [16] MÚLLER, M. *Vzducholod' - orientace v prostoru*. Diplomová práce, ČVUT, 2008.
- [17] ROUBAL, J.; PEKAŘ, J.; PACHNER, D.; HAVLENA V. *Moderní teorie řízení - cvičení*. ČVUT, 2005.
- [18] ZÁHLAVA, V. *OrCAD 10*. Grada Publishing, 2004.
- [19] ZÁHLAVA, V. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. ČVUT, 2005.
- [20] uIP TCP/IP stack. online. <http://www.sics.se/adam/uip/>.