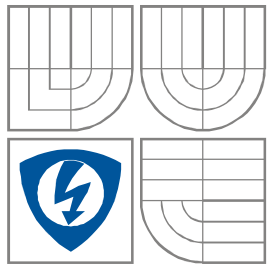




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

UNIVERZÁLNÍ SENZOROVÁ TESTOVACÍ PLATFORMA

VERSATILE SENSOR-BASED EXPERIMENTAL PLATFORM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Maximilián Tydor

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

BRNO, 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Maximilián Tydor
Ročník: 2

ID: 140264
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Univerzální senzorová testovací platforma

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte systémový návrh inerciální senzorové testovací platformy popisující architekturu řešení a jednotlivé komponenty systému. Platforma musí zajistit komunikaci s instalovanými senzory (gyroskopy, akcelerometry, magnetometry a tlaková čidla) a logování dat do souborů na PC, podporu minimálně tří na sebe navzájem kolmých senzorových karet a podporu všech běžných senzorových sběrnic (SPI, I2C a UART). Navrhněte schéma platformy, mechanické řešení a desky plošných spojů. Osadte senzorovou platformu elektronickými komponentami a proveďte základní oživení. Sestavte firmware řídicího kontroléru. Proveďte komplexní testování systému a výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

[2] GREWAL, M. S., WEILL, L. R., ANDREWS, A. P. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration. Danvers: John Wiley & Sons, 2004.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 21.5.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou testování polovodičových inerciálních senzorů, zejména gyroskopů a akcelerometrů, ale i dalších senzorů jako jsou např. magnetometry, inklinometry apod. pro potřeby navigace v leteckém průmyslu, kde jsou na všechny systémy kladeny přísné požadavky. Cílem práce je vytvořit modulární testovací platformu pro testování různých senzorů, v různých kombinacích a v různých podmínkách. Vývoj této platformy začíná od „zelené louky“ a zabývá se mechanickým provedením, elektronikou – hardwarem i řídicím algoritmem – softwarem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Akcelerometr, ARM, ATSAM4, gyroskop, inerciální, inklinometr, letectví, magnetometr, MEMS, navigace, rotační stůl, senzor, teplotní komora, test, tlakoměr, vibrační stůl.

ABSTRACT

This document deals with issues of testing semiconductor inertial sensors like gyroscopes and accelerometers, but also other sensors like magnetometers, inclinometers and others for aviation navigation purposes where strict requirements cover every system. The goal of this thesis is to create modular test platform for testing wide variety of sensors in different combinations under variable circumstances. The development covers mechanical design, electrical design – hardware and also control algorithm – software.

KEYWORDS

Accelerometer, ARM, ATSAM4, aviation, barometer, gyroscope, inclinometer, inertial, magnetometer, MEMS, navigation, rotary table, sensor, temperature chamber, test, vibration table.

TYDOR, M. *Univerzální senzorová testovací platforma*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 57 s., 0 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Univerzální senzorová testovací platforma jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Prvně chci poděkovat firmě Honeywell International spol. s.r.o. za nabídnutí možnosti zpracovat toto téma jako svoji diplomovou práci. Velké díky patří mému konzultantovi Ing. Markovi Fojtchovi z výše jmenované firmy za poskytnutí potřebných materiálů a organizační i odborné podpory po celou dobu projektu. Stejný dík patří i vedoucímu práce doc. Ing. Jiřímu Šebestovi, Ph.D. za odbornou, metodickou i didaktickou podporu.

OBSAH

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Senzory	2
1.1 Technologie MEMS.....	3
1.2 Akcelerometry	5
1.3 Gyroskopy.....	6
1.4 Inklinometry.....	9
1.5 Magnetometry.....	10
2 Výchozí požadavky	11
2.1 Požadavky na systém testovací platformy	12
2.2 Požadavky na řídicí procesor.....	12
3 Vlastní řešení	13
3.1 Mechanika.....	14
3.2 Hardware.....	15
3.2.1 Odvozené požadavky na napájení a komunikaci se senzory	15
3.2.2 Návrh sensorové desky.....	17
3.2.3 Výběr procesoru.....	23
3.2.4 Návrh základní desky.....	26
3.2.5 Konstrukce základní desky	28
3.2.6 Konstrukce první sensorové desky	32
3.3 Software	35
3.3.1 PC aplikace	36
3.3.2 Embedded aplikace	46
4 Závěr	54
Literatura	55
Seznam použitých zkratk	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Přehled chyb inerciálních snímačů a metody jejich kompenzace, převzato z [2].....	3
Obrázek 1.2 Jednoduchý akcelerometr, převzato z [2].....	5
Obrázek 1.3 MEMS akcelerometr, převzato z [3]	5
Obrázek 1.4 Princip tradičního gyroskopu, převzato z [4].....	6
Obrázek 1.5 Princip FOG gyroskopu využívajícího Sagnacův jev, převzato z [2]	7
Obrázek 1.6 Princip MEMS gyroskopu typu „tuning fork“, převzato z [2].....	7
Obrázek 1.7 Struktura a princip MEMS gyroskopu, převzato z [5].....	8
Obrázek 1.8 Pohled na strukturu MEMS gyroskopu, převzato z [6].....	8
Obrázek 1.9 Typická pouzdra pro MEMS senzory (atypická CLCC pouzdra), převzato z [7].....	8
Obrázek 1.10 Princip elektrolytického inklinometru, převzato z [8]	9
Obrázek 1.11 Příklad vnitřního zapojení magnetometru, převzato z [10].....	10
Obrázek 3.1 Výsledný návrh mechanických komponent	14
Obrázek 3.2 SPI - přímý výběr koncového zařízení.....	17
Obrázek 3.3 SPI - výběr koncového zařízení pomocí dekodéru.....	17
Obrázek 3.4 SPI - výchozí konfigurace testovací platformy	18
Obrázek 3.5 SPI - výsledné řešení adresace	19
Obrázek 3.6 Blokové schéma sensorové desky (ilustrační)	21
Obrázek 3.7 Zapojení konektorů spojujících základní desku a sensorové desky.....	22
Obrázek 3.8 Vývojový kit ATSAM4S Xplained Pro s procesorem ATSAM4SD32C ..	25
Obrázek 3.9 Zapojení konektoru pro připojení napájení a komunikaci s okolním světem	26
Obrázek 3.10 Blokové schéma řídicí desky.....	27
Obrázek 3.11 Pohled shora na motiv a osazení DPS základní desky	28
Obrázek 3.12 Schéma zapojení signálových rozvodů základní desky	29
Obrázek 3.13 Schéma zapojení napájecích rozvodů základní desky.....	30
Obrázek 3.14 Pohled na hotovou základní desku - prototyp	31
Obrázek 3.15 Prototypovací modul osazený senzorem SCC1300-D04	32
Obrázek 3.16 Schéma první sensorové desky osazené senzory SCC1300-D04	33
Obrázek 3.17 Pohled shora na motiv a osazení DPS první sensorové desky.....	34

Obrázek 3.18 Pohled na hotovou senzorovou desku se senzorem SCC1300-D04 - prototyp.....	34
Obrázek 3.19 Výchozí okno převzaté aplikace	36
Obrázek 3.20 Původní aplikace doplněna o možnost připojení k IMU.....	37
Obrázek 3.21 Varovná hláška zobrazovaná v případě problému s navázáním spojení..	37
Obrázek 3.22 Dialog pro nastavení logovaných a zobrazovaných parametrů.....	38
Obrázek 3.23 Možnost načtení dříve uložené konfigurace.....	38
Obrázek 3.24 Výběr souboru s uloženou konfigurací	39
Obrázek 3.25 Konfigurace načtená ze zvoleného IMU.dfc souboru	39
Obrázek 3.26 Konfigurace senzorů použita pro dokumentaci v této práci.....	40
Obrázek 3.27 Okno pro zvolení logovacího souboru	41
Obrázek 3.28 V případě, že se zvolí již existující soubor, objeví se typické varovné hlášení	41
Obrázek 3.29 Výchozí obrazovka po úspěšném připojení a dokončení úvodní konfigurace	42
Obrázek 3.30 Zapnutí napájecích větví	43
Obrázek 3.31 Stav uživatelského rozhraní v průběhu aktivního měření	44
Obrázek 3.32 Varování při pokusu o ukončení aplikace pokud je otevřené spojení.....	45
Obrázek 3.33 Vnitřní struktura jednoho GPIO pinu, převzato z [13].....	47
Obrázek 3.34 Blokové schéma procesoru ATSAM4SD32C s jádrem Cortex-M4, převzato z [13]	49
Obrázek 3.35 Vývojový diagram programu řídicího procesoru	50
Obrázek 3.36 Vazby mezi soubory projektu	51
Obrázek 3.37 Zapnutá testovací platforma	53
Obrázek 3.38 Detail LED zobrazujících stav napájecích linek (zelené) i uživatelských (žluté).....	53

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3.1 Stručný přehled klíčových parametrů vybraných inerciálních senzorů.....	15
Tabulka 3.2 Výsledek vyhledávání použitelných procesorů	24
Tabulka 3.3 Srovnání žádaných parametrů a parametrů zvoleného procesoru ATSAM4SD32C.....	25
Tabulka 3.4 Popis rámce použitého komunikačního protokolu	52

ÚVOD

Vzhledem k tomu, že tuto práci inicializovala a výrazně podporovala Aerospace divize firmy Honeywell International spol. s.r.o., je práce zaměřena právě na letecký průmysl, kde v současnosti existuje velké množství přísných požadavků, které jsou v některých případech ještě přísnější podle použití, ke kterému je vyvíjený systém cílený.

Přirozeně, je-li od systému požadováno, aby rozeznal pouze, zda letadlo letí normálně nebo vzhůru podvozkem, budou nároky na použité senzory a vyhodnocovací logiku mnohem menší než v případě jednotky, kterou využívá autopilot a vyžaduje citlivé měření i malých změn ve směru pohybu a to dokonce po dlouhou dobu.

Práce je primárně zaměřena na testování inerciálních senzorů, zejména gyroskopů a akcelerometrů využívajících technologii MEMS, ale díky snaze najít univerzální řešení této testovací platformy to není žádné omezení, a tak je možné testovat i další senzory.

Každý typ senzoru vyžaduje určité specifické metody testování, například gyroskopy se testují na rotačních stolech, akcelerometry na stolech vibračních, ale pro všechny senzory je možné provést sérii společných testů, například statické měření vlivu času na různé vlastnosti senzorů nebo měření v teplotní komoře.

Bližší detaily ohledně zmíněných senzorů, ale i samotné konstrukce testovací platformy budou blíže rozebrány v jednotlivých kapitolách této práce. Úvodem budou blíže popsány některé vybrané senzory včetně hlavních a nejčastějších vlivů způsobujících nepřesnosti měření. Další kapitola přiblíží požadavky na dizajn mechaniky, hardwaru i softwaru. Pak následuje již samotný návrh. V závěru je stručné shrnutí dosažených výsledků a možnosti pro další pokračování.

1 SENZORY

Senzory, anebo snímače v elektronice obecně, jsou zařízení sloužící k měření a převodu různých fyzikálních veličin na elektrické signály pro potřeby dalšího zpracování získané informace.

Pro potřeby navigace a určování polohy patří mezi nejdůležitější senzory gyroskopy, akcelerometry, magnetometry, inklinometry a barometry, díky kterým je možné měřit směr působení gravitačního zrychlení, směr magnetického pole Země, atmosférický tlak, ze kterého lze určit nadmořskou výšku a pak i drobné změny ve směru pohybu. Přidáním dalšího parametru – času, je možné dopočítat rychlost i dráhu, data chronologicky zaznamenávat, a pokud jsou k dispozici i další počáteční hodnoty, například souřadnice výchozího bodu, je možné tento vzniklý systém využít k navigaci.

Při návrhu systému, na který jsou kladené vysoké nároky a musí snášet i velice nepříznivé podmínky, zejména výrazné teplotní rozdíly, je nutné věnovat potřebnou pozornost i vlivům způsobujícím relativně malé odchylky od skutečné hodnoty. Mezi tyto vlivy patří například různé driftы výstupní hodnoty v čase (problém vyskytující se u snímačů postavených na technologii MEMS).

Význam těchto nezanedbatelných drobných odchylek, pro účely navigace, demonstruje jednoduchá úvaha, kdy letadlo letí po dobu 8 hodin a navigační systém bez asistence GPS pracuje s odchylkou $1^\circ/\text{h}$ od skutečného směru. Na konci letu je odchylka od plánované trasy 8° a v závislosti na rychlosti letadla to může znamenat chybu několik desítek až sto kilometrů. Při takovéto chybě je klidně možné, že letadlo přistane v jiném státě nebo se omylem dostane do uzavřeného vzdušného prostoru, např. vyhrazeného pro vojenské účely či ochranu strategických cílů.

Situace podobného scénáře je nepřijatelná! Proto i přes to, že letadla svou pozici sledují pomocí GPS a velká část území je monitorovaná i pozemními radary pro řízení letového provozu, jsou na inerciální měřicí jednotky (IMU – Inertial Measurement Unit) kladené přísné požadavky. Tyto jednotky totiž poskytují důležitou zálohu v případě výpadku GPS. Jiné přístroje, jako je například umělý horizont, na nich závisí po celou dobu.

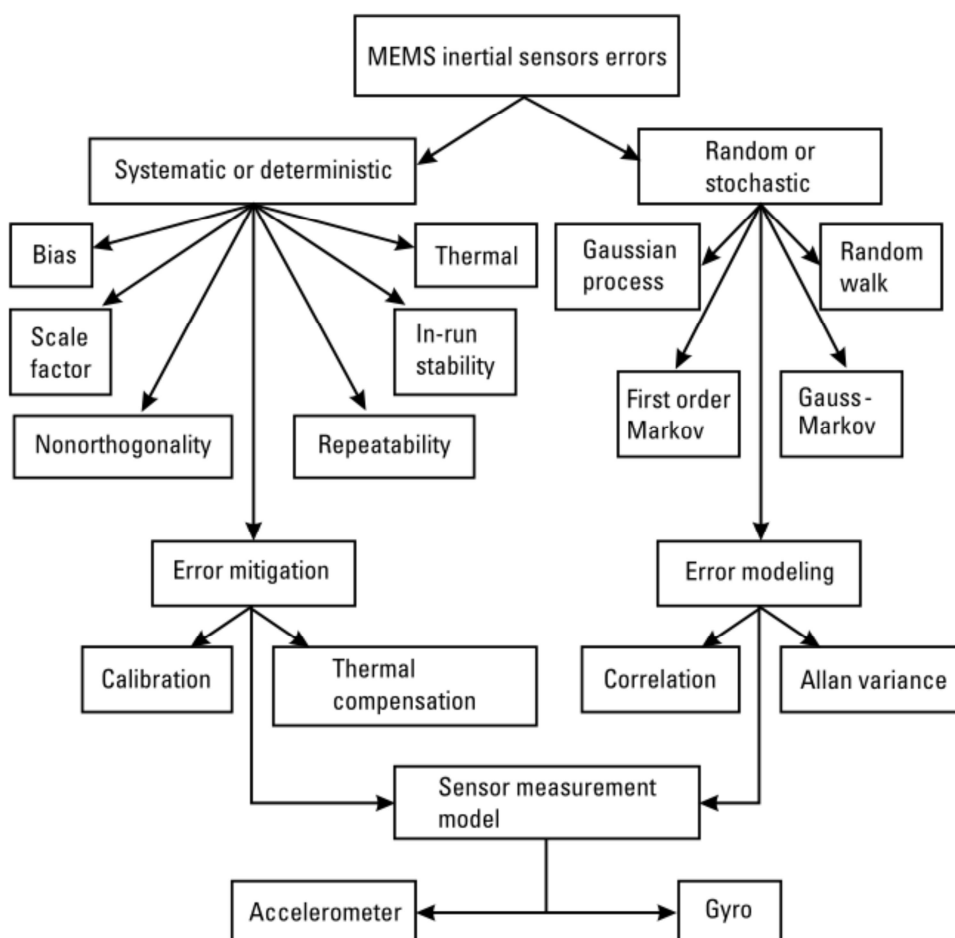
1.1 Technologie MEMS

Již v předchozím úvodu byla okrajově zmíněna tato technologie. Zkratka v původním anglickém znění znamená Micro Electro-Mechanical System, tedy v překladu mikroskopický elektromechanický systém. Princip technologie je podobný výrobě integrovaných obvodů, ale s menší nadstavbou – mechanikou. MEMS komponenty obsahují i pohyblivé části, které v součinnosti s integrovanou elektronikou tvoří funkční celek, díky němuž mají široké možnosti využití.

Nejčastější využití této technologie je právě pro výrobu miniaturních gyroskopů a akcelerometrů, ale taky tlakoměrů, piezoelektrických bublinových budičů pro inkoustové tiskárny, různé bio senzory a další [1].

Díky nižší ceně, malým rozměrům a nízké hmotnosti jsou tyto senzory zajímavé právě pro potenciální využití v leteckém průmyslu, ale nejdřív je nutné prokázat, že jsou konkurenceschopné ve srovnání se systémy ověřenými a používanými v současnosti.

Aby mohly být systémy navzájem srovnávané, je nutné jednoznačně definovat testovací procedury a způsoby reprezentace získaných výsledků. Tyto formality jsou již podchycené a existují obecné modely popisující chyby a testovací procedury pro inerciální senzory, nezávisle na technologii, kterou využívají.



Obrázek 1.1 Přehled chyb inerciálních snímačů a metody jejich kompenzace, převzato z [2]

Obrázek 1.1 názorně a přehledně demonstruje, jaké parametry se sledují a jak je možné je kompenzovat v případě deterministických chyb, anebo odhadovat v případě chyb stochastických.

V další části bude zběžně rozebrán význam jednotlivých parametrů a metody jejich testování:

- **Bias (offset)** – v případě, kdy na senzor nepůsobí žádné síly, by měl na výstupu vykazovat nulovou hodnotu, jakákoliv jiná hodnota je považována za bias. Hodnota tohoto parametru se udává v jednotkách měřené veličiny (u akcelerometrů [g], u gyroskopů [°/h])
- **Scale factor (input sensitivity)** – poměr změny výstupu ke změně vstupu. V případě lineární závislosti se jedná o konstantu, která v ideálním případě je rovna 1 a jakákoliv jiná hodnota představuje ovlivnění chybou. Výrobci obvykle udávají parametr *scale factor error* nebo *non-linearity* v jednotkách [ppm] nebo [%].
- **Nonorthogonality** – chyby způsobené výrobními nepřesnostmi při montáži senzorů k nosné konstrukci. Jedná se o malé výchylky v souřadném systému senzoru vůči platformě, ale je potřeba s nimi počítat. Výrobci obvykle udávají parametr *nonorthogonality error* nebo *misalignment error* v jednotkách [ppm].
- **Repeatability (Run-to-run bias/scale factor)** – opakovatelnost výsledků při každém zapnutí, jedná se o maximální odchylku parametrů *bias* a *scale factor* od udávané hodnoty při každém zapnutí. Vlivem nepredikovatelných jevů uvnitř senzoru dochází při každém zapnutí k ustálení těchto parametrů na jiné hodnotě. Tyto parametry se udávají v jednotkách měřené veličiny.
- **In-run bias/scale factor** – chyba *bias* a *scale factor* parametru v průběhu měření během jednoho zapnutí. Jedná se o dynamickou chybu a je těžké jí zcela kompenzovat. Výrobci obvykle udávají parametr *bias/scale factor stability* v jednotkách měřené veličiny.
- **Thermal bias/scale factor** – chyba *bias* a *scale factor* parametru na okolní teplotě. Tento parametr se rovněž udává v jednotkách měřené veličiny.
- **Stochastic errors** – náhodné chyby objevující se v čase vlivem různých vnitřních nebo vnějších působení. Není možné je přesně popsat, ani s nimi počítat, proto se na jejich kompenzaci používají různé statistické metody (4 zmíněné v obrázku).

Pro měření prvních tří parametrů (*bias*, *scale factor* a *nonorthogonality*) se používají dynamické testy. Gyroskopy se upevní k rotačnímu stolu, akcelerometry k vibračnímu stolu. Následně se měří odezva na známou změnu velikosti působící síly a to jak v citlivých osách, tak i v těch necitlivých. V případě dokonale ortogonální soustavy by měla být v necitlivých osách odezva nulová, ale vlivem chyby ortogonality tomu tak často není.

Ostatní testy je možné provádět staticky - v klidovém stavu.

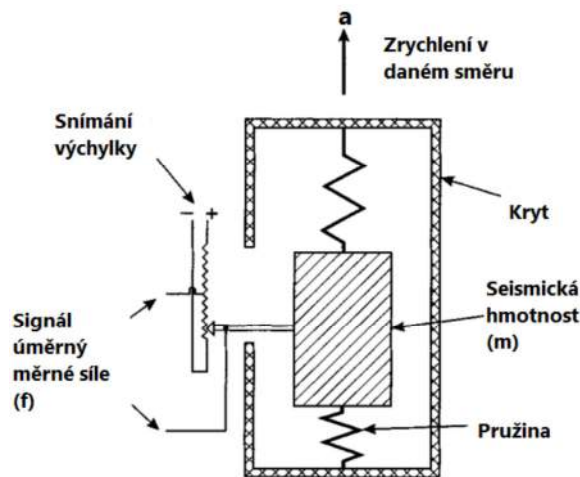
Jak statické, tak dynamické testy můžou být prováděné ještě v teplotní a tlakové komoře pro proměření těchto parametrů za jiných podmínek [2].

1.2 Akcelerometry

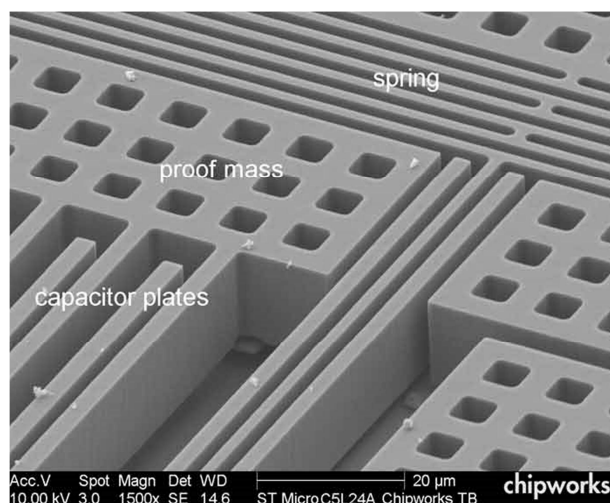
Akcelerometry jsou snímače měřící lineární zrychlení, tedy změnu rychlosti za jednotku času ve směru citlivé osy.

Funkce akcelerometru je celkem jednoduchá. Jedná se o uzavřený systém, uvnitř kterého se nachází hmotné tělíčko, které plní funkci setrvačnicku, pružně uchycené tak, aby v jedné ose mělo možnost pohybu a současně v klidovém stavu se nacházelo uprostřed této dráhy. Dojde-li ke změně rychlosti (zrychlení) ve směru citlivé osy, má tělíčko tendenci setrvat v ustálené pozici a posune se tak blíže jedné straně. Toto posunutí je možné měřit.

Natočí-li se citlivá osa akcelerometru rovnoběžně s vektorem působení gravitačního zrychlení, akcelerometr toto zrychlení rovněž detekuje. Při práci s akcelerometry je nutné uvažovat i s tímto statickým působením gravitačního pole Země a vhodně jej kompenzovat, není-li předmětem měření.



Obrázek 1.2 Jednoduchý akcelerometr, převzato z [2]



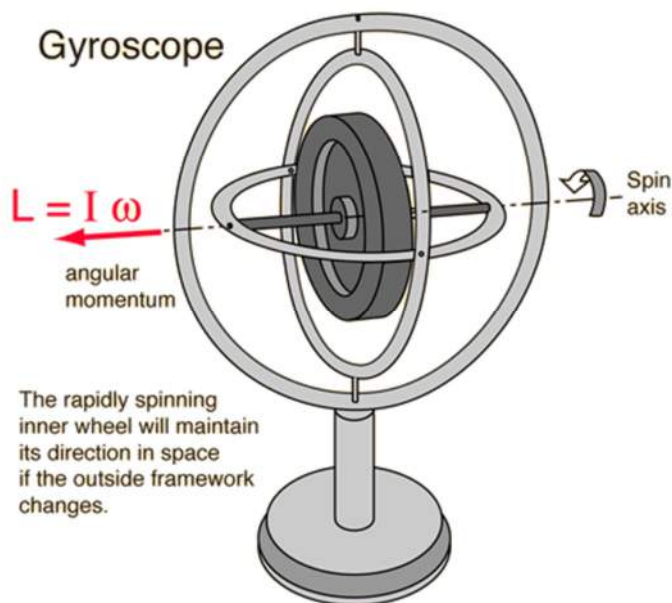
Obrázek 1.3 MEMS akcelerometr, převzato z [3]

MEMS akcelerometry využívají podobného principu, jako prezentuje obrázek 1.2. Blok označený na obrázku 1.3 jako „proof mass“ představuje onu setrvačnou seismickou hmotnost, která je přidržovaná v klidové poloze pružinami (springs) a její pozice měřena kapacitně deskami tvořícími kondenzátor (capacitor plates). Dojde-li ke změně rychlosti pohybu akcelerometru, posune se seismická hmotnost uvnitř akcelerometru blíže k jedné straně, což vyvolá změnu kapacity mezi snímacími deskami, a tato změna je úměrná velikosti zrychlení.

1.3 Gyroskopy

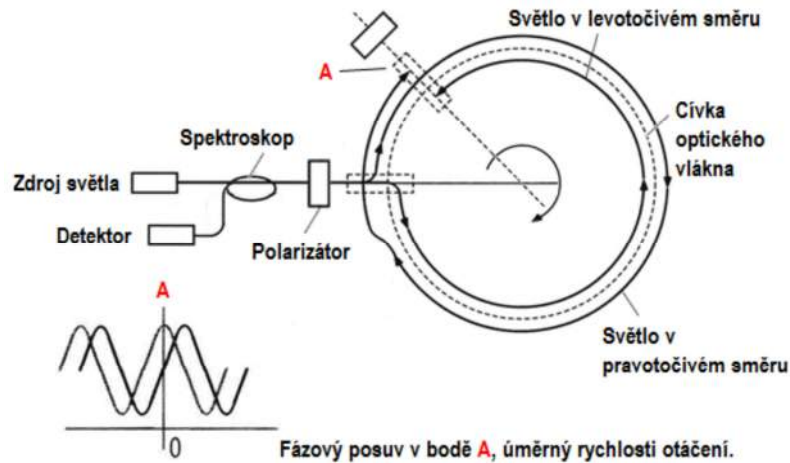
Gyroskopy jsou rovněž senzory zrychlení podobně jako akcelerometry, ale neměří lineární zrychlení, nýbrž rotační. Pohybuje-li se s gyroskopem dopředu-dozadu nebo vpravo-vlevo je odezva gyroskopu minimální, ale zaznamená-li gyroskop natočení kolem citlivé osy, na jeho výstupu se objeví cenné informace o velikosti tohoto zrychlení.

Princip gyroskopu je známý už velice dlouhou dobu, ale obvykle vyžaduje těžký a rychle rotující setrvačník. Takové zařízení rozhodně není malé, lehké, ani energeticky šetrné.



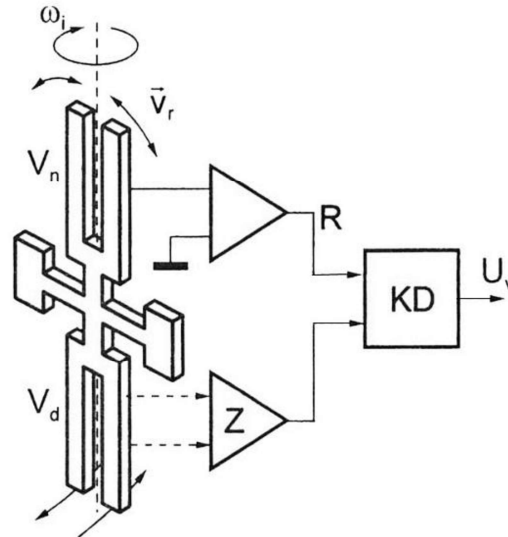
Obrázek 1.4 Princip tradičního gyroskopu, převzato z [4]

O něco schůdnější cestu nabízejí vláknové optické gyroskopy (FOG – Fiber Optic Gyroscope) nebo jim podobné. Tyto optické gyroskopy využívají Sagnacova jevu, kdy jsou do dlouhé optické cívky vysílané dva světelné paprsky proti sobě a měří se jejich vzájemné zpoždění na druhém konci. Pokud se gyroskop neotáčí, dorazí oba paprsky na druhý konec ve stejný okamžik. Dojde-li k natočení gyroskopu, jeden paprsek urazí kratší dráhu, druhý delší a proto nedorazí oba ve stejný okamžik. Změřením tohoto fázového posuvu je možné určit rychlost otáčení. Výraznou výhodou je vysoká přesnost, avšak rozměry pořád nejsou zrovna kapesní a výrazným mínusem je jejich vysoká cena [2].



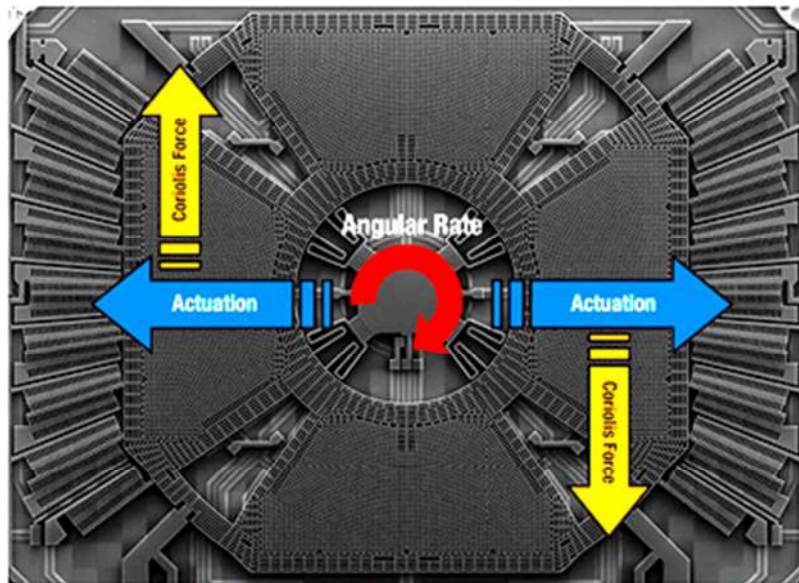
Obrázek 1.5 Princip FOG gyroskopu využívajícího Sagnacův jev, převzato z [2]

Zde právě MEMS technologie vyplnily velikou díru na trhu v oblasti spotřební elektroniky a našly široké uplatnění v mnoha aplikacích díky svým malým rozměrům, přijatelné spotřebě a dostačující kvalitě. MEMS gyroskopy ke své činnosti využívají Coriolisovy síly. Tyto síly vznikají při otáčení vibrujícího tělesa, tudíž je zřejmé, že MEMS gyroskopy ke své funkci vyžadují i integrovaný budič a taky vhodnou kompenzaci této budící složky, aby neovlivňovala výstup gyroskopu. Provedení MEMS gyroskopů se liší u jednotlivých výrobců podle jejich patentů. V praxi se lze setkat s formacemi typu „tuning fork“ nebo „butterfly gyro“ apod.

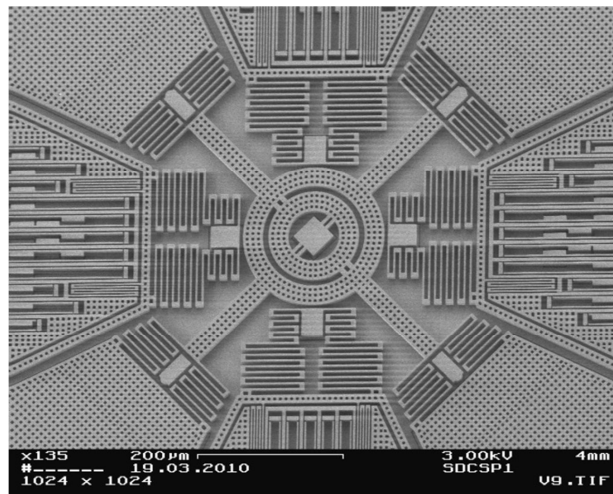


Obrázek 1.6 Princip MEMS gyroskopu typu „tuning fork“, převzato z [2]

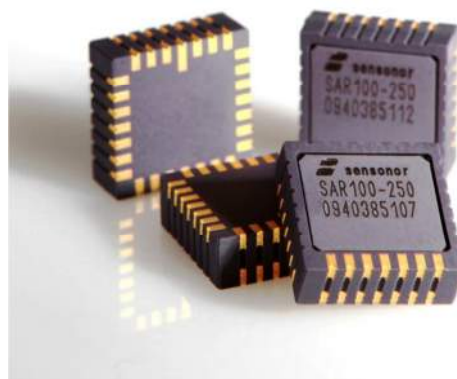
Základem konstrukce je osově symetrické kmitající těleso, jehož jedna polovina je buzena, obvykle piezo-rezonátory (pohyb ve směru V_r), ve druhé polovině kmitajícího tělíska vyvolá působení otáčivé síly (ω_i), kmity (V_d) kolmé na budící sílu [2].



Obrázek 1.7 Struktura a princip MEMS gyroskopu, převzato z [5]



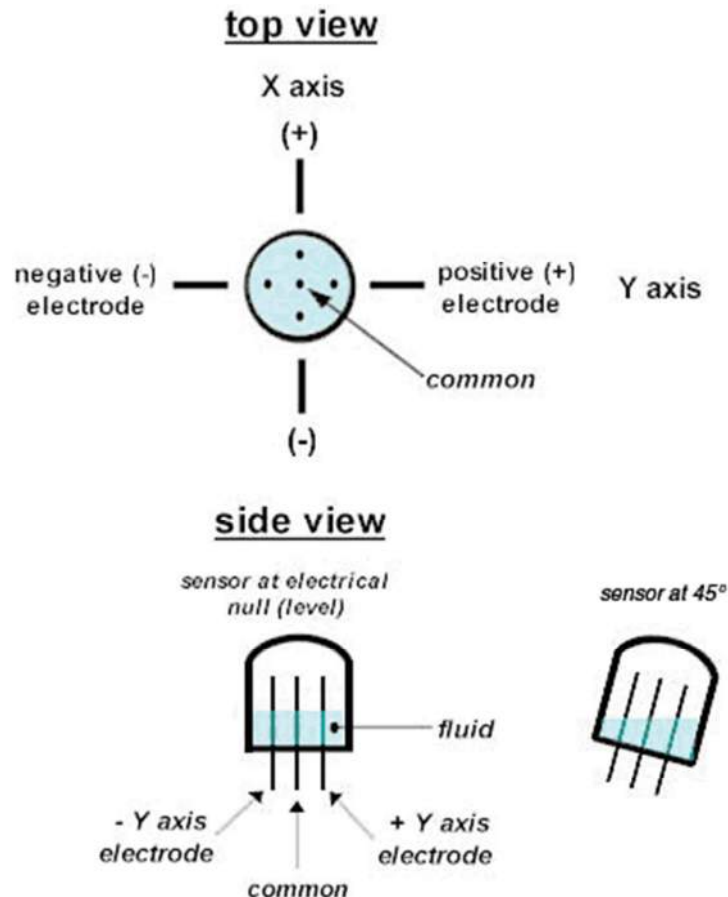
Obrázek 1.8 Pohled na strukturu MEMS gyroskopu, převzato z [6]



Obrázek 1.9 Typická pouzdra pro MEMS senzory (atypická CLCC pouzdra), převzato z [7]

1.4 Inklinometry

Inklinometry slouží k měření směru působení gravitačního pole Země. Často se vyskytují ve formě skleněné baňky s určitým množstvím nějaké vodivé kapaliny, např. na bázi elektrolytu a několika elektrodami. Elektrody fungují jako desky kondenzátoru, nebo odporová dráha potenciometru, a změnou vodivosti mezi jednotlivými elektrodami je možné vyhodnotit náklon vůči zemskému povrchu.



Obrázek 1.10 Princip elektrolytického inklinometru, převzato z [8]

Prostřední (common) elektroda je měřicí a ostatní čtyři elektrody jsou postupně buzeny zdrojem střídavého napětí, aby nedocházelo k elektrolýze použitého elektrolytu. Mezi těmito elektrodami lze měřit impedanci složené z odporové a kapacitní složky a na základě této informace vyhodnocovat úhel náklonu.

Za použití takovýchto kapacitních snímačů je možné dosáhnout vysoké citlivosti a odolnosti vůči okolnímu rušení, ovšem za cenu mírně větších rozměrů.

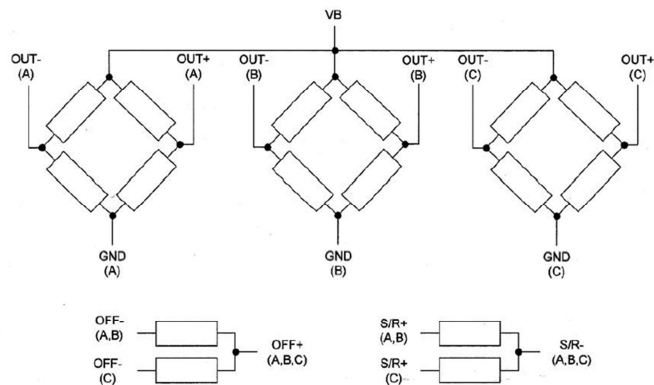
Pro generaci napájecího střídavého napětí lze použít i obdélníkový průběh s kmitočtem od stovek Hz až do několika kHz [9].

1.5 Magnetometry

Dalšími oblíbenými a nezastupitelnými senzory v oblasti navigace jsou magnetometry, které umožňují měřit intenzitu magnetického pole Země a dopočítat tak jeho směr.

Magnetometry pracují na bázi rozvažování Wheatstone-ova můstku, ve kterém jsou v obou větvích proti sobě zapojené speciální magnetorezistivní snímače vyrobené z Permalloye (slitina niklu a železa). Tyto snímače je možné snadno zmagnetizovat, čímž se vytvoří struktura ve formě proužků uspořádaných v jedné ose.

Přítomnost okolního magnetického pole tyto proužky zmagnetizuje ve směru svého působení. Změnou natočení proužků ve směru působícího pole dojde ke změně odporu měřících větví můstku, což se na výstupu snímače projeví změnou výstupního napětí [10].



Obrázek 1.11 Příklad vnitřního zapojení magnetometru, převzato z [10]

2 VÝCHOZÍ POŽADAVKY

Tato kapitola se zabývá již konkrétními požadavky na navrhovaný systém ze strany zadavatele, tedy firmy Honeywell International spol. s.r.o., a konkrétním navrhovaným řešením. Vzhledem k tomu, že se jedná o testovací přípravek, možná jediný svého druhu, který je primárně určený pro laboratorní použití, a není tudíž nutné jej certifikovat přísnými normami platnými v oblasti leteckého průmyslu, je v rámci návrhu větší volnost, zejména ve výběru použitých součástí.

Pro lepší představu jak znění předchozího výroku rozumět zajisté postačí informace, že v leteckém průmyslu je povinností výrobce každé součásti zajistit náhradní díly minimálně po dobu pětadvaceti let od uvedení na trh. Při pohledu na historii portfolia produktů mnoha výrobců je zjevné, že pro většinu komponentů (zejména pro digitální zpracování signálů, jako jsou například různé převodníky, procesory, hradlová pole apod.), je samotná výroba, anebo i podpora po ukončení výroby, kratší než pět, maximálně deset, let. Vzhledem k povaze práce a účelu použití vyvíjené platformy však tyto starosti odpadají, a je proto možné využít levnější a momentálně dostupné součásti.

2.1 Požadavky na systém testovací platformy

Předmětem práce není hledat adekvátní požadavky na daný systém, nýbrž na základě předložených požadavků vytvořit návrh možného řešení. Proto byl seznam požadavků dodán a specifikován firmou Honeywell International spol. s.r.o.

Seznam požadavků má celkem deset bodů a to následujících:

1. Kompaktní rozměry pro testování na rotačním stolku (maximálně 200 mm v průměru) a v teplotní komoře (maximálně 200 mm na výšku)
2. Robustní mechanickou konstrukci (minimální rozměry nosných částí alespoň 10x10 mm)
3. Modulární řešení s jednou řídicí deskou a měnitelnými deskami se senzory
4. Více sensorových desek na osu (minimálně 3)
5. Zapínatelné napájecí vedení sensorových desek pro Run-to-run testy
6. Komunikaci mezi deskami zajistit pomocí SPI rozhraní
7. Více možností připojení externích zařízení, minimálně přes USB a SPI
8. Přístupné programovací rozhraní (JTAG, bootloader)
9. Signalizace stavu napájecích vedení pomocí signalizačních LED
10. Alespoň tři uživatelsky přístupné (programovatelné) LED

2.2 Požadavky na řídicí procesor

Další klíčovou záležitostí byl výběr řídicího procesoru. Pro selekci použitelných modelů bylo stanovených dalších deset bodů s těmito požadavky:

1. Operační teplotní rozsah $-40\text{ °C} - +80\text{ °C}$
2. Skladovací teplota až -55 °C
3. 16/32-bitová architektura
4. Taktovací frekvence jádra alespoň 80 MHz
5. Minimálně 1 MB interní programovatelné paměti
6. Minimálně 128 kB interní RAM
7. 1x SPI master rozhraní pro komunikaci s deskami se senzory
8. 1x SPI slave rozhraní pro komunikaci s externím zařízením
9. USB rozhraní pro přímé připojení k PC
10. Použití vývodových pouzder (např. TQFP, ne BGA)

3 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

Tato kapitola se již víc nezabývá teoretickými rozbory, ale popisuje řešení předložených požadavků a konkrétní provedení.

Vzájemné vazby mezi požadavky na mechaniku, hardware, software a taky uživatelský komfort v běžné praxi obvykle neumožňují navrhnout definitivní řešení jedné z těchto částí a ty ostatní jí pouze a jednoduše přizpůsobit. Výsledkem je náročný proces pokusů a omylů a různého experimentování s jednotlivými částmi, které postupně konvergují k určitému schůdnému řešení, až se povede najít přijatelný kompromis mezi všemi požadavky. Jinak tomu nebylo ani v případě této práce, a proto bylo následné řazení jednotlivých částí zvolené z důvodu zlepšení přehlednosti, nikoli chronologicky.

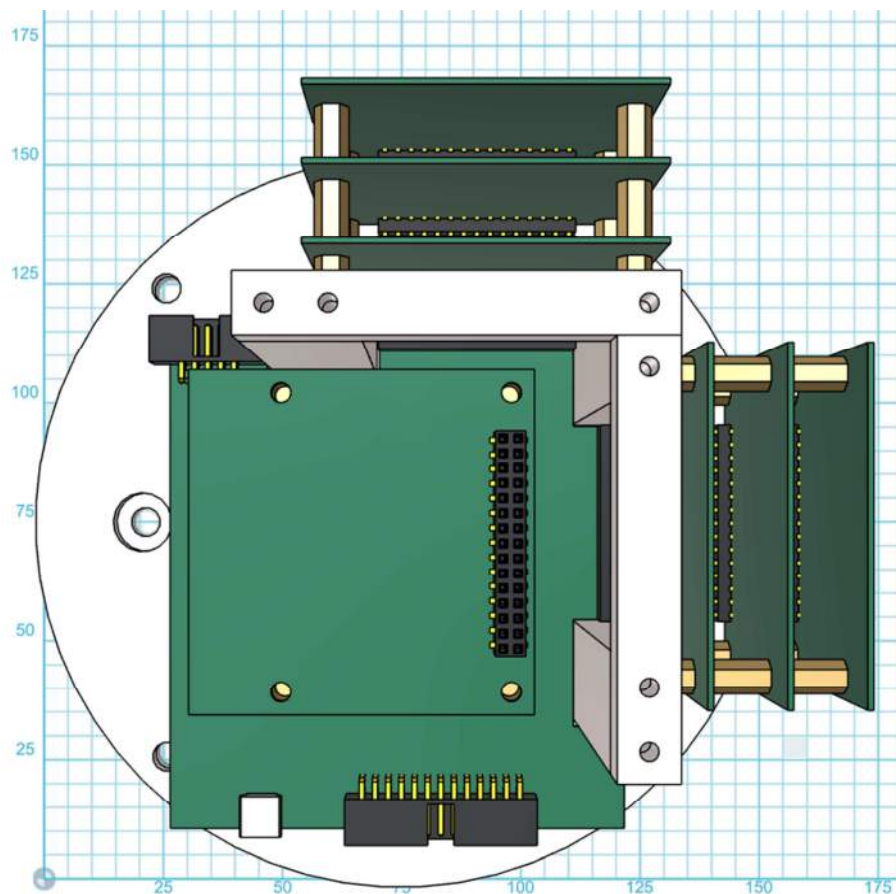
3.1 Mechanika

Při návrhu mechanické části návrhu byl brán největší zřetel na celkové vnější rozměry (maximální průměr 200 mm a maximální výška 200 mm), minimální rozměry nosných sloupků (10x10 mm) a místa pro uchycení zejména k rotačnímu stolku. Ostatní rozměry a uložení vyplynuly z návrhu dalších částí, zvláště z hardwarového návrhu řídicí desky.

Výsledkem je sestava stojící na dvou talířích o průměru 150 mm a tloušťce 4 mm. Jeden talíř slouží k přimontování k rotačnímu stolku pomocí 4 šroubů, což by s osazeným zbytkem konstrukce nebylo možné provést. Druhý talíř nese veškerou další konstrukci – sloupky pro uchycení sensorových desek, ale i všechny desky. Talíře se pak uchycují k sobě dalšími 4 šrouby.

Konstrukce na horní straně je tvořena třemi sloupky o rozměrech 20x10 mm, které jsou svými spodními konci přišroubované k nosnému talíři, a jejich vrchní konce navzájem zafixované příčnými nosníky o průřezu 10x10 mm.

Uchycení desek ke konstrukci je vyřešeno pomocí běžně dostupných distančních sloupků s vnějším závitem M3 na jednom konci a vnitřním závitem M3 na konci druhém.



Obrázek 3.1 Výsledný návrh mechanických komponent

3.2 Hardware

3.2.1 Odvozené požadavky na napájení a komunikaci se senzory

Klíčovým bodem návrhu je rozložení sensorových desek do tří navzájem ortogonálních os, z čehož vyplynulo, že desky ve dvou osách budou připojovány kolmo po stranách a desky ve třetí ose budou uloženy rovnoběžně s hlavní řídicí deskou. Uchycení sensorových desek i zapojení jejich konektorů je stejné pro všechny osy, aby bylo možné desky navzájem zaměňovat.

Fakt, že desky je možné různě zaměňovat mezi sebou, protože jsou pinově kompatibilní, je užitečný zejména z pohledu uživatele výsledné testovací platformy. Ve fázi návrhu bylo ovšem důležité vymyslet, jak budou tyto konektory realizované a jak budou zapojené. Nejdříve tedy bylo potřeba zjistit, kolik signálů a napájecích větví je potřeba k senzorům přivést.

Senzor	Formát výstupu	Napájecí napětí	Přibližná spotřeba
ADIS16136	Digitální – SPI	5 V	120 mA
ADIS16135	Digitální – SPI	5 V	88 mA
MPU-3300	Digitální – SPI, I2C	3,3 V	3,6 mA
SCR1100-D04	Digitální – SPI	5 V/3,3 V	26 mA/20 mA
SAR150	Digitální – SPI	5 V	17 mA
ADXL203	Analogový	5 V	0,7 mA
ADIS16209	Digitální – SPI	3,3 V	36 mA
SCC1300-D04	Digitální – SPI	5 V/3,3 V	26 mA/20 mA

Tabulka 3.1 Stručný přehled klíčových parametrů vybraných inerciálních senzorů

Z předcházející tabulky 3.1 je hned zjevné, že většina senzorů poskytuje naměřené hodnoty v digitální formě a mezi používanými rozhraními jednoznačně převládá SPI sběrnice. Senzory, pochopitelně, pracují ve „slave“ režimu, tedy data odesílají po vyžádání řídicím prvkem zvaným „master“. Volba komunikačního rozhraní mezi řídicí deskou a deskami se senzory tedy padla na SPI. Mimo jiné je toto rozhraní požadované i v zadání.

Z tabulky 3.1 je dále možné vyčíst, jak různorodé jsou požadavky jednotlivých senzorů na napájení. Některé vyžadují pouze 5 V, jiné pouze 3,3 V, další ke své činnosti využívají zdvojené napájení, přičemž analogová a digitální část je napájena každá zvlášť. Vzhledem k tomu, že řídicí procesor (bude blíže rozebrán v dalším textu) pracuje s 3,3 V logikou, bylo zvolené řešení dvou oddělených napájecích větví (jedna 3,3 V a druhá 5 V) se společnou zemí. Podle typu senzoru a jeho požadavků na napájecí napětí se senzor připojí k jedné nebo druhé větvi.

V případě, že senzor pracuje s 5 V logikou, je potřeba dbát na ochranu řídicího procesoru před přepětím a to buď použitím specializovaných obvodů – linkových oddělovačů, anebo jednoduchých napěťových děličů.

Zvláštní pozornost je potřeba věnovat sensorům čistě analogovým a sensorům se zdvojeným napájením. Je nutné brát ohled na zásady správného návrhu obvodů s mixovanými signály, zejména zcela separovat napájecí vedení a oddělit země, které se spojí pouze v jednom jediném místě. Oddělením zemí se předejde vzniku zemních smyček a přenosu záskmitů, vznikajících rychlými změnami v digitálních obvodech do obvodů analogových, při současném zachování stejného potenciálu.

Ve světle těchto okolností do návrhu přibyla ještě jedna napájecí větev, tentokrát pouze 5 V, protože právě tu většina analogových sensorů vyžaduje. V případě potřeby nižšího napětí lze použít lokální stabilizátor s malým úbytkem napětí. Současně tak ale přibyla i další zemní větev, výhradně pro analogové signály.

V elektronice, obzvláště v měřicí technice, je zcela samozřejmým faktem, že s měnění se okolní teplotou se mění i vlastnosti a parametry všech elektronických součástek. Zvláště výrazné jsou změny u polovodičových součástek, tedy i inerciálních sensorů využívajících technologii MEMS. Protože změny parametrů kritických měřicích nebo referenčních součástek s kolísající teplotou nejsou zanedbatelné, využívá se v praxi metoda, při níž je kritická součást uzavřena v komoře s přísně hlídanou a regulovanou teplotou na konstantní úrovni, nad maximální předpokládanou hodnotou teplotou okolí. V takovém případě stačí pouze topná jednotka, aby se konstrukce nekomplikovala a neprodrazovala přidavnou chladicí jednotkou a složitější řídicí logikou. Například u přístrojů určených pro laboratorní použití, resp. pro použití v obytných interiérových prostorech, jsou kritické součásti udržované na teplotě zhruba 60 °C. U přístrojů určených pro letecký průmysl jsou tyto hodnoty vyšší.

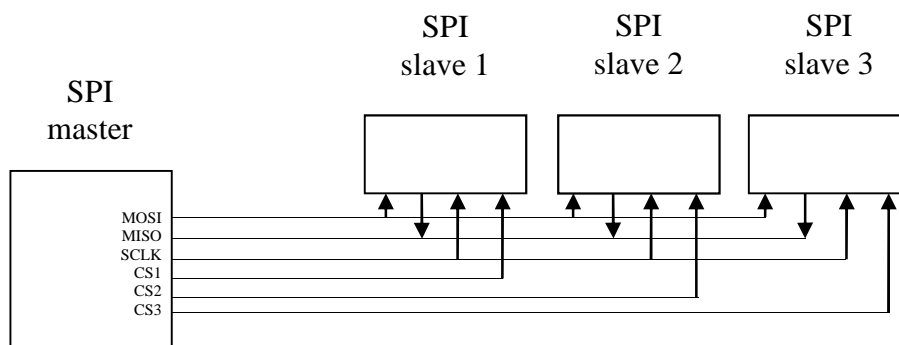
Aby byla vyvíjená testovací platforma ještě univerzálnější, přibyla do návrhu ne jedna, ale rovnou dvě napájecí větve s maximálním přípustným stejnosměrným napětím ± 30 V. Tak je možné podle potřeby využít symetrické napájení nebo nesymetrické s dvojnásobnou proudovou zatížitelností. Protože se jedná o výkonové napájecí větve, které potenciálně můžou sloužit pro napájení topných obvodů regulovaných pulsně šířkovou modulací (PWM – Pulse Width Modulation), díky které vznikají v obvodu výrazné proudové špičky, byla do návrhu doplněna další oddělená zemnicí linka.

Mimo napájení a základních signálů SPI sběrnice MISO, MOSI a SCLK bylo potřeba vyřešit, jakým způsobem se budou vybírat konkrétní senzory. Inerciálních sensorů a jejich provedení je široká škála. Některé jsou rozměrově malé (jenom několik milimetrů i v tom nejdelším rozměru), jiné zase podstatně větší (v řádu centimetrů v rozměru nejkratším). Liší se spotřebou, vnitřním uspořádáním a externími součástkami, které ke své činnosti vyžadují. V některých případech je možné najít senzory, které v jednom fyzickém pouzdru slučují dva samostatné čipy se samostatným komunikačním rozhraním, takže s každým je nutné komunikovat zvlášť. Z pohledu nadřazeného řídicího prvku se tak jeden fyzický senzor chová jako dva zcela nezávislé senzory. Z tohoto důvodu není reálné, aby jedna sensorová deska představovala pouze jedno SPI zařízení. Takové řešení by rovněž bylo hodně neekonomické, ať už z důvodu plýtvání dostupným prostorem na každé sensorové desce, a zejména z důvodu malého počtu současně testovatelných sensorů. Vzhledem k těmto různorodým požadavkům bylo potřeba vymyslet efektivní, univerzální a prostorově co nejméně náročné řešení. Ovšem k definitivnímu rozhodnutí o způsobu řešení propojení hlavní řídicí desky a sensorových desek bylo nutné zvážit ještě možnosti a omezení ze strany řídicího procesoru.

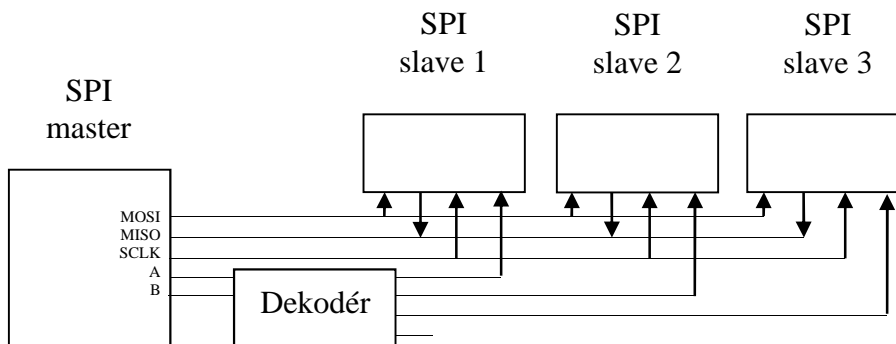
3.2.2 Návrh senzorové desky

Při výběru procesoru bylo nutné v první řadě dodržet zadané parametry, jako je například typ pouzdra či rozsah skladovacích a provozních teplot. Současně ale bylo nutné volbu přizpůsobit i dalším okolnostem. U všech mikroprocesorů se využívá multiplexování pinů, kdy jeden fyzický vývod může plnit funkci obecného vstupu/výstupu, tzv. GPIO (General Purpose Input/Output) nebo speciální funkci některé z integrovaných periférií (USB, SPI, UART, USART, I2C a další.). Některé mikroprocesory umožňují multiplexovat dokonce ještě několik různých periférií na jeden pin. To znamená, že stejný pin může využívat několik různých periférií, ale v jeden okamžik vždy pouze jedna! Tato funkce rovněž umožňuje alespoň částečné přizpůsobení vývodů, potřebných periférií, pro usnadnění návrhu DPS. Při výběru procesoru proto bylo potřeba zohlednit množství pinů potřebných pro požadované periférie a důkladně zkontrolovat možnosti multiplexace, aby nenastala situace, že jedna periférie bude zasahovat do jiné, což by znamenalo nesplnění požadavků. Dále připočítat počet potřebných vstupů a výstupů pro řízení napájecích okruhů, uživatelských LED a hlavně signálů pro výběr konkrétních senzorů. Protože se k přenosu dat mezi senzory a řídicím procesorem využívá sběrnice SPI, která pro výběr konkrétního koncového zařízení využívá hardwarové signály, bylo nutné stanovit, kolik signálů se k tomuto účelu použije.

V praxi jsou u SPI sběrnice rozšířené dva druhy adresování, viz obrázky 3.2 a 3.3:

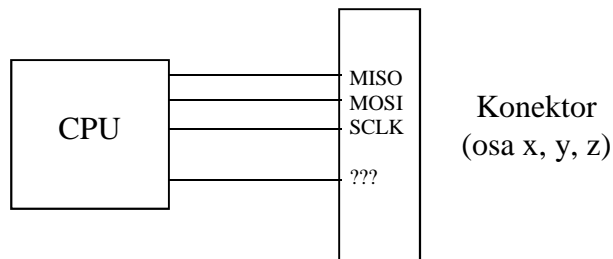


Obrázek 3.2 SPI - přímý výběr koncového zařízení



Obrázek 3.3 SPI - výběr koncového zařízení pomocí dekodéru

Oba tyto režimy ovšem uvažují s přesně určeným počtem připojených zařízení. Tato úvaha není při návrhu této testovací platformy použitelná, neboť základní konfigurace, při které není osazená žádná sensorová deska, pouze hlavní řídicí deska, vypadá následovně (obr. 3.4):



Obrázek 3.4 SPI - výchozí konfigurace testovací platformy

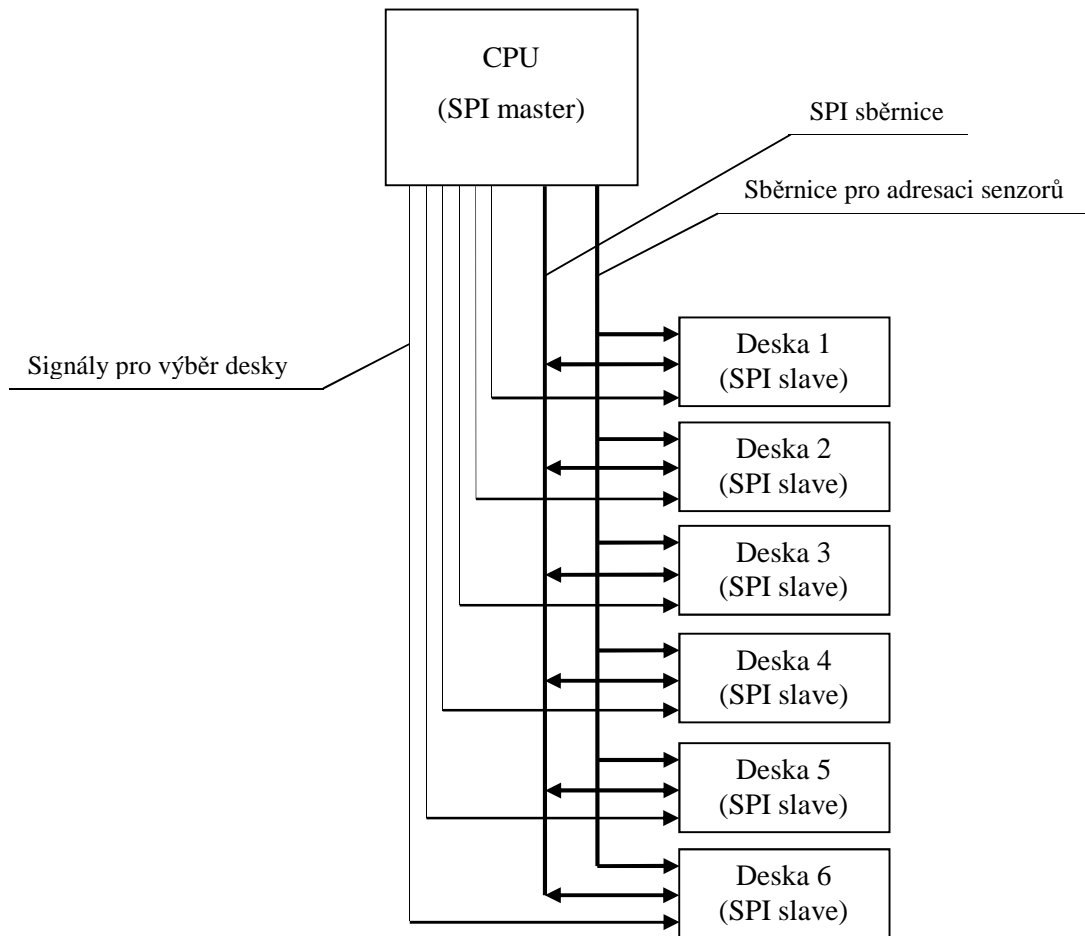
Ve výchozím stavu bez připojení jakékoliv sensorové desky je celkový počet zařízení, se kterými je možno komunikovat, nulový. Podle zadání pak musí být možné na každou stranu připojit minimálně tři samostatné desky se senzory, přičemž počet senzorů se může lišit od jednoho až po takový počet, kolik se jich povede vtěsnat na sensorovou desku.

Použití přímého způsobu adresování by znamenalo vyvést signály pro výběr každého jednoho senzoru na konektor. Při úvaze, že maximální počet senzorů na jednu desku by byl omezený shora na patnáct, a takové desky musí být možné připojit alespoň tři, je celkový počet potřebných „chip select“ signálů čtyřicet pět na jednu osu! Ve třech osách by to bylo dohromady sto třicet pět. Je zjevné, že tohle není schůdné řešení. Jednak by to vyžadovalo obrovské konektory a rozsáhlou plochu na desce plošného spoje, jednak vzhledem k omezenému dostupnému prostoru by to nebylo reálné ani navrhnout. Takové řešení by rovněž nebylo moc univerzální, neboť by vyžadovalo pro každý senzor samostatný pin konektoru, tudíž i sensorové desky by musely být s ohledem na to navrhované. V případě potřeby testovat najednou v jedné ose stejné senzory rozhozené na dvě desky, by musela být každá deska navržena jinak, aby vedl ke každému senzoru pouze jeden „chip select“ signál. Tohle není vhodný způsob řešení!

Použitím dekodéru na desce s procesorem by se situace moc nezměnila, pouze by se snížila náročnost na počet pinů samotného procesoru. Přidáním dalších součástek by se ovšem ještě zvětšil a zkomplikoval návrh desky.

Časem se tak postupně rýsovalo řešení, ve kterém se logika pro výběr jediného konkrétního senzoru ze všech připojených desek ve všech osách vhodně rozdělí mezi řídicí desku a jednotlivé desky se senzory. Řídicí procesor by se staral o komunikaci s jednotlivými deskami a vybrané desce posílal informace, ze kterého senzoru chce vyčítat data. Toto řešení by nevyžadovalo tolik samostatných signálů a současně by podporovalo univerzálnost platformy, kde nezáleží na tom, ve které pozici je deska osazená a současně nebrání, dokonce podporuje, využití více stejných desek v jedné ose. Značnou inspirací při hledání tohoto řešení poskytly modulární systémy průmyslových automatů (PLC), které využívají stejný konektor pro vzájemné propojování digitálních, analogových či komunikačních modulů a disponují i funkcí autodetekce a autokonfigurace připojených modulů. Pro dosažení takovéto univerzálnosti bylo nutné vymyslet unifikované řešení signálů spojujících sensorové desky s řídicím procesorem, ale i návrh základní logiky sensorových desek.

Koncepce finálního řešení vypadá následovně (obr. 3.5):



Obrázek 3.5 SPI - výsledné řešení adresace

Navrhnuté řešení je již téměř použitelné. Výhodou tohoto řešení je, že signály potřebné pro práci se senzory jsou sběrnicové topologie, tudíž společné pro všechny připojené desky. Jediné signály, které musí být jedinečné, jsou ty pro výběr některé z desek. Vzhledem k tomu, že počet desek je mnohem menší číslo než počet všech možných připojitelných senzorů, je počet potřebných jednoúčelových signálů výrazně omezený.

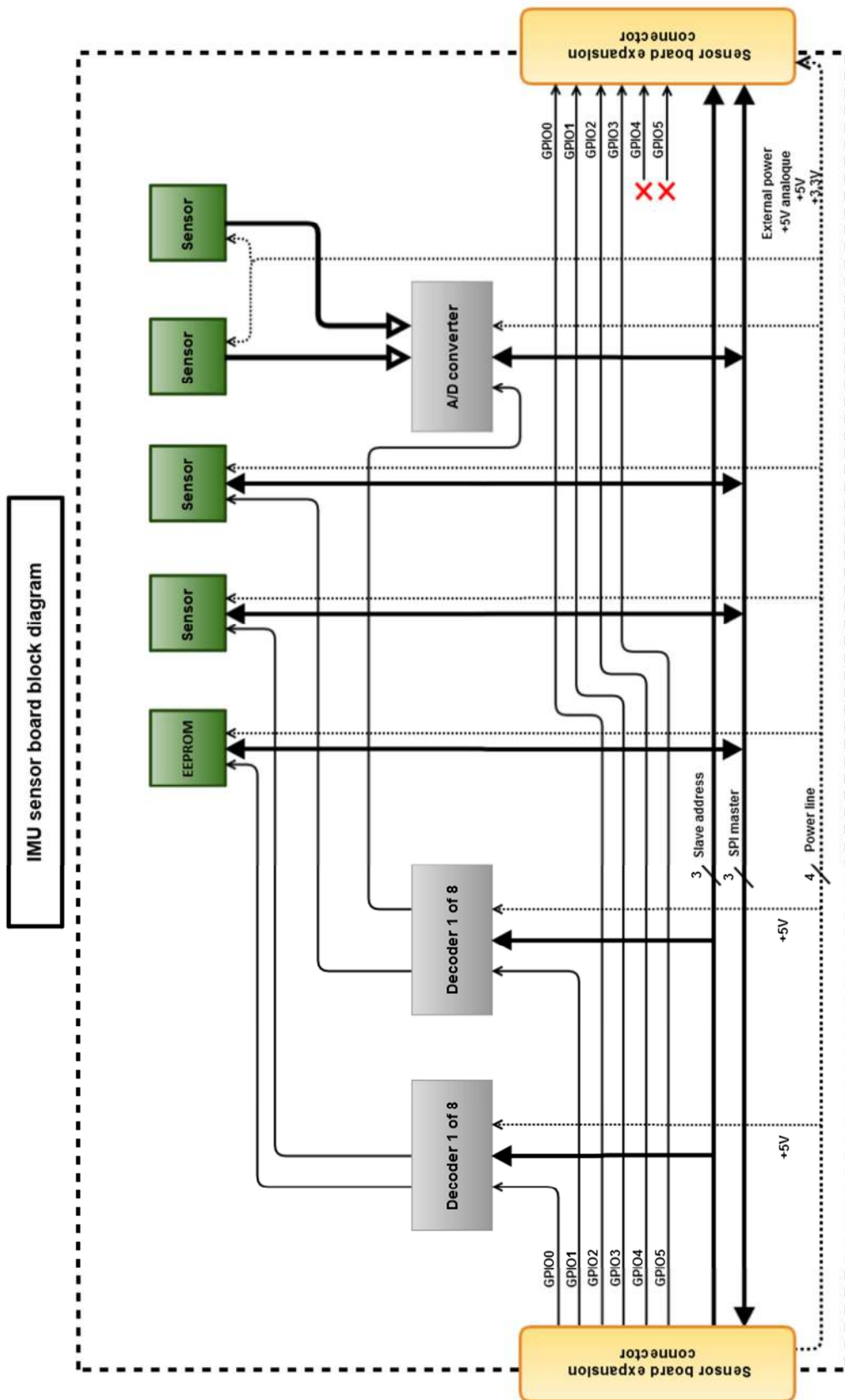
Teoreticky by toto řešení již bylo použitelné, ale pro návrh reálného schématu bylo potřeba ještě konkretizovat šířku adresní sběrnice a počet signálů sloužících k výběru jedné konkrétní desky. Příhodně se ukázalo využití dekodéru na každé sensorové desce pro dekódování adresy a aktivaci pouze jednoho zařízení. SPI zařízení ke své aktivaci vyžadují „chip select“ signál, obvykle aktivní v nízké úrovni (log. 0) po dobu probíhající komunikace. Jakmile se na tomto pinu objeví nízká úroveň, zařízení poslouchá příkaz přicházející od nadřazeného zařízení, a pokud je požadavek validní, odešle následně žádaná data. Jeden z hlavních požadavků na hledaný dekodér tak byl, aby aktivní úroveň vybraného výstupu byla logická 0 (nízká). Dalším požadavkem byla možnost dekodér deaktivovat, tj. aby nebyl ani jeden výstup aktivní nezávisle na stavu adresní sběrnice. Vzhledem k tomu, že mnoho budičů sběrnic, převodníků logických úrovní, čítačů, posuvných registrů apod. těmito signály disponují, existoval předpoklad, že dekodér s touto funkcí bude na trhu rovněž dostupný.

Hledání vhodného dekodéru netrvalo dlouho a volba padla na typ 74HC138. Je to dekodér 1 z 8, tedy má 3-bitovou adresní sběrnici a pomocné vstupy, kterými je možné výstup aktivovat i deaktivovat. Právě na tyto vstupy jsou vhodně přivedeny signály pro výběr konkrétní sensorové desky. Výhodou verze 74HC138 je podpora CMOS logických úrovní oproti verzi 74HCT138, která pracuje výhradně s pěti voltovou logikou. Podle potřeby tak je možné dekodér připojit na 3,3 V nebo 5 V napájecí větev. Použití dekodéru s osmi výstupy se ukázalo jako vhodný kompromis, neboť samotný dekodér má menší rozměry a v případě potřeby použití více sensorů na jedné desce je možné použít další dekodér. Pro splnění zadání musí být možné v každé ose připojit minimálně tři desky. Systém proto musí být dimenzovaný tak, aby bylo možné připojit i tři desky, pokud všechny využívají dva dekodéry pro obsluhu všech osazených sensorů. Tímto faktem byl určený minimální potřebný počet signálů pro výběr jednotlivých desek v jedné ose, to jest šest [11].

Jelikož může být k testovací platformě v budoucnu připojovaných mnoho různých desek osazených jinými senzory, i např. novější verze již starších desek, anebo dokonce různé verze stejné desky současně, bylo nutné zvážit rizika a možnosti dalšího rozvoje aplikace. Některé desky mohou být navrženy univerzálně pro osazení odlišnými senzory. Navíc každý senzor vyžaduje jiný typ komunikačního rámce. Z těchto skutečností vyplývá, že před každým spuštěním jakéhokoliv testu by byl vyžadovaný rozsáhlý proces manuálního nastavení, kde se nachází jaká deska, s jakými senzory a na kterých adresách tyto senzory jsou. Na základě inspirace z průmyslových automatů, které disponují funkcí autodetekce a autokonfigurace připojených modulů, byla na každou sensorovou desku přidělaná malá EEPROM paměť AT25640B s kapacitou 64 kilobitů, samozřejmě s SPI rozhraním, pevně umístěna na adresu 0. Tato paměť má uchovávat informace o typu a verzi desky, počtech osazených nebo připojitelných sensorů a typech sensorů na jednotlivých adresách, aby mohl řídicí procesor sám zvolit potřebný ovladač a další konfigurační či uživatelské parametry. Po zapnutí by tak měl být systém schopný sám zmapovat připojené desky a provést většinu počátečních konfiguračních procedur bez potřeby zásahu obsluhy. Najde-li řídicí procesor připojenou desku, která může být osazená více různými senzory, bude zásah obsluhy nevyhnutný. Až se dokončí proces inicializace všech připojených sensorů, bude po obsluze požadovaný plán a parametry testu, jenž se má provést. Jakmile obsluha spustí test, měla by testovací platforma pracovat již zcela samostatně [12].

V této fázi už byly téměř všechny technické detaily jasné a čísla konkrétní, ale přeci jenom zůstával ještě jeden problém nevyřešený. Každá deska musí být připojena právě k jednomu z šestice signálů pro aktivaci dané desky a současně žádný z těchto signálů nesmí být připojený k více než jedné desce. Buď by musela být každá deska navržena na konkrétní pin, což by opět omezilo univerzálnost celé platformy, anebo by každá deska musela obsahovat jakýsi selektor. Tato varianta by ovšem vyžadovala prostor, který je příliš cenný a současně by vytvářela prostor k chybě způsobené lidským faktorem (tedy např. by byly dvě desky připojené k jednomu signálu), což by anulovalo celé měření. Finální řešení je velice jednoduché a přitom vysoce efektivní.

Předcházející kapitulu přehledně sumarizuje blokové schéma sensorové desky:

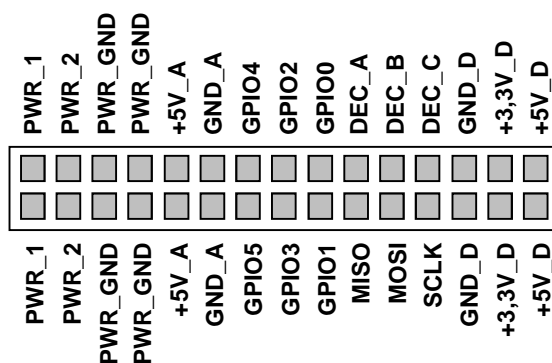


IMU sensor board block diagram

Obrázek 3.6 Blokové schéma senzové desky (ilustrační)

Problém s připojováním sensorových desek ke správným signálům, jak je zjevné z blokového schématu, se podařilo vyřešit velice elegantně, kdy jeden nebo dva krajní signály, vedoucí od předchozího stupně, se na každé desce vyvedou k osazeným dekodérům a ostatní signály, které jsou pouze průchozí, se posunou znovu ke kraji na straně druhého konektoru pro připojení dalších desek.

Když byl návrh sensorových desek ukončený a již byl počet potřebných napájecích a signálových vodičů jednoznačný a fixní, byl navržen konektor propojující hlavní řídicí desku se sensorovými deskami a jeho zapojení. Zapojení konektoru je následovné (obr. 3.7):



Obrázek 3.7 Zapojení konektorů spojujících základní desku a sensorové desky

Jedná se o klasické konektory s roztečí 2,54 mm v provedení 2x15 kontaktů. Výkonové kontakty jsou z důvodu rezervy zdvojené. Kontakty označené PWR_1 a PWR_2 jsou výkonové rozvody dimenzované pro napětí až ± 30 V stejnosměrných. PWR_GND je zemnicí vedení vyhrazené pro výkonové obvody, aby nedocházelo k rušení ostatních částí. Kontakty označené +5 V_A a GND_A jsou další oddělený okruh pro napájení analogových součástek. Zbývající napájecí rozvody – digitální, využívají piny s označením +5 V_D, +3,3 V_D a GND_D.

Všechna zemnicí vedení jsou centrálně propojená na základní desce a nesmí být spojována na žádné sensorové desce!

Signály MISO, MOSI a SCLK jsou základní signály SPI sběrnice. DEC_A, DEC_B a DEC_C jsou signály adresní sběrnice, pomocí kterých se přepínají výstupy dekodérů na sensorových deskách.

Signály zde označené jako GPIO0-5 mohou být potenciálně použité i jako vstupy, ale jejich hlavní smysl je právě pro aktivaci a deaktivaci výstupů dekodérů na jednotlivých sensorových deskách. **Vždy může být aktivní nanejvýš jeden!**

3.2.3 Výběr procesoru

Ačkoli se může volba procesoru zdát triviální záležitostí, protože pro tuto součástku byly určené samostatné požadavky, je procesu výběru této součástky, která je srdcem celé platformy a udržuje ji při životě, věnovaná samostatná kapitola. Seznam základních požadavků na použitý procesor je v kapitole 2.2 (na straně 12). Tyto základní nároky ještě doplňovaly interní firemní směrnice, které vyselektovaly tři možné výrobce této součásti. Nároky se tak ještě více stupňovaly.

Pro vývoj aplikace s mikroprocesorem ovšem pouhý procesor nestačí. Aby aplikace začala vykazovat nějaké známky života, je potřeba procesor nejdříve naprogramovat. K tomuto účelu je možné použít bootloader, který je obvykle do procesoru taky nejdříve nutné nějakým způsobem dostat. Přesto jsou na trhu dostupné procesory již s integrovaným bootladerem. Častějším způsobem však je vyvedení programovacího rozhraní jako např. JTAG, JLink apod., které umožňují aplikaci během vývoje i pohodlněji ladit. Pro komunikaci s procesorem přes tato rozhraní je ale potřebný programátor. Tyto programátory něco stojí a případné výdaje k jejich pořízení je potřeba při rozhodování uvažovat taky!

Mimo toho, jak dostat kód z počítače do procesoru, je ještě nutné zvážit vývojové prostředky na straně počítače. Pro jednoduché programy jednodušších, například 8-bitových mikroprocesorů sice postačí i obyčejný textový editor, jenž je součástí každého operačního systému, ale pro vývoj ucelených a složitějších aplikací je vhodné využít specializované IDE (z angl. Integrated Development Environment) aplikace. Ty obsahují šikovné funkce, počínaje jednoduchým barevným zvýrazňováním syntaxe, až po našeptávání nebo automatické doplňování, které programátora v reálném čase, během psaní kódu, informuje o vazbách na jiné moduly, funkce, třídy apod.

Součástí těchto integrovaných vývojových prostředí (IDE) často jsou i překladače, potřebné pro přeložení kódu do binární podoby srozumitelné programovanému procesoru. Některé překladače jsou volně dostupné, jako např. GCC, jiné proprietární a z toho důvodu často zpoplatněné. Ve výsledku tak může být pro potřeby vývoje zvoleného procesoru potřeba dokoupit ještě i softwarové vybavení pro psaní a překlad vyvíjené aplikace. Tyto systémy nejsou nijak právně regulované, takže záleží na každém výrobcu, zda umožní programátorům využít libovolné vývojové prostředí, překladač a programátor, nebo je přinutí používat jeho proprietární technologie, obvykle placené.

Dostupnost vývojových prostředků tak byla dalším kritériem v procesu selekce použitého procesoru. Mezi tyto vývojové prostředky ještě patří i dostupnost a cena vývojových kitů pro rychlé seznámení s vyvíjeným procesorem. V oblasti profesionálního vývoje elektroniky patří tyto desky mezi nepostradatelné pomůcky vývojářů. Obvykle obsahují integrovaný programátor i případnou licenci k vývojovému prostředí, a tak je možné si rychle vyzkoušet možnosti zvoleného procesoru i práci s vývojovým prostředím, aniž by bylo potřeba nejdříve pracně navrhovat vlastní desku a následně zjišťovat, je-li problém v návrhu zapojení, vadná některá součástka, anebo špatně napsaný kód při prvních pokusech o oživení vlastního výtvaru.

Většina zde zmíněných parametrů, včetně těch výchozích, byla začleněná do vyhledávání vhodného procesoru a výsledek zpracovaný do přehledné tabulky k definitivní volbě procesoru, jenž se pro řízení vyvíjené aplikace použije.

Tabulka 3.2 Výsledek vyhledávání použitelných procesorů

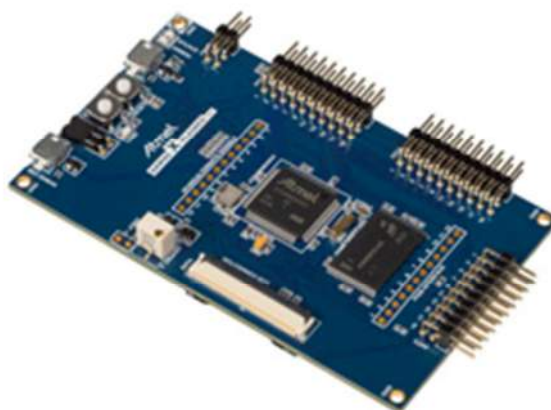
Výrobce	Model	Architek.	Pouzdro	Frekv.	Flash	RAM	UART	SPI	USB	Cena	Rozsah tepl	Vývojová deska
		[bit]		[MHz]	[kB]	[kB]				< [\$]	[°C]	
Atmel	AT32UC3B0512	32	TQFP-64	60	512	96	3	4	Full Speed	10	-40 - +85	EVK1104 (250\$)
Atmel	AT32UC3C2512C	32	TQFP-64	66	512	68	4	5	Full Speed		-40 - +85	
Atmel	AT32UC3B1512	32	VQFN-48	60	512	96	2	3	Full Speed	15	-40 - +85	EVK1104 (250\$)
Atmel	ATSAM4N16B	32 (ARM)	LQFP-64	100	1024	80	6	3	ne	10	-40 - +85	
Atmel	ATSAM4SD32B	32 (ARM)	LQFP-64	120	2048	160	4	3	Full Speed	10	-40 - +85	SAM4S (99\$)
Atmel	ATSAM4SD32C	32 (ARM)	LQFP-100	120	2048	160	4	3	Full Speed	10	-40 - +85	SAM4S (99\$)
Atmel	ATSAM4S16B	32 (ARM)	LQFP-64	120	1024	128	4	3	Full Speed	10	-40 - +85	SAM4S (99\$)
Freescale	S912XHZ512F1VAG	16	LQFP-112	25	512	12	2	3	ne	20	-40 - +85	
Freescale	MC9S12DP512CPVE	16	LQFP-112	25	512	14	2	3	ne	30	-40 - +85	
Freescale	MK22DN512VLH5	32 (ARM)	LQFP-64	50	512	64	4	2	Full Speed	10	-40 - +105	TOWER
Freescale	MK11DN512VLK5	32 (ARM)	LQFP-80	50	512	64	4	2	ne	10	-40 - +105	
Freescale	K21P80M50SF4	32 (ARM)	LQFP-80	50	512	64	4	2	Full Speed	10	-40 - +105	
Freescale	MK21DN512VLK5	32 (ARM)	LQFP-80	50	512	64	4	2	Full Speed	10	-40 - +105	
Freescale	MK10DN512VLK10	32 (ARM)	LQFP-80	100	512	128	4	2	ne	15	-40 - +105	
Freescale	MK20DN512VLK10	32 (ARM)	LQFP-80	100	512	128	4	2	Full Speed	15	-40 - +105	FRDM-K20D50M (20\$)
Freescale	MK22FN1M0VLH12	32 (ARM)	LQFP-64	120	1024	128	3	1	Full Speed	15	-40 - +105	TOWER
Freescale	MK22FN1M0VLK12	32 (ARM)	LQFP-80	120	1024	128	4	2	Full Speed	15	-40 - +105	TOWER
TI	MSP430F6659	16	LQFP-100	20	512	66	2	2	Full Speed	15	-40 - +85	
TI	MSP430F6459	16	LQFP-100	20	512	64	2	2	ne	15	-40 - +85	
TI	MSP430F5659	16	LQFP-100	20	512	66	2	2	Full Speed	15	-40 - +85	
TI	MSP430F5359	16	LQFP-100	20	512	66	2	2	ne	15	-40 - +85	

Předcházející tabulka 3.2 je pouze částí původní tabulky s přehledem řady dalších vybraných procesorů. Přesto je vidět, že ne všechny procesory disponují USB rozhraním. Tím se výběr ještě zmenšuje. Dalším požadavkem byla kapacita programové paměti alespoň 1 MB a datové RAM alespoň 128 kB. Těmito kritériím vyhovuje pouhých šest řádků tabulky. Postupnou eliminací procesorů, které zadané požadavky nespĺňují, padla finální volba na procesor od firmy Atmel model ATSAM4SD32C (vyznačený zeleným řádkem). Následující tabulka 3.3 ještě stručně sumarizuje požadavky kladené na vybíraný procesor, a jak tyto požadavky splňuje ten vybraný.

Parametr	Požadavek	ATSAM4SD32C
architektura	16/32 bitů	32 bitů (ARM jádro)
Frekvence jádra	Min. 80 MHz	Max. 120 MHz
Programová paměť	Min. 1 MB	2 MB
Uživatelská paměť	Min. 128 kB	160 kB
SPI rozhraní	1x Master, 1x Slave	2x plně konfigurovatelné
USB	Min. Full Speed (12Mbit/s)	Full Speed (12Mbit/s)
Pracovní teplotní rozsah	-40 °C – +80 °C	-40°C – +85°C
Skladovací teplotní rozsah	-55 °C – +120 °C	-60 °C – +150 °C
Pouzdro	Vývodové (ne BGA apod.)	LQFP

Tabulka 3.3 Srovnání žádaných parametrů a parametrů zvoleného procesoru ATSAM4SD32C

Mimo to, že zvolený procesor dosahuje nejlepších parametrů ve srovnání s ostatními procesory, uvedenými v tabulce, obsahuje taky 16 kB ROM paměť s integrovaným bootladerem, který umožňuje pohodlně nahrávat nový program přes USB anebo UART pomocí aplikace, která je ke stažení zdarma ze stránek výrobce (<http://www.atmel.com/tools/atmelsam-bain-systemprogrammer.aspx>). Atmel nabízí zdarma rovněž své vývojové prostředí Atmel Studio s integrovaným GCC překladačem a podporou i pro procesory s jádrem architektury ARM. Pro seznámení s procesorem je k dispozici vývojový kit s označením ATSAM4S Xplained Pro osazený právě procesorem ATSAM4SD32C, který lze pořídit za cenu kolem 45\$ (podle informace na stránkách výrobce <http://www.atmel.com/tools/ATSAM4S-XPRO.aspx> k 15.5.2015). Deska obsahuje i integrovaný programátor. [13]



Obrázek 3.8 Vývojový kit ATSAM4S Xplained Pro s procesorem ATSAM4SD32C

3.2.4 Návrh základní desky

Jakmile bylo vyřešené propojení sensorových desek se základní deskou a vybrán konkrétní procesor, bylo možné přistoupit k návrhu samotné základní desky, která je stěžejním prvkem celé vyvíjené platformy.

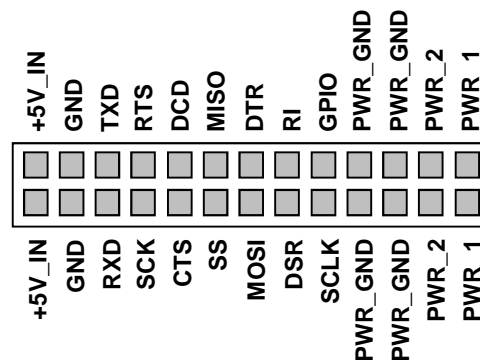
Základní deska, mimo řídicí procesor a propojení ukončených konektory pro připojení sensorových desek, musí zajistit komunikaci s externími zařízeními, jak je vyžadováno v zadání (nejedná se pouze o stroje architektury osobních počítačů), a to alespoň skrze rozhraní USB a SPI. Dále musí umožnit spínat všechny napájecí větve sensorových desek a obsahovat minimálně tři softwarově ovladatelné LED.

Nejdříve bylo nutné vyřešit napájecí rozvody a jejich spínání. Procesor ke své činnosti vyžaduje 3,3 V. Pro snížení nároků na počet externích napájecích zdrojů, byla zvolena varianta, ve které je externě deska napájena napětím 5 V, aby ji bylo možné napájet i z USB (zejména v době vývoje a ladění). Jedním ze zdrojů tak je USB konektor, další možností je připojit výkonnější zdroj přes vyvedený konektor. 5 V větev je rozdělena na větev napájející digitální obvody, na větev napájející analogové obvody oddělenou filtrem a na větev vedoucí k stabilizátoru s nízkým úbytkem napětí osazenému na desce, který na svém výstupu produkuje napětí 3,3 V. Zbývající dvě výkonové napájecí větve jsou na desce pouze rozvedené ke konektorům sensorových desek a napájecí kontakty vyvedené na konektor.

Pro zvýšení odolnosti desky před přepólováním napájecího napětí je na vstupu osazena pojistka a za ní ochranná dioda. V případě přepólování napájení by tak mělo dojít pouze k přepálení pojistky. Všechny napájecí větve jsou dále osazené varistory v případě výskytu přepětíových špiček.

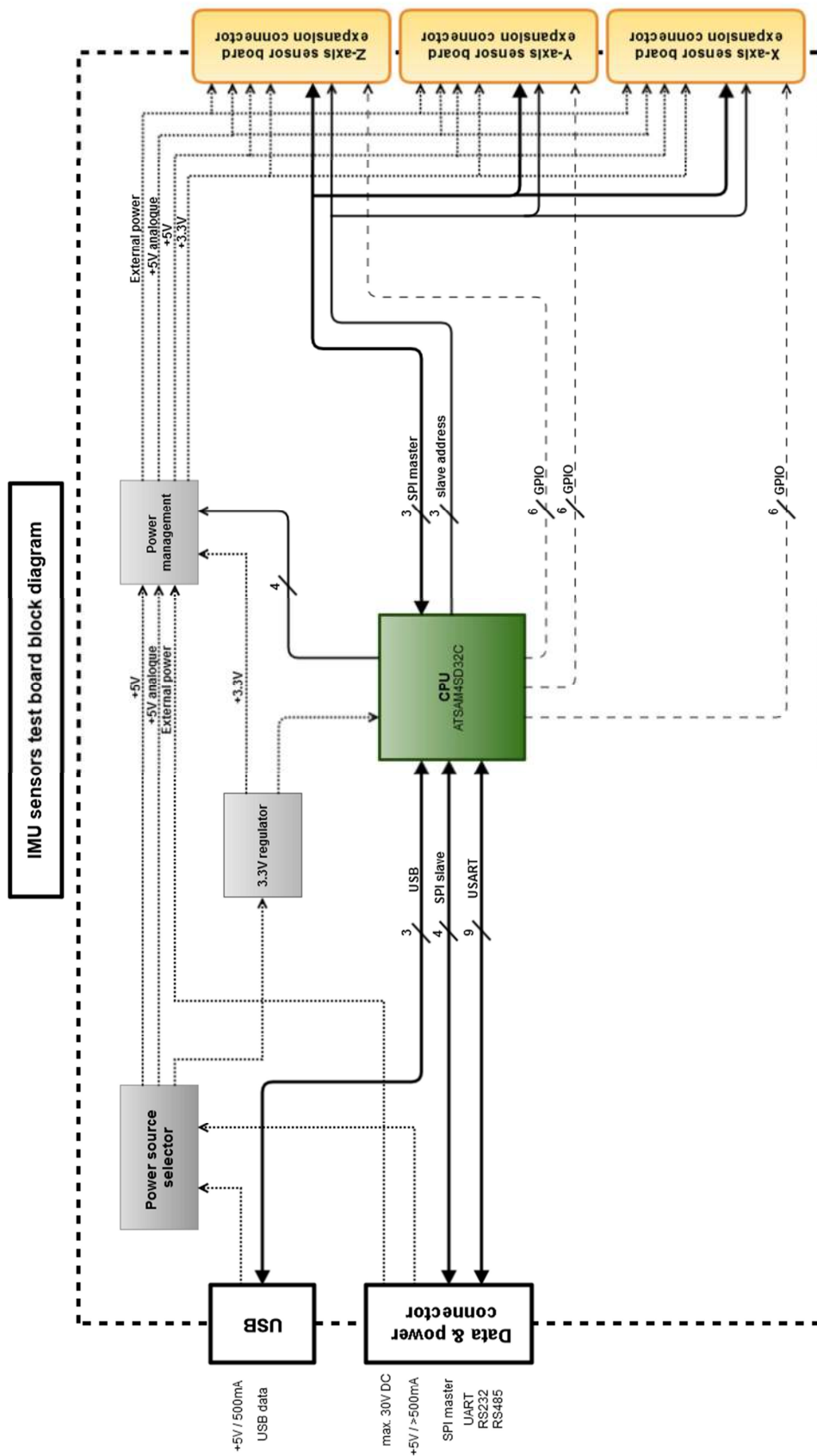
Spínání napájecích větví je realizované pomocí unipolárních tranzistorů, pouze dvě výkonové větve jsou spínané pomocí dvou samostatných relé, aby byly galvanicky oddělené od ostatních obvodů a bylo tak možné připojit i záporné napětí.

Základní deska obsahuje jeden centrální konektor, na kterém jsou vyvedené kontakty napájecích větví (5 V a dvě výkonové větve) i potřebné komunikační signály.



Obrázek 3.9 Zapojení konektoru pro připojení napájení a komunikaci s okolním světem

Jak je vidět, konektor obsahuje čtyři SPI signály a devět signálů pro USART se všemi modemovými signály. V případě, že tyto signály nejsou potřeba, můžou být použité jako standardní GPIO. Tuto kapitolu stručně sumarizuje blokové schéma:



Obrázek 3.10 Blokové schéma řídicí desky

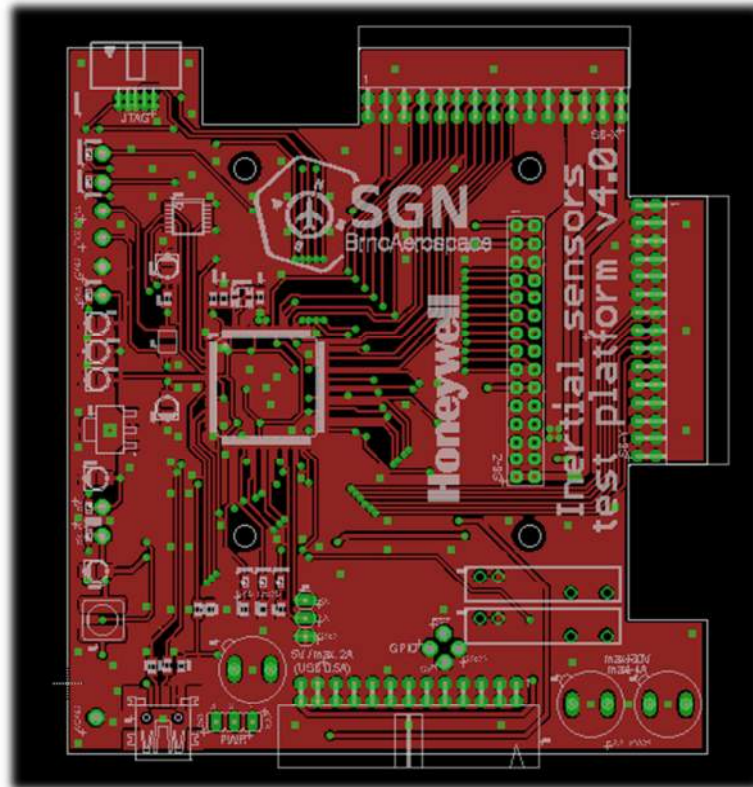
3.2.5 Konstrukce základní desky

Tato kapitola pouze velice stručně přiblíží konkrétní návrh zapojení a provedení základní desky vyvíjené platformy. Vzhledem k tomu, že všechny podstatné detaily byly rozebrány v části návrhu, je zde pouze stručně popsáno, jak se povedlo tyto požadavky zrealizovat.

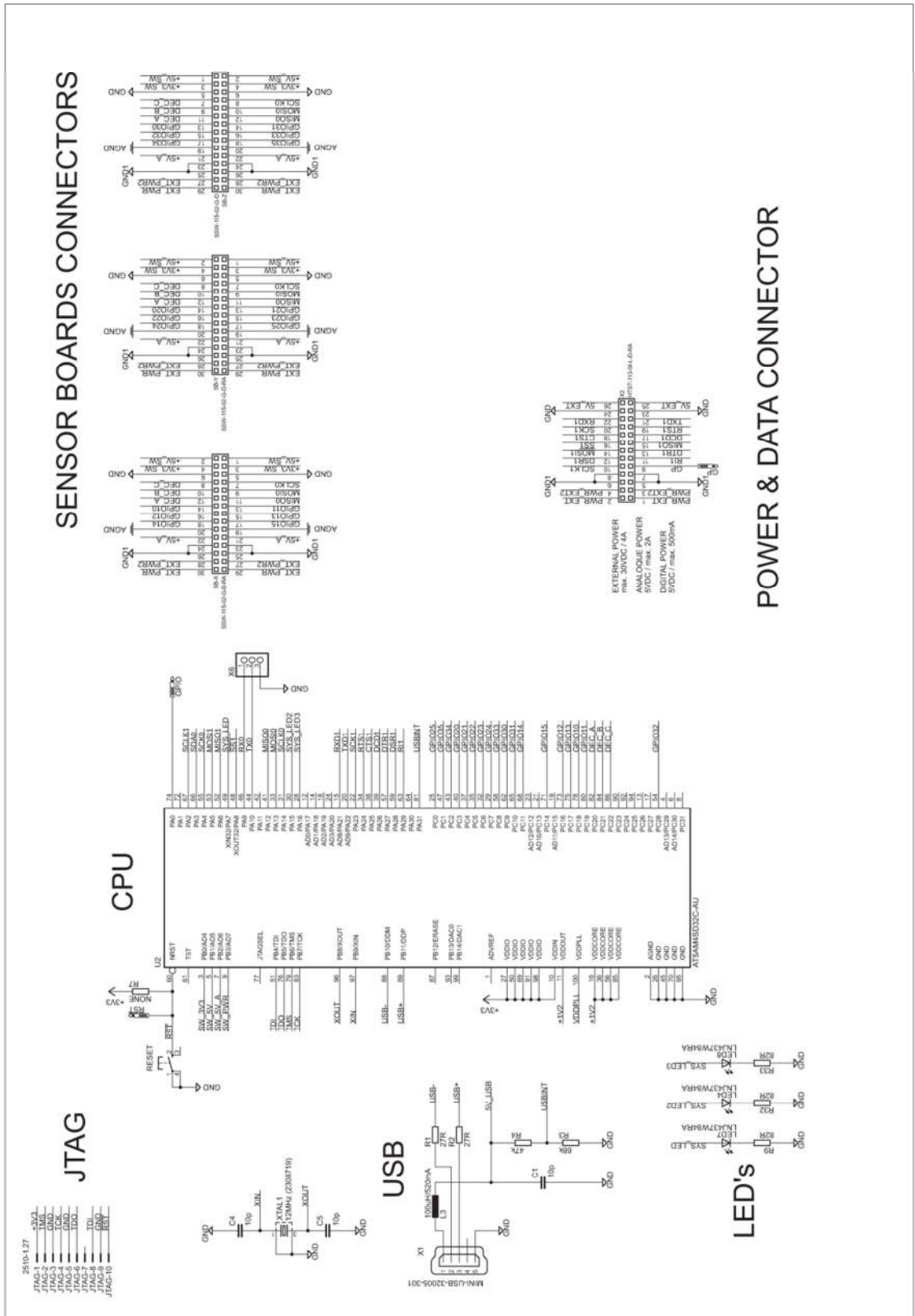
Základní deska má rozměry 90x100 mm s výřezy pro sloupky nosné konstrukce sensorových desek v ose X a Y, připojovaných ze strany. Celý návrh DPS vystačil pouze se dvěma vrstvami. Ze spodní strany desky se nachází jenom několik pasivních součástek, zejména filtrační kondenzátory napájecích větví procesoru, ale i unipolární tranzistory spínající napájecí větve sensorových desek. Veškeré ostatní součástky, včetně stabilizátoru a filtrů, jsou umístěny na vrchní straně desky.

Procesor umístěný trochu nalevo od středu rozděluje návrh desky na tři části. Spodní část desky slouží k připojení napájení a datové komunikaci s externími zařízeními. Podél levé strany desky jsou umístěny napájecí obvody pro 5 V analogové i digitální rozvody, 3,3 V rozvody a vyvedené jsou i měřící body pro měření 1,2 V větve, kterou využívá jádro procesoru a 1,2 V větve pro fázový závěs zabezpečující taktovací frekvenci procesoru. V levém dolním rohu se pak nacházejí ještě pojistky a spínací relé výkonových napájecích větví. Část desky vpravo a nahoře od procesoru slouží k rozvodu všech potřebných signálů pro komunikaci se sensorovými deskami.

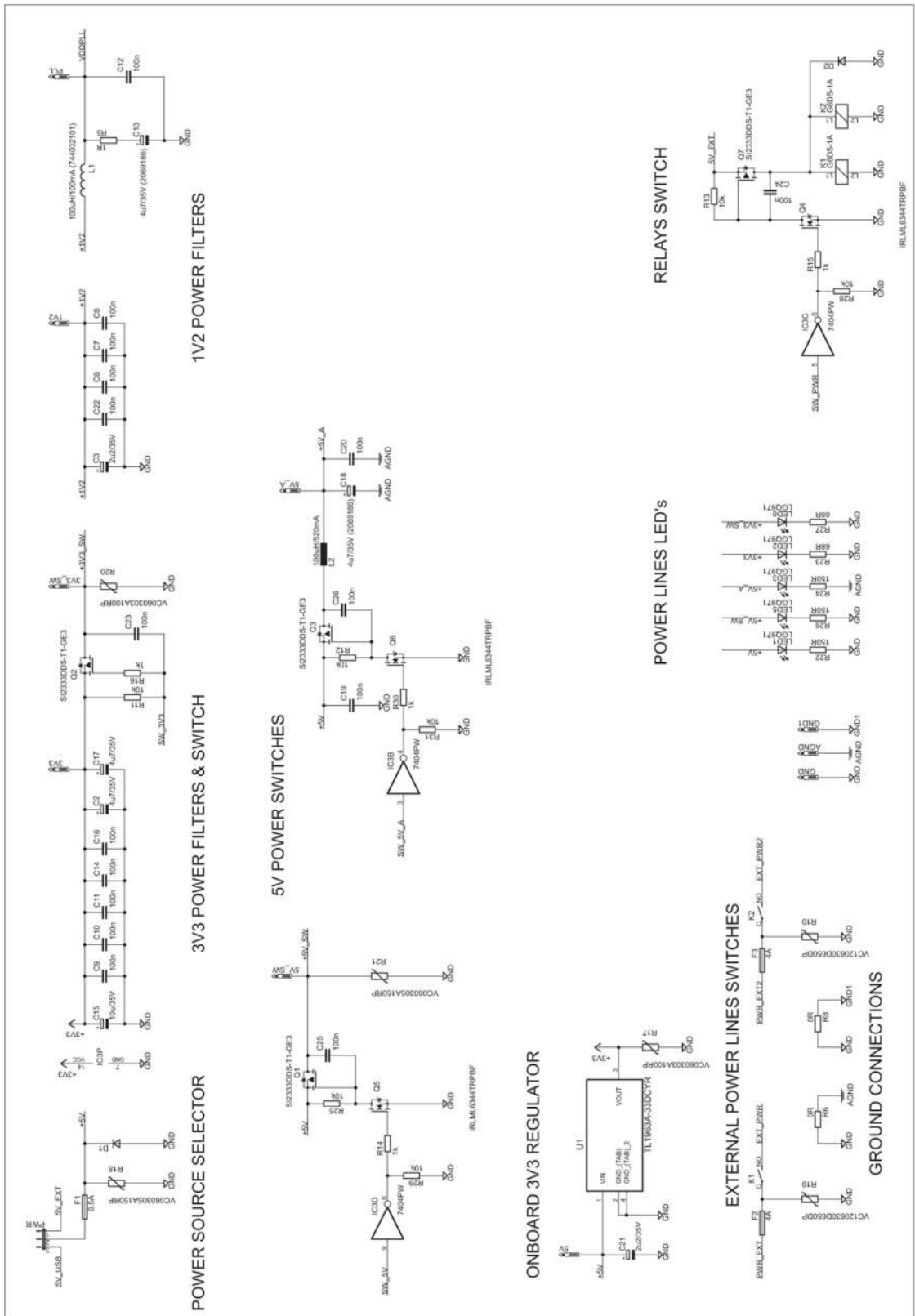
Návrh ještě obsahuje JTAG konektor umístěný v levém horním rohu a vedle něj ze spodní strany resetovací tlačítko. Tři uživatelské LED jsou vyvedené směrem dolů od procesoru a vlevo od nich je umístěný ještě 3-pinový konektor UART-u využívaného integrovaným bootloaderem pro případ, že by selhalo programování přes USB.



Obrázek 3.11 Pohled shora na motiv a osazení DPS základní desky



Obrázek 3.12 Schéma zapojení signálových rozvodů základní desky



Obrázek 3.13 Schéma zapojení napájecích rozvodů základní desky

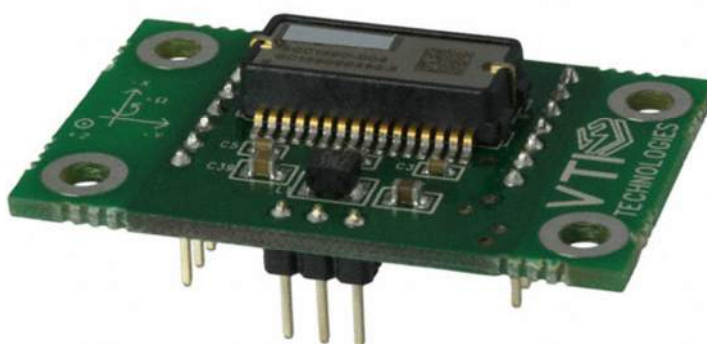


Obrázek 3.14 Pohled na hotovou základní desku - prototyp

3.2.6 Konstrukce první sensorové desky

Tato podkapitola navazuje na dříve popsany základní návrh sensorové desky a blíže popisuje konkrétní návrh první kompletní sensorové desky osazené senzory SCC1300-D04 od japonského výrobce Murata. Jedná se o tříosý akcelerometr a jednoosý gyroskop. Výrobce zvolil technologii dvou samostatných ASIC (Application Specific Integrated Circuit) čipů v jednom pouzdru, které sdílí základní signály SPI sběrnice MISO, MOSI a SCLK, ale každý má vyvedený vlastní „chip select“ pin. Aby byla práce s tímto senzorem ještě zajímavější, používá každý z integrovaných obvodů jiný typ datového rámce pro komunikaci po SPI.

Pro první sensorovou desku byl tento senzor použit zejména z toho důvodu, že se jich ve firmě nacházelo hned několik z předcházejícího projektu a i díky tomu, že dostupné moduly jsou ve formě vhodné k experimentování, jak je vidět z obrázku 3.15.

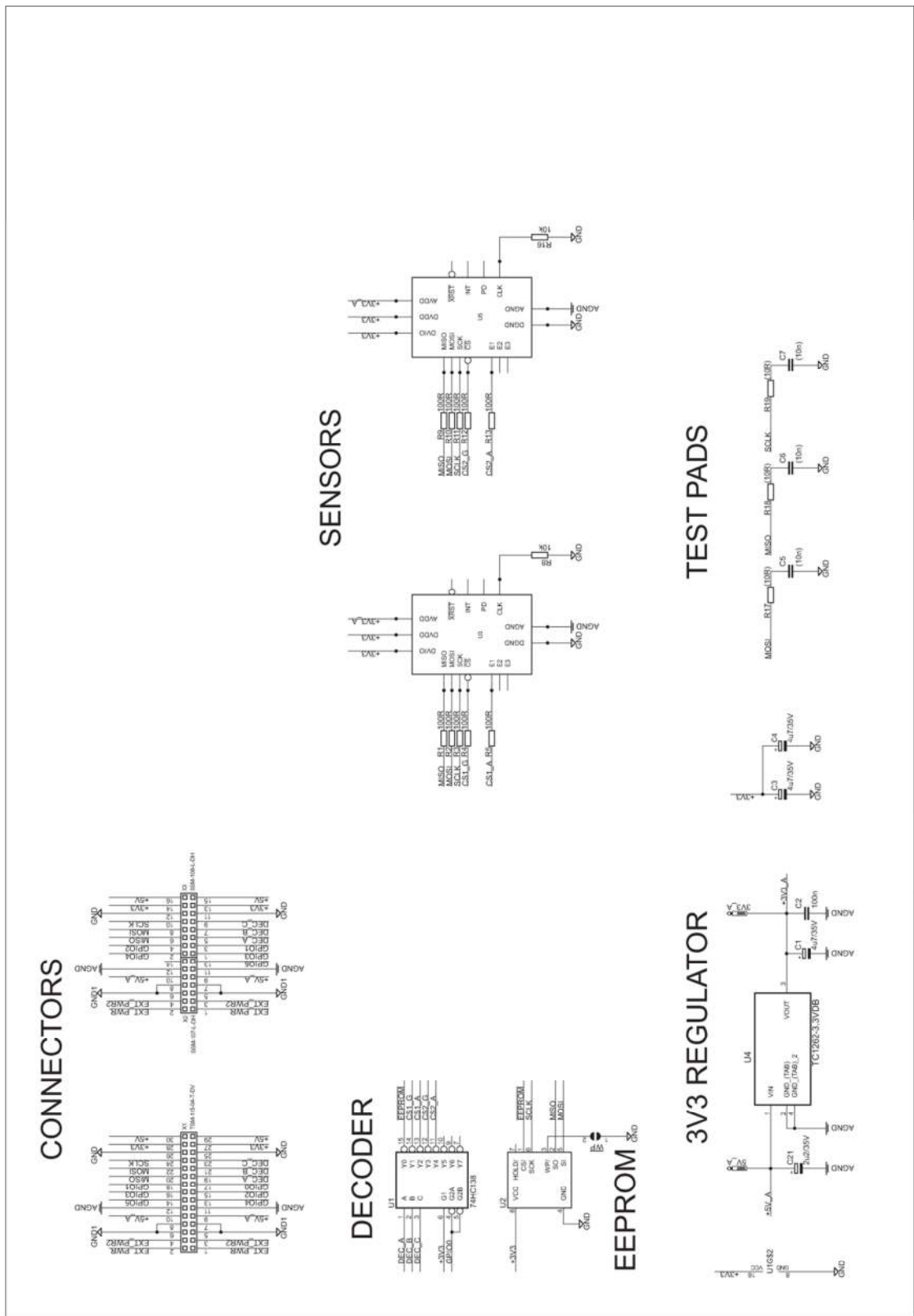


Obrázek 3.15 Prototypovací modul osazený senzorem SCC1300-D04

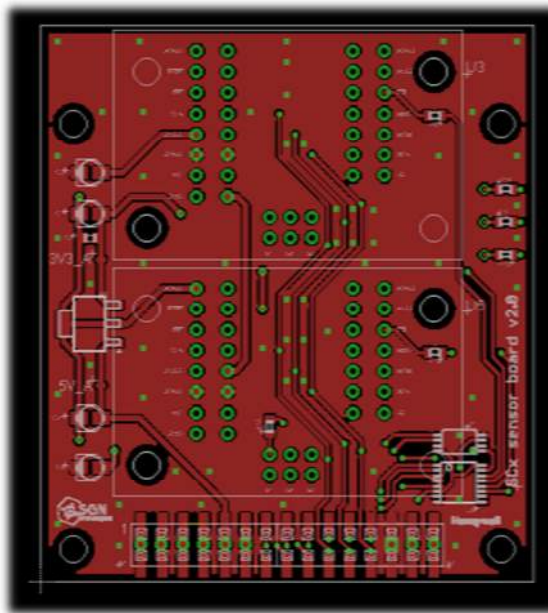
Digitální část tohoto senzoru ke své činnosti vyžaduje 3,3 V napětí. Analogová část pracuje s 5 V napájením. Modul se senzorem je ale osazený měničem z 3,3 V na 5 V, který není možné obejít, proto musel být na každou desku přidán stabilizátor napětí, připojený k rozvodu 5 V pro analogové obvody produkující na svém výstupu napětí 3,3 V. Senzor i modul má oddělené analogové a digitální země, čeho bylo s výhodou využito a sensorová deska tak obsahuje dva oddělené zemnicí okruhy. **Zemnicí větve se na sensorových deskách nesmí za žádných okolností spojit!**

Protože se jedná o první prototypovou desku a riziko, že se něco nepodaří nebo časem shoří, je relativně vysoké, nebyly senzory k sensorové desce připojené napevno. Jelikož moduly mají vývody vyvedené na standardní kolíkovou lištu s roztečí 2,54 mm, byly sensorové desky opatřené protikusy, dutinkovými lištami, pro snadné připojování/odpojování modulů se senzory.

Návrh samotné desky je velice jednoduchý, jak je vidět z následujícího schématu.

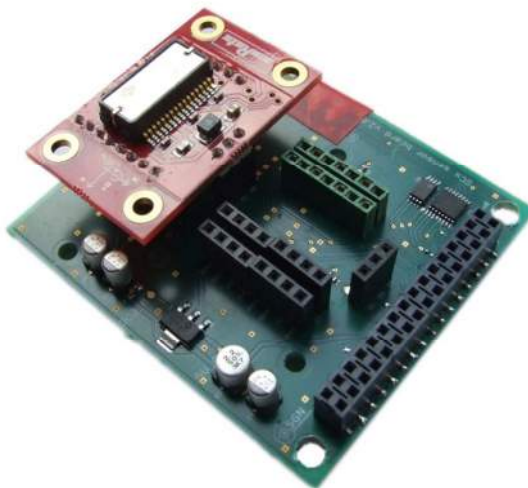


Obrázek 3.16 Schéma první sensorové desky osazené senzory SCC1300-D04



Obrázek 3.17 Pohled shora na motiv a osazení DPS první sensorové desky

Jak je vidět ze schématu i z návrhu desky, konstrukce je velice jednoduchá. Na dolní hraně desky jsou osazené dva konektory s SMT vývody. Jeden ze spodní strany – „samec“, zajišťující spojení s předcházející deskou nebo základní deskou. Z vrchní strany druhý – „samice“, sloužící k připojení dalších desek. Na levé straně je umístěný regulátor produkující 3,3 V pro analogovou část senzorů. V pravém dolním rohu se nachází dekodér a EEPROM paměť.



Obrázek 3.18 Pohled na hotovou sensorovou desku se senzorem SCC1300-D04 - prototyp

3.3 Software

Poslední velkou kapitolou celé vyvíjené platformy je software, který mění doposud navrženou mechaniku a hardware z těžítka na papíry na funkční celek a dodává tak smysl celému předchozímu vyvíjenému systému.

Na tuto část nebyly předem připravené požadavky. Různé funkce byly přidávány v průběhu vývoje podle toho, jak se povedlo kterou část zprovoznit, či jaké možnosti hardware i software dokázal nabídnout. Určitá vize a plány, jaké funkčnosti by finální aplikace mohla dosahovat, samozřejmě byly a z těch se při návrhu celého systému vycházelo.

Testovací procedury pro evaluaci vlastností testovaných senzorů můžou probíhat i celé dny bez přestávky. Naměřené hodnoty z připojených senzorů je potřeba sbírat alespoň sto krát za sekundu. Vzhledem k potenciálnímu počtu připojitelných fyzických senzorů, které obvykle měří ve více osách a často obsahují i integrované teplotní čidlo, potřebná kapacita pro uchovávání měřených hodnot rychle narůstá.

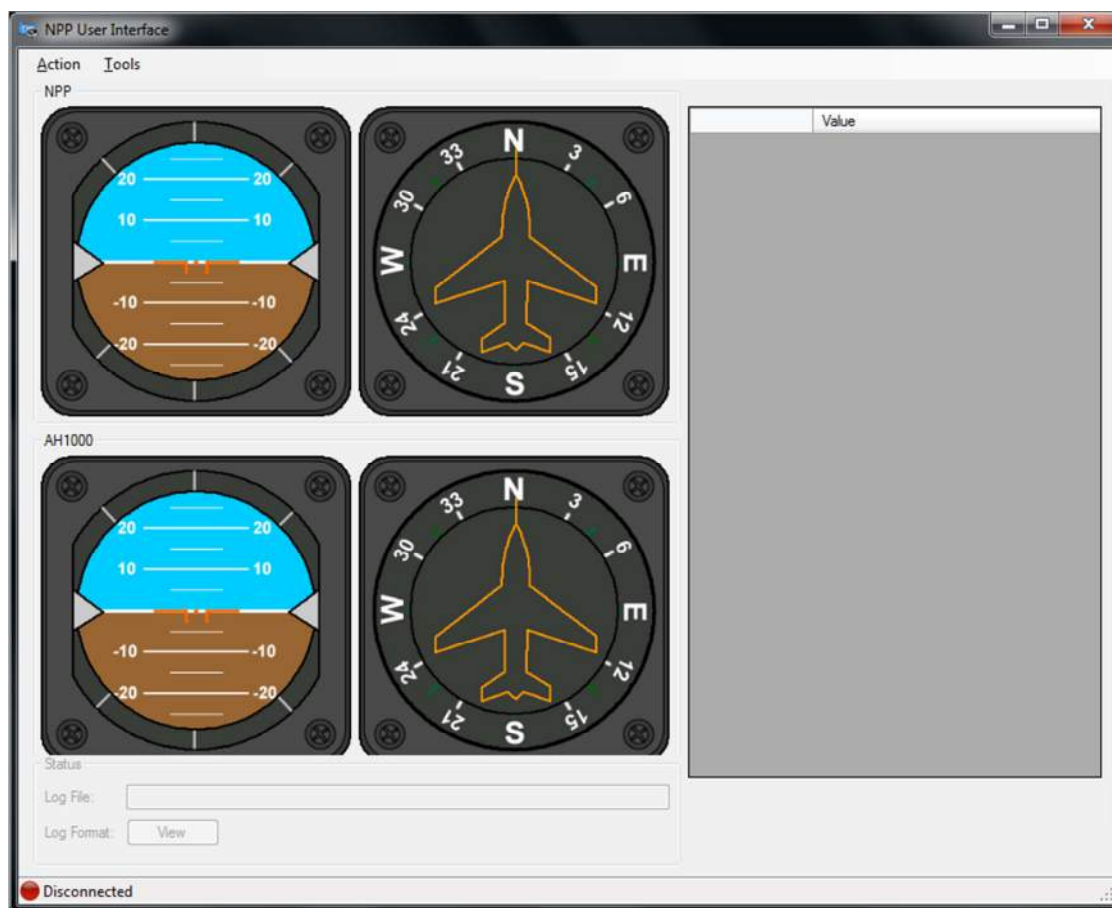
Menší příklad pro demonstraci množství přenášených dat. Pokud je vzorkovací kmitočet 100 Hz, z připojených senzorů se sbírá 20 hodnot, což je téměř nic. V případě testování tříosých akcelerometrů s teplotním čidlem je tak potřeba pouze z jednoho senzoru vytáhnout čtyři hodnoty, tedy v této úvaze je testovaných pouze pět senzorů. Pokud měřená data mají šířku 16 bitů a test probíhá pouhých deset minut, je za tuto dobu nasbíraných přes 2 MB dat.

Tato data by bylo možné ukládat do paměti umístěné na stejné desce přímo připojené k procesoru nebo je rychle odesílat ven a sbírat v jiném zařízení. Protože vyvíjenou platformu bude nutné ve výsledku před každým testem nakonfigurovat, upřesnit konfiguraci senzorů a zvolit typ a parametry testu, je potřeba v každém případě navrhnout komunikační protokol pro komunikaci mezi deskou a ovládacím počítačem a vytvořit konfigurační aplikaci na straně PC. Nakonec tak bylo zvolené jednodušší řešení a tedy, že úlohu záznamníku naměřených dat převezme externí zařízení, pro začátek tedy zejména počítač připojený přes USB rozhraní.

Na začátku vývoje softwaru bylo nutné dobře zvážit náročnost vývoje dvou souběžných aplikací (jedna pro PC, druhá pro řídicí procesor platformy), jejich vzájemného propojení, dalších doplňků, celkové časové náročnosti a dostupných časových možností. Pevným bodem plánu byl termín odevzdání této diplomové práce, proto musel být časový plán přizpůsobený tak, aby bylo možné prezentovat alespoň základní funkčnost a klíčové součásti návrhu. Proto bylo rozhodnuto, že PC aplikace se nebude vyvíjet zcela od základu, ale použije se již hotová aplikace z jiného podobného projektu a pouze se upraví v rámci potřeb.

3.3.1 PC aplikace

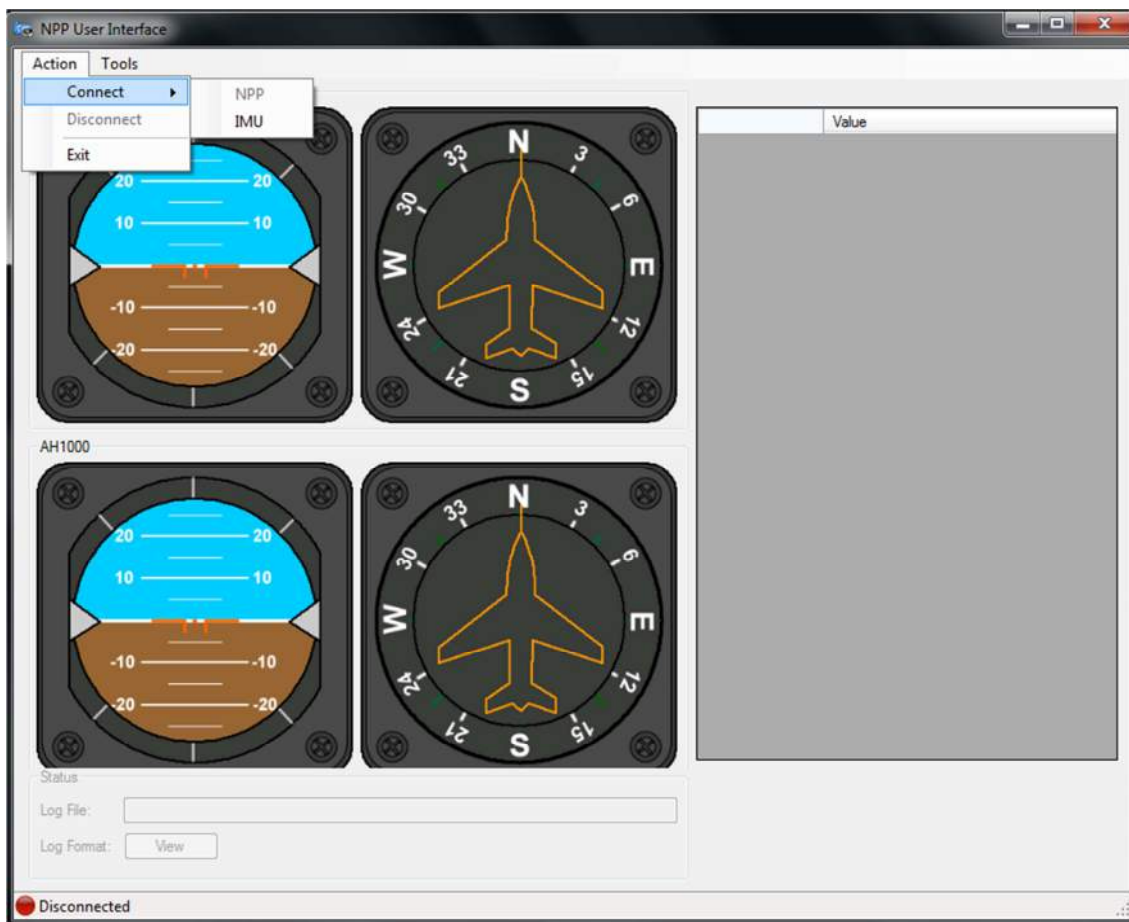
Jak bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, aplikace pro ovládací PC nebyla psaná od základu, neboť takový přístup by vyžadoval další velké množství času, který byl výrazně omezený, a prolongace nepřipadala v úvahu. Jako základ proto byla využita aplikace z jiného projektu s podobným účelem, který nese označení NPP.



Obrázek 3.19 Výchozí okno převzaté aplikace

Na předchozím obrázku je vidět úvodní okno převzaté aplikace. Aplikace je graficky poutavá a původně ji napsal člověk s velkými zkušenostmi s vytvářením těchto grafických uživatelských rozhraní (GUI), což bylo rychle poznat při pohledu na zdrojový kód aplikace. Přesto, že aplikace vypadá relativně jednoduše, je docela rozsáhlá, ale kód je celkem dobře rozdělený do jednotlivých souborů, tříd a jmenných prostorů, a tak je možné se relativně rychle zorientovat. Velikou výhodou při úpravách a dopisování kódu se ukázalo použití vývojového prostředí Visual Studio 2012, které hlídá vazby mezi objekty, proměnnými a funkcemi napříč celým projektem a dostupné vazby nabízí v našeptávači. Stejně tak šikovná funkce je kontrola syntaxe v reálném čase. Jednotlivé chyby v zápisu se tak v chybové konzoli objevovaly okamžitě a umožňovaly odhalit drobné a zbytečné, ale i ty závažnější chyby průběžně, ne až po pokusu o kompilaci.

V aplikaci je implementovaný komunikační protokol komunikující s hardwarem NPP aplikace i algoritmus kontroly správnosti přijaté zprávy a to jak z pohledu kontroly chyb během přenosu, tak ochranou proti duplicitním zprávám.



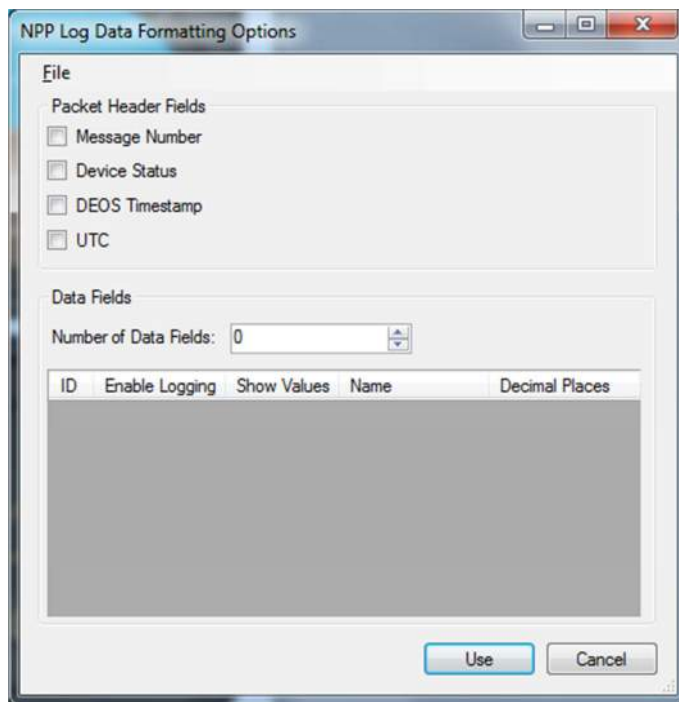
Obrázek 3.20 Původní aplikace doplněna o možnost připojení k IMU

Na obrázku 3.20 je zobrazený první krok pro připojení k hardwaru rozšířený o možnost připojení k „IMU“, což je interní označení pro tuto vyvíjenou platformu.



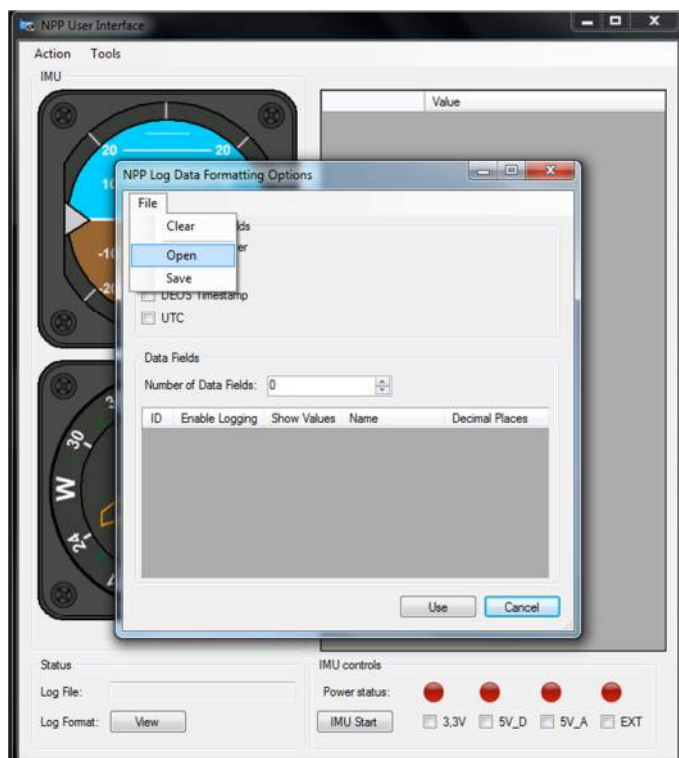
Obrázek 3.21 Varovná hláška zobrazovaná v případě problému s navázáním spojení

Aby byla aplikace uživatelsky přívětivější, jsou v ní implementované rovněž varovná a chybová hlášení, které uživatele informují o vzniklém problému se stručným popisem umožňujícím odhadnout, kde se stala chyba. Výše zobrazené chybové hlášení, obrázek 3.21, se objeví v případě problému s připojením k hardwaru IMU, tedy nejpravděpodobněji se nepodařilo otevřít spojení přes virtuální sériový port.

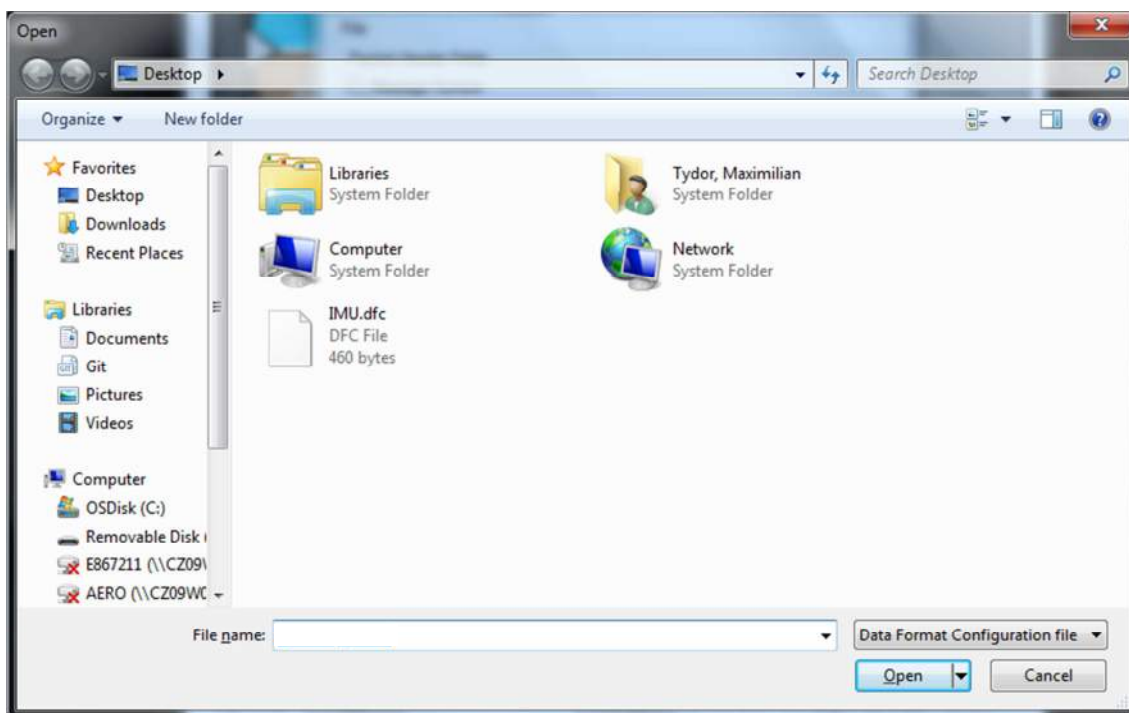


Obrázek 3.22 Dialog pro nastavení logovaných a zobrazovaných parametrů

Pokud je připojení k hardwaru úspěšné, zobrazí se dialogové okno, jako na obrázku 3.22, vyžadující manuální zadání konfigurace obsluhou. Aby nebylo nutné tuto nastavení pokaždé pracně vyplňovat, disponuje aplikace možností načtení dříve uložené konfigurace ze souboru.

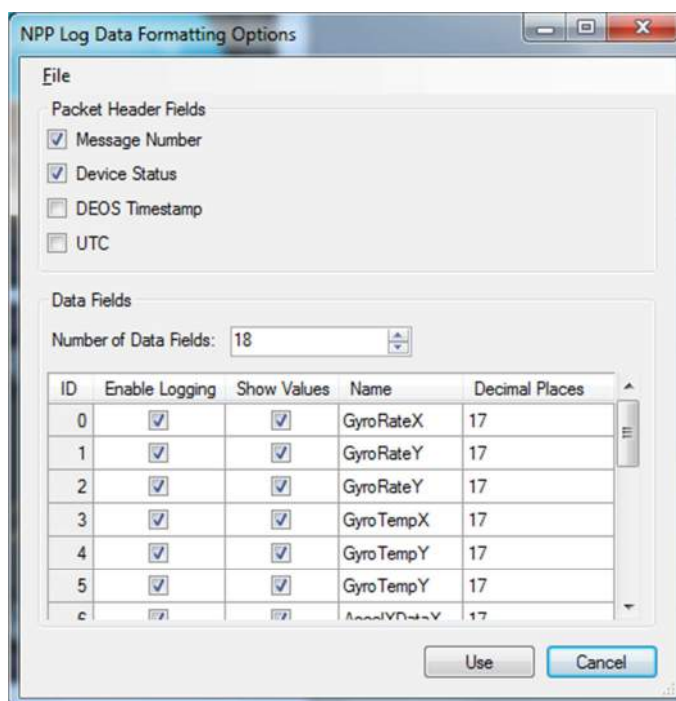


Obrázek 3.23 Možnost načtení dříve uložené konfigurace



Obrázek 3.24 Výběr souboru s uloženou konfigurací

Aplikace využívá vlastní formát konfiguračního souboru, který používá příponu *.dfc



Obrázek 3.25 Konfigurace načtená ze zvoleného IMU.dfc souboru

Z obrázku 3.25 vyplývá, že pro záznam dat z aktuální konfigurace připojených senzorů je potřeba osmnáct datových polí. Logovat se bude číslo přijaté zprávy a status zařízení. Všechna osmnáct datových polí se bude ukládat do logovacího souboru a současně zobrazovat v grafickém rozhraní.

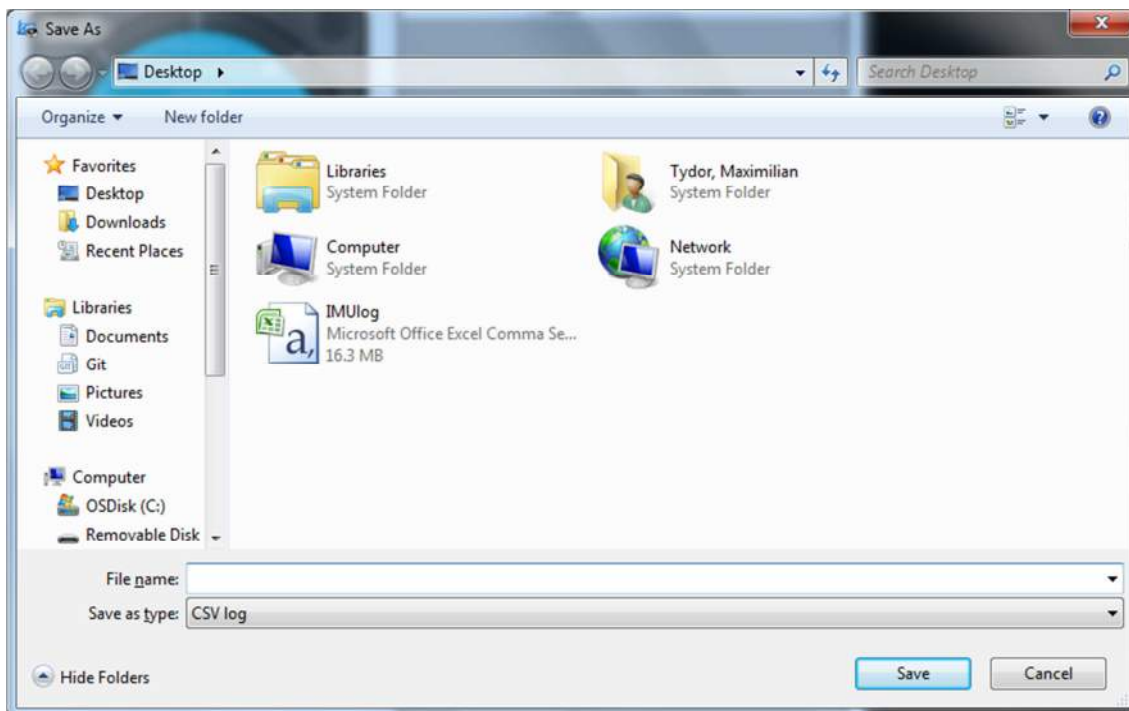
Jedním z plánovaných cílů pro navrhovanou platformu je právě funkce autokonfigurace, která by tento krok měla co nejvíce automatizovat a po obsluze vyžadovat vyřešení pouze nejednoznačných nastavení. V současnosti je totiž nutné ručně nastavit počet přijímaných datových polí. Jakmile se liší hodnota nastavená v tomto okně s počtem datových polí přijatým s prvním rámcem, zobrazí se chybové hlášení a aplikace se zastaví.



Obrázek 3.26 Konfigurace senzorů použita pro dokumentaci v této práci

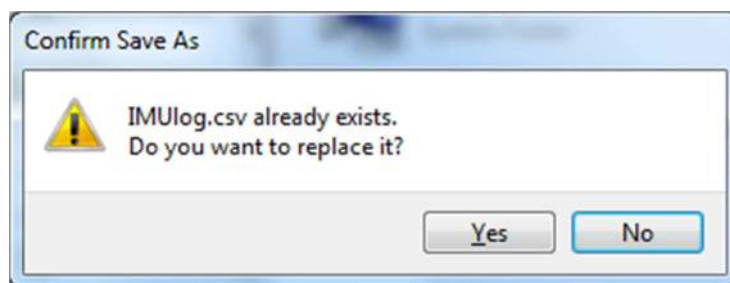
Na obrázku 3.26 je zobrazena konfigurace použitá při přípravě podkladů pro tuto práci. V době psaní této práce byly k dispozici pouze dvě osazené sensorové desky. Senzorů sice bylo k dispozici víc, ale napájecí USB port nezvládal špičky vznikající při spínání víc jak tří senzorů, přitom jejich normální odběr je pouze kolem 30 mA, tedy teoreticky by mělo být možné jich připojit alespoň deset.

Uvnitř pouzdra každého senzoru se nachází dva samostatné čipy. Jeden čip obsahuje tříosý akcelerometr a teplotní čidlo, druhý čip jednoosý gyroskop, rovněž s teplotním čidlem. Z jednoho senzoru tak je vyčítaných celkem šest hodnot. Pro tři senzory je tudíž celkový počet hodnot osmnáct.

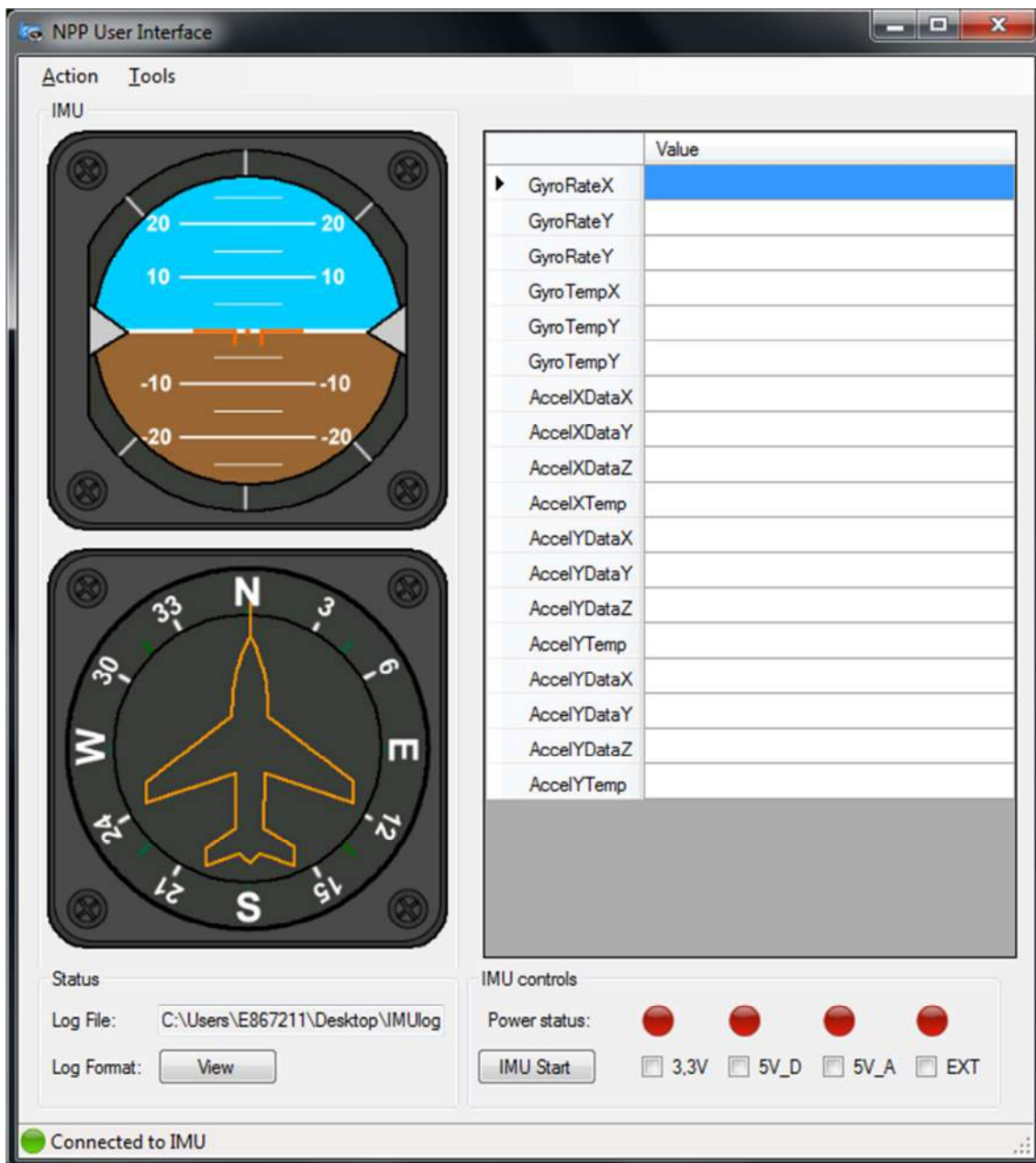


Obrázek 3.27 Okno pro zvolení logovacího souboru

Po potvrzení konfiguračního dialogu se zobrazí další, tentokrát se jedná o volbu souboru, do kterého se budou přijaté hodnoty ukládat. K ukládání získaných dat se používá, pro svou jednoduchost oblíbený, formát CSV.

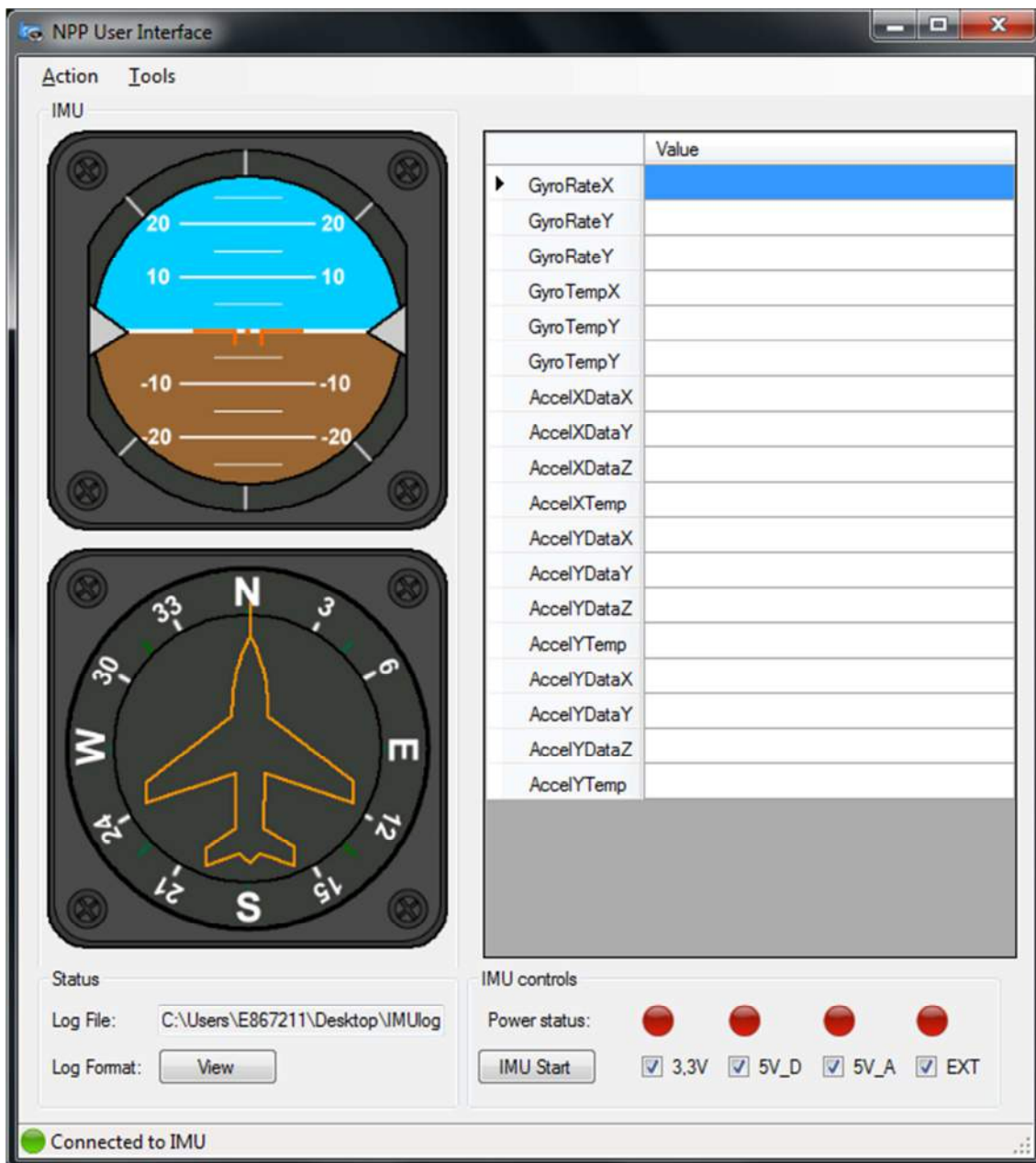


Obrázek 3.28 V případě, že se zvolí již existující soubor, objeví se typické varovné hlášení



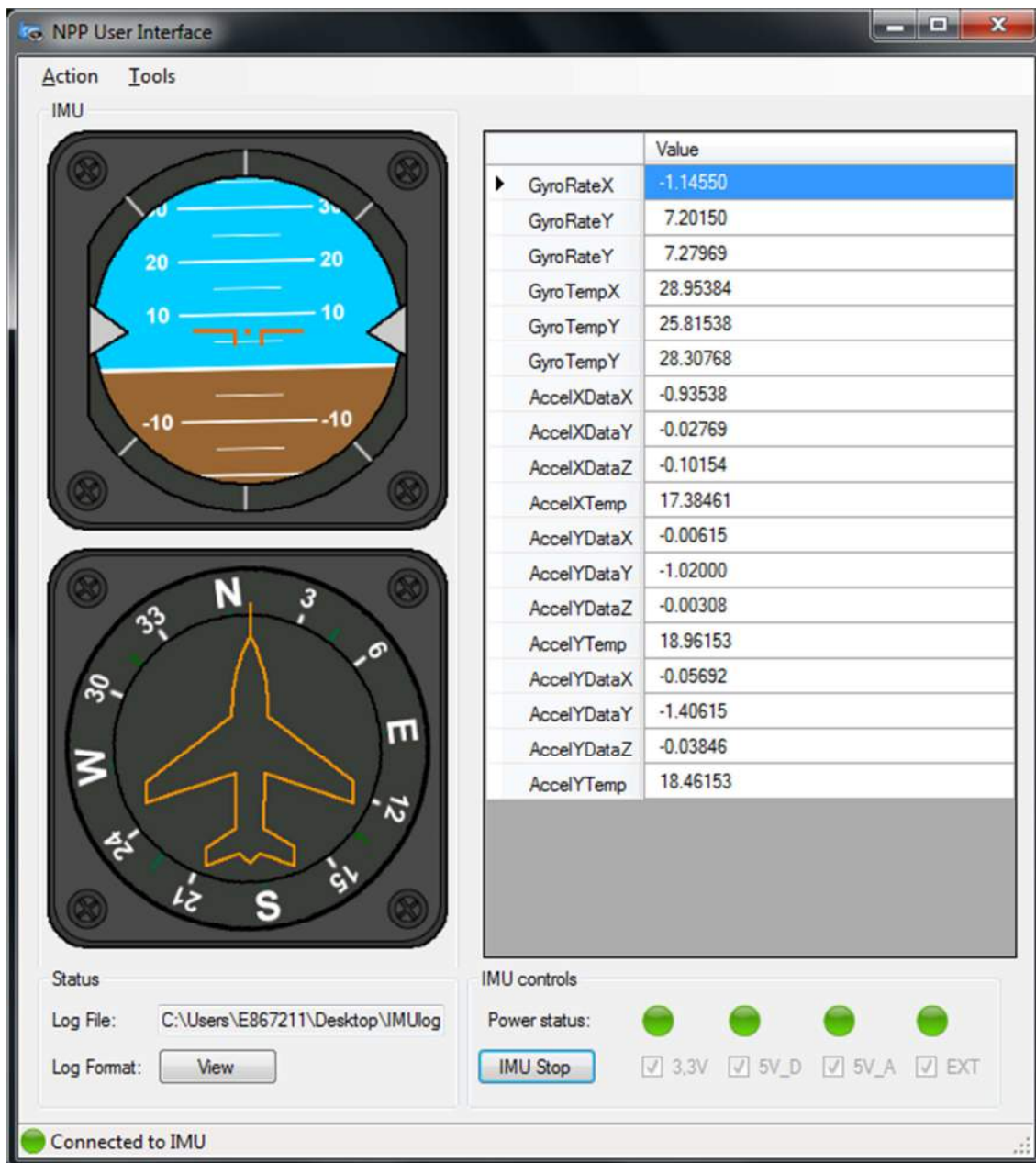
Obrázek 3.29 Výchozí obrazovka po úspěšném připojení a dokončení úvodní konfigurace

V tomto okamžiku se mírně pozmění grafické zobrazení. Zmizí jeden pár ukazatelů, které jsou na celé aplikaci nejzajímavější, ale tím podstatnějším rozdílem je panel „IMU controls“, který se objeví v pravém dolním rohu. Tento panel slouží k ovládání stavového automatu na straně embedded aplikace. V tomto stádiu se testovací platforma nachází v nečinném stavu.



Obrázek 3.30 Zapnutí napájecích větví

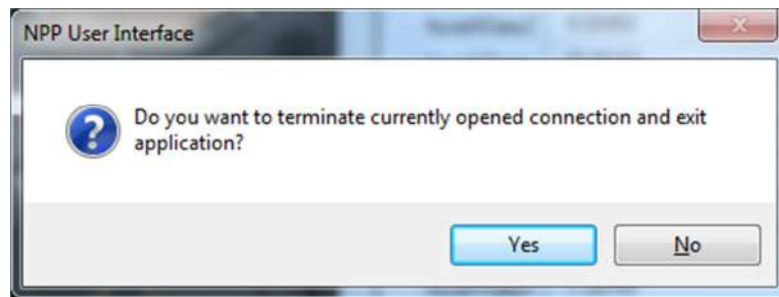
Aby bylo možné změnit stav stavového automatu na straně testovací platformy, je nutné zapnout alespoň jednu napájecí větev. Obsluha ovládá jednotlivé napájecí větve zatržením příslušného políčka. Barevné ukazatele nad zatrhávacími okénky zobrazují stav napájecích větví dekodovaný z přijímaných zpráv. Po zmáčknutí tlačítka „IMU Start“ se odešle paket obsahující informaci o tom, které napájecí větve se mají aktivovat (v tomto případě všechny) a následně paket pro spuštění samotného měření. Tím se stavový automat přepne do aktivního režimu. Nejdříve se aktivuje inicializační sekvence, která uvede senzory po startu do pracovního režimu a následně, s frekvencí 100 Hz, začne sbírat data z připojených senzorů a odesílat je do PC aplikace, která přijatá data zaznamenává do souboru.



Obrázek 3.31 Stav uživatelského rozhraní v průběhu aktivního měření

Jakmile je aktivován měřicí režim, není už možné do nastavení nijak zasahovat. Jediná dostupná možnost je tlačítko „IMU Stop“, které aktuálně běžící proces měření pozastaví. Proces logování se ukončuje až při odpojení od testovací platformy.

Výhodou návrhu grafického rozhraní této aplikace je nezávislost periody překreslování zobrazované grafiky od periody přijímaných dat. Grafické rozhraní pracuje s konstantním překreslovacím kmitočtem 20 Hz, což se lidskému oku jeví jako pohyb spojitý. Je-li frekvence přijímaných dat vyšší než 20 Hz, je změna grafických prvků plynulá a příjemná na pozorování. Pokud přicházejí data s frekvencí nižší 20 Hz, dochází ke změně až v momentě přijetí dalších dat, což je už pozorovatelné i volným okem.



Obrázek 3.32 Varování při pokusu o ukončení aplikace pokud je otevřené spojení

Další ochrannou funkcí, která předtím v aplikaci chyběla, je varování při pokusu o ukončení aplikace v případě, že je navázané spojení s hardwarem. Takové ukončení aplikace bez řádného uzavření běžících procesů způsobilo sérii chyb, které se projeví jako havárie aplikace nebo systémových prostředků. Současně tak nedošlo ke korektnímu uzavření používaného sériového portu, který se pak choval jako otevřený jinou aplikací. Jediným řešením byl reset testovací platformy. Přidáním tohoto hlášení se eliminují komplikace způsobené náhodným ukliknutím a myslí-li uživatel ukončení aplikace vážně, po zmáčknutí tlačítka „Yes“ dojde k automatickému odeslání paketu pro přepnutí testovací platformy opět do nečinného stavu, uzavření otevřeného spojení a až pak k ukončení samotné aplikace. Při opětovném spuštění aplikace tak všechno pracuje korektně, jak má.

V původní aplikaci bylo při vývoji této verze upravených a připsaných mnoho řádků kódu, ale tyto změny jsou tak roztroušené přes celý projekt, že je velice těžké je stručně shrnout a popsat, neboť jsou povětšinou navázané ještě na další a další funkce. Protože je aplikace psaná v jazyce C#, je zdrojový kód sám o sobě dobře čitelný, snadno pochopitelný a mimo to i celkem dobře okomentovaný. Samozřejmě, určitá základní znalost objektového programování je potřebná pro porozumění vazeb.

3.3.2 Embedded aplikace

Náročnější částí vývoje softwaru byl vývoj firmwaru pro řídicí procesor na straně testovací platformy. I s použitím debuggeru a logického analyzátoru bylo chvílemi dost náročné zjistit, co se uvnitř procesoru děje, ale to jsou typické problémy u programování na tak nízké úrovni obecně.

Nejdříve bylo nutné seznámit se s architekturou procesoru, vzhledem k minimálním předcházejícím zkušenostem autora s vývojem aplikací pro procesory jiné než 8-bitové a ještě dokonce s jádrem architektury ARM. V této fázi byl podrobně popsán katalogový list neocenitelným přínosem, stejně tak dostupné vzorové projekty a vývojová deska.

Zatím co katalogový list je snadno dostupný na internetu, zdrojové kódy vzorových projektů je nutné hledat jinde. K těmto vzorovým projektům je na internetu k dispozici pouze dokumentace vygenerovaná přímo ze zdrojových kódů pomocí některého z automatizovaných nástrojů. Veškerá dostupná dokumentace on-line tak sestává z výčtu proměnných a prototypů obsažených funkcí. Samotné zdrojové kódy jsou obsažené ve vývojovém prostředí Atmel Studio, které je zdarma. Konkrétně pro přístup k databázi zdrojových kódů využívá zmíněné vývojové prostředí modul ASF (Atmel Software Framework). Tuto součást lze stáhnout samostatně, přímo ze stránek výrobce (<http://www.atmel.com/tools/avrsoftwareframework.aspx>), ale je rovněž přímo implementována v instalátoru několika posledních verzí vývojového prostředí. Přes ASF je již možné dostat se k velkému množství zdrojových kódů a dokumentů, od samostatných knihoven a ovladačů až po kompletní projekty demonstrující použití různých periférií a demo projekty k různým vývojovým deskám.

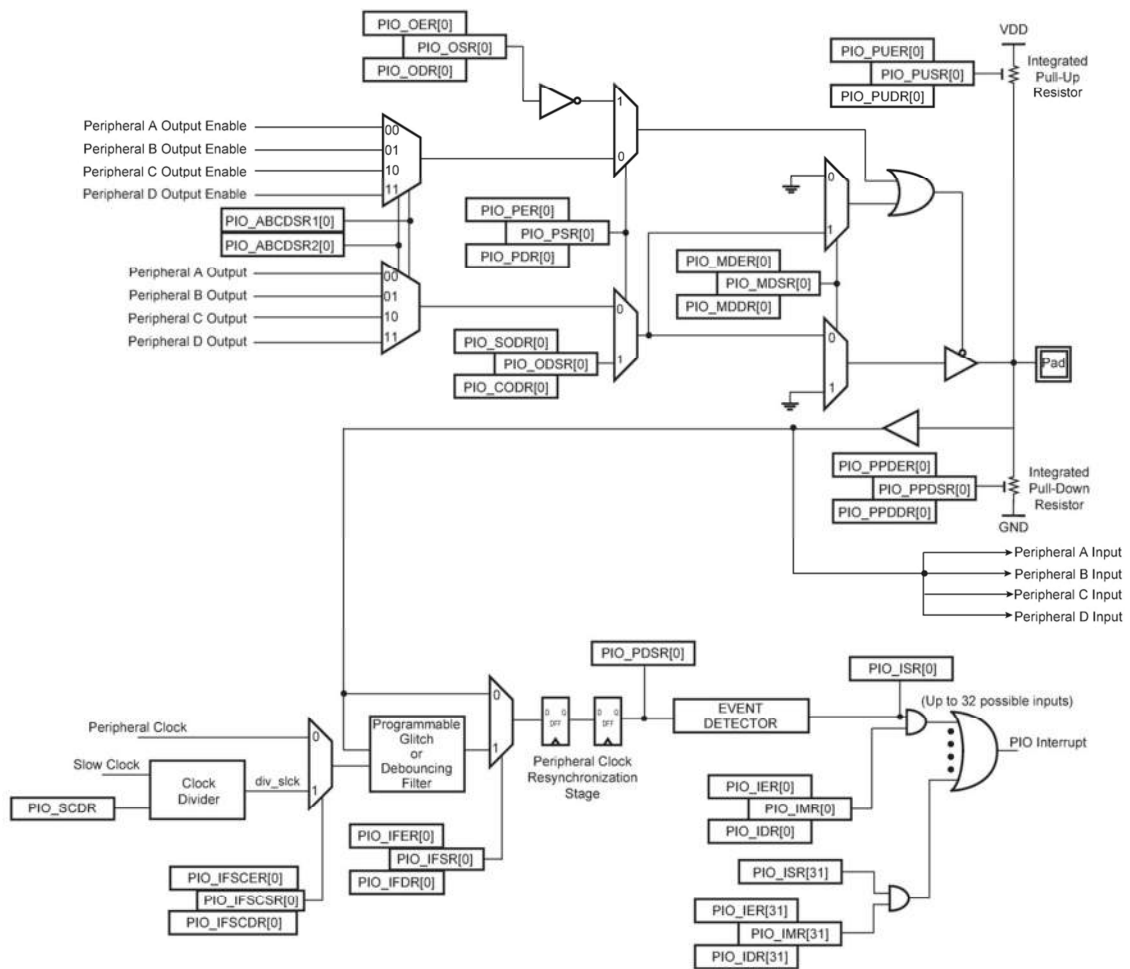
S použitím ASF a vzorových příkladů je začátek velice rychlý a první kódy fungují už za několik minut. Použití funkcí s výstižným názvem, nadefinovaných pojmenování konstant a stručný popis popisující typ vstupních a výstupních proměnných, zobrazovaný při psaní konkrétní funkce, výrazně přispívají k čitelnosti a srozumitelnosti kódu. Všechny ukázky, knihovny a ovladače, jsou psané velice univerzálně pro použití s celou řadou dalších procesorů, což je jistě plus. Hlavním mínusem využití tohoto způsobu programování je složitá struktura vazeb na mnoho dalších funkcí, volající další funkce, než se zavolá nějaká funkce, která reálně interaguje se samotným hardwarem. Na programátorovi pak je, naučit se pracovat s dodanými knihovnami, ovladači apod. Možnosti jsou dvě, buď podrobně zkoumat zdrojové kódy jaké funkce jsou k dispozici, s jakými parametry pracují atd., anebo testovat internetové vyhledávače zadáváním různých frází a kombinací, zda se nepovede dohledat nějaký použitelný návod, či alespoň popis dané knihovny. Tato činnost má blíže k detektivní práci než samotnému programování a často se stává, že několikahodinové hledání nepřinese žádný užitek.

Aby nedošlo k nedorozumění. Při psaní kódu například pro osobní počítač, na kterém běží operační systém, jenž spravuje přístup k hardware, je použití knihoven jediná možnost. V tom případě je ale většina knihoven unifikovaných a dobře popsaných. V případě programování embedded aplikací na úrovni firmwaru, který využívá pouze dostupné hardwarové prostředky mikrokontroléru a nestaví na žádném softwarovém základě, je použití zcela univerzálních knihoven nemožné. Zejména kvůli vysoké rozmanitosti konstrukce procesorů a integrovaných periférií a to i v rámci portfolia jediného výrobce.

Při psaní jednoduchých programů pro mikrokontroléry je nejrychlejší a nejjednodušší způsob pracovat přímo s hardwarem. Právě hardware je téměř pokaždé jiný, ale současně k němu poskytuje každý výrobce nejpodrobnější dokumentaci. Na této úrovni se celé programování zúží na zápis a čtení příslušných bitů do a z různých registrů. Samotný kód je na této úrovni už mnohem hůř čitelný a na první pohled není vždy jasné, jaká akce se provádí, ale i to se dá změnit využitím vlastních definicí, maker a dalších funkcí, které kompilátor podporuje.

Velikou výhodou kódů psaných na tak nízké úrovni je zejména dobrá dostupnost potřebných podkladů, jelikož obvykle postačuje jediný katalogový list. Dalším plusem je kompletní kontrola programátora nad vyvíjeným programem. Tento přístup se rovněž často využívá v leteckém průmyslu u softwaru, který vyžaduje certifikaci.

S dostupným a podrobným katalogovým listem bylo celkem snadné pochopit, k čemu který registr slouží. Jediným problémem bylo, jak to správně zapsat. První otazníky vyvstaly už při pokusu o rozsvícení některé z připojených LED. O prvotní zmatení se postaral i následující obrázek 3.33 zobrazující vnitřní strukturu jednoho pinu:



Obrázek 3.33 Vnitřní struktura jednoho GPIO pinu, převzato z [13]

Z obrázku 3.33 je hned patrné, čemu vděčí použitý mikrokontrolér za své široké možnosti konfigurace. Jedním z podstatných faktů pro práci s GPIO piny je princip ztrojených registrů, které v konfiguraci převládají. Jeden ze tří registrů je pouze pro čtení a obsahuje informaci o nastavení daného stupně. Tento registr má obvykle koncovku SR (Status Register). Další dva registry jsou naopak pouze pro zápis. Jeden slouží k nastavování daného stupně, druhý k resetování. Registr, který slouží k nastavení má obvykle koncovku ER (Enable Register) a jeho protějšek koncovku DR (Disable Register). Protože procesor pracuje s 32-bitovou architekturou, jsou i vstupně-výstupní porty široké právě 32 bitů. Tato konfigurace využívající oddělených nastavovacích a resetovacích registrů výrazně snižuje pravděpodobnost změny některého pinu nepozorností při psaní kódu, například použitím špatné masky. Kompletní seznam i popis jednotlivých registrů týkajících se i ostatních periférií je k dispozici v datasheetu [13].

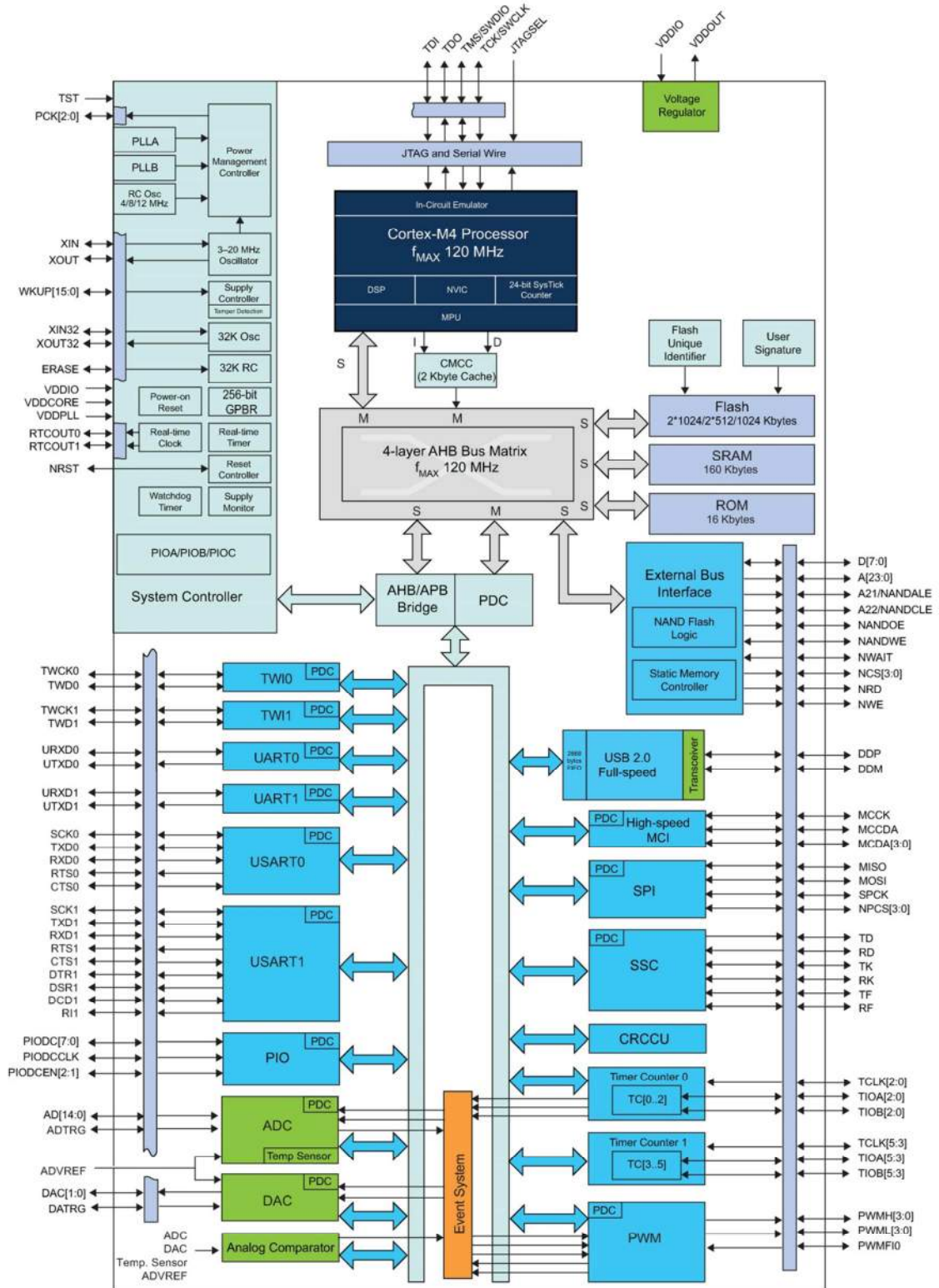
Zvolený mikrokontrolér ovšem obsahuje celkem tři 32-bitové široké porty označené jako PIOA, PIOB a PIOC. Každý z těchto portů pak obsahuje stejnou sadu registrů se zcela identickými názvy, jak zobrazuje obrázek 3.33. Jakým způsobem tedy programu sdělit, s kterým konkrétním pinem má pracovat? Řešení je velice jednoduché. U malých mikrokontrolérů, například 8-bitových, je vzhledem k výrazně omezeným možnostem konfigurace a funkcionality možné adresovat každý registr přímo. To znamená, že každý registr má jedinečné symbolické označení, kterému náleží konkrétní adresa registru v paměti. U větších mikrokontrolérů, jako je ten použitý v této práci, již takový přístup není možný, a proto se využívá relativního adresování s využitím ukazatelů. Jednotlivé symbolické názvy periférií tak mají svou adresu definovanou fixně, zatímco symbolické názvy jejich registrů reprezentují pouze velikost kroku od základní hodnoty dané periferie. Jednoznačná adresa žádaného registru se tak skládá z absolutní části a relativní části složené dohromady.

Například výběr a nastavení konkrétního pinu, který pracuje jako výstup, do logické jedničky se tak provádí následujícím příkazem:

```
PIOA->PIO_SODR = LED; //např.:#define LED (1<<20)
```

Jakmile byly základy jasné, bylo možné přistoupit k vývoji samotné aplikace.

Pro lepší představu struktury a možností zvoleného mikrokontroléru je na následujícím obrázku 3.34 zobrazena vnitřní struktura v přehledných blocích.

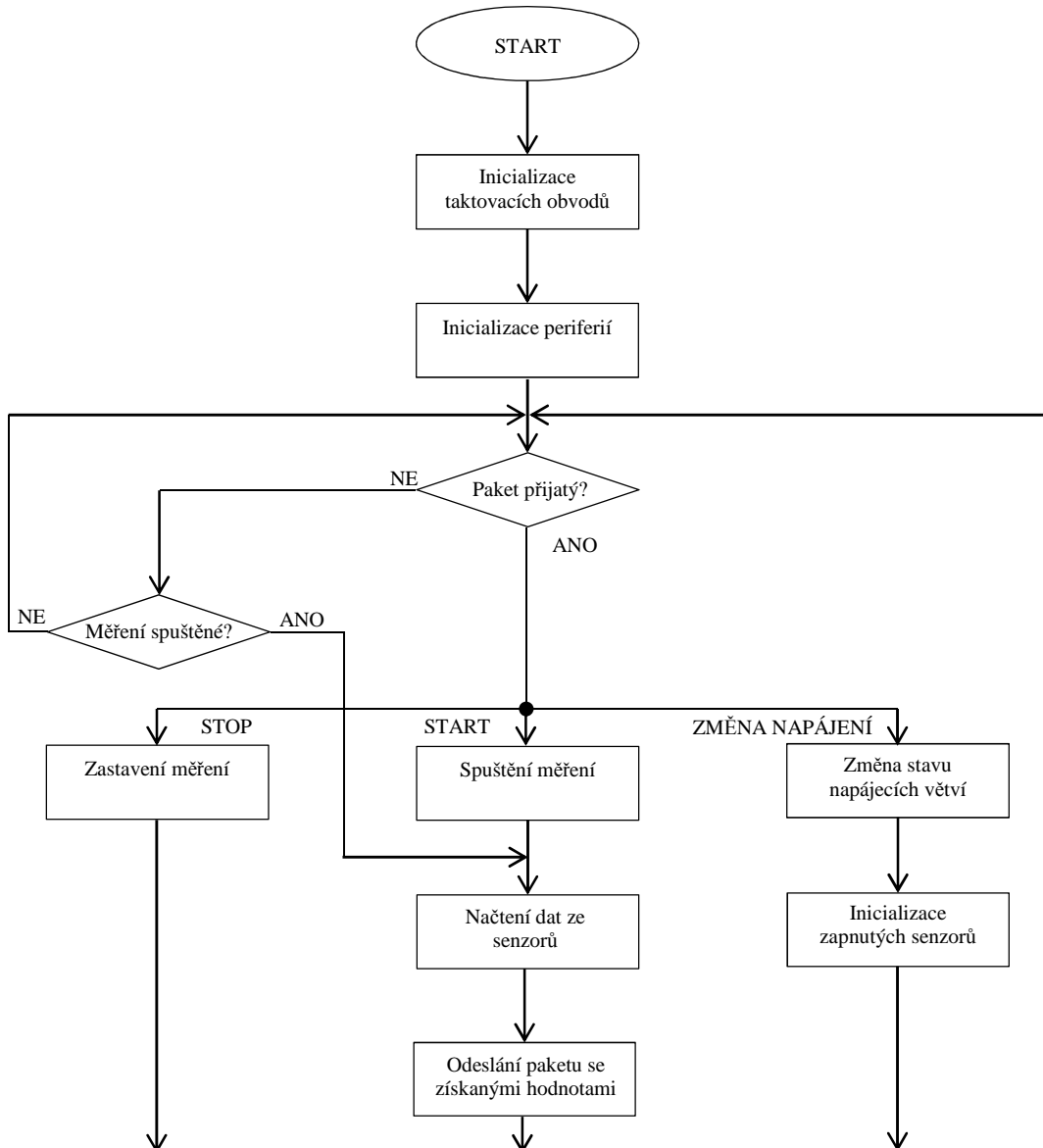


Obrázek 3.34 Blokové schéma procesoru ATSAM4SD32C s jádrem Cortex-M4, převzato z [13]

Základní požadavky na software embedded části celé aplikace jsou velice jednoduché:

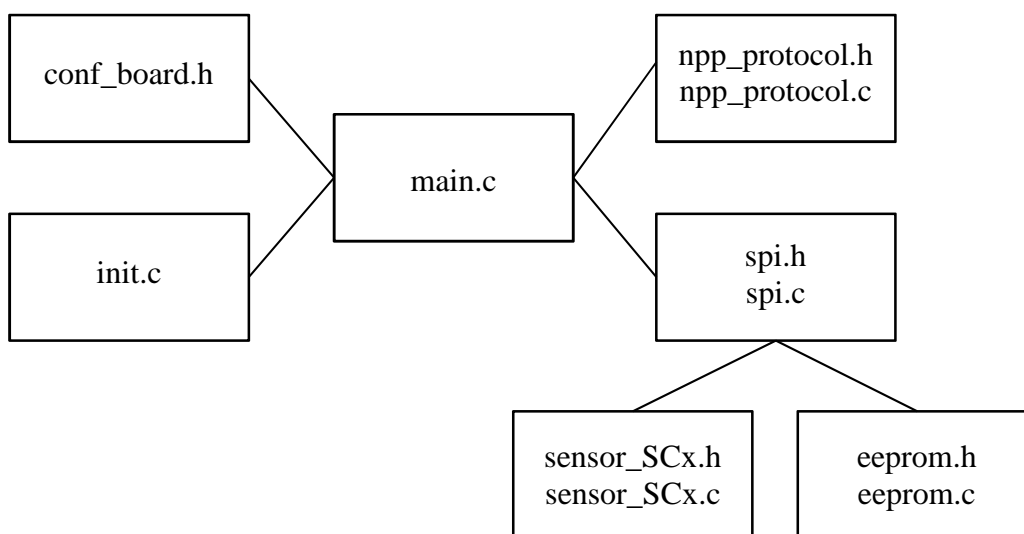
- Ovládání GPIO pinů (spínače napájení, LED)
- Obsluha senzorů (SPI master rozhraní + ovladače senzorů, EEPROM)
- Komunikace s připojeným PC (USB + komunikační protokol)

Aby byl program kompletní a plnil úlohu, která se od něj očekává, je nutné výše zmíněné jednotlivé funkční celky vhodně propojit. K vizualizaci vzájemných vazeb, sekvencí a rozhodovacích procesů slouží i následující vývojový diagram:



Obrázek 3.35 Vývojový diagram programu řídicího procesoru

Aby byl projekt přehlednější, byly vytvořené funkce rozloženy do několika souborů, jak to zobrazuje následující obrázek 3.36:



Obrázek 3.36 Vazby mezi soubory projektu

V souboru `conf_board.h`, jelikož se jedná pouze o hlavičkový soubor, se nenachází jediný kousek funkčního kódu, ale jsou zde uloženy definice konstant a jejich názvů. Použití těchto názvů místo nicneříkajících čísel slouží ke zlepšení orientace v kódu.

V hlavní funkci (v souboru `main.c`) se nejdříve inicializují hodinové a taktovací obvody, následně se provede obsah souboru `init.c`, ve kterém se nachází inicializační procedury zabezpečující přípravu vstupních a výstupních pinů, hlavního 100 Hz časovače a SPI master rozhraní pro komunikaci se senzory. Po návratu zpátky do hlavní funkce se ještě inicializuje USB rozhraní nakonfigurované jako virtuální sériový port a povolí se přerušení, tedy spustí hlavní časovač, který jako jediný využívá přerušení.

Po ukončení inicializační fáze se program dostane do nekonečné smyčky, ve které neustále kontroluje, zda jsou nějaká data v přijímacím zásobníku USB rozhraní a jestli má sbírat data ze senzorů a odesílat je.

Konfigurace GPIO pinů je celkem jednoduchá, a proto je obsluha těchto pinů prováděna kompletně na úrovni registrů bez využití knihoven dodávaných v ASF.

Obdobně jednoduché je i nastavení SPI rozhraní, které je rovněž obsluhované výhradně na úrovni registrů. Protože je hodinový signál generovaný pouze během odesílání dat, je pro příjem většího množství dat pravidelně odesílací zásobník naplněný nulovým rámcem. Další ochrannou funkcí, kterou řídicí logika SPI rozhraní disponuje, je kontrola, zda byla přijatá data přečtená. Pokud ne, nedovolí odesílat další data. V případě, že se v zásobníku nacházejí data, která neobsahují žádnou relevantní informaci, je součástí vytvořeného ovladače i funkce pro skartaci přijatých dat.

Na ovladači sběrnice SPI dále staví knihovny `eeprom` a `sensor_SCx`, které již se samotným hardwarem nepracují, ale zpracovávají odesílaná a přijímaná data, která vhodně interpretují.

Nejsložitějším prvkem této aplikace je USB rozhraní pracující ve třídě CDC (Communication Device Class), tedy jako zařízení pro přenos dat, konkrétně jako virtuální sériový port (COM). Protože se jedná o docela složitý balík, byl v tomto případě využitý kompletní ovladač z ASF a pouze mírně upravený konfigurační soubor. V konfiguračním souboru byl testovací platformě přidělený vlastní produktový identifikátor (PID), aby byla PC aplikace schopna automaticky se připojit ke správnému portu. Dále byly nastavené parametry komunikace na osm datových bitů, jeden stop bit, bez parity a bez dalších potřebných signálů. Symbolová rychlost neboli baud rate, byla nastavena na maximální hodnotu 12 MHz. Tato hodnota při použití virtuálního sériového portu od hodnoty kolem 7 MHz již nehraje velkou roli a naráží spíše na limity protokolu použitého v samotném USB rozhraní.

Protože použita PC aplikace pracuje s určitým komunikačním protokolem, bylo nutné tento protokol implementovat i do embedded části. Používaný komunikační rámec je proměnné délky a následující struktury:

Záhlaví	Číslo zprávy	Status zařízení	Nevyužitá pole	Počet dat	Data	CRC	Zápatí
4 B	4 B	4 B	28 B	4 B	Počet dat x 8 B	4 B	4 B
Unsigned Integer	Unsigned Integer	Unsigned Integer		Unsigned Integer	Double	Unsigned Integer	Unsigned Integer
0x23232323			0				0x24242424

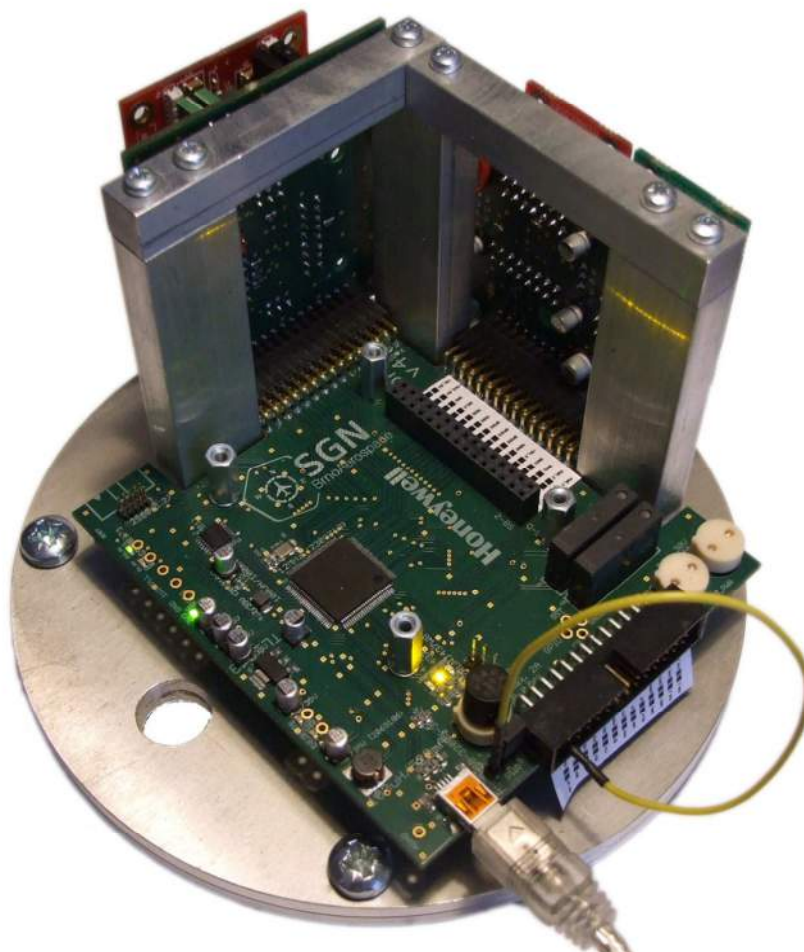
Tabulka 3.4 Popis rámce použitého komunikačního protokolu

Jak je zřejmé z tabulky 3.4, jenom fixní pole zabírají 52 bytů dat a každá číselná hodnota je prezentována ve formátu double, tedy ve formátu s plovoucí desetinnou čárkou a rozšířenou přesností, které vyžaduje dalších 64 bitů, tedy 8 bytů na jedno číslo. Když se vezme v úvahu, že data vyčítaná ze senzorů dosahují rozlišení 12 až 24 bitů, je využití tak velké přesnosti při přenosu těchto hodnot kontraproduktivní. Zejména se tím výrazně prodlužují jednotlivé rámce, přičemž standardní 32-bitový formát s plovoucí desetinnou čárkou (float) by byl v tomto případě víc než dostatečný.

Stejně tak využití kontrolního součtu v aplikaci, která se sice chová jako klasický sériový port, ale pro přenos využívá fyzickou vrstvu USB, která sama o sobě integritu dat kontroluje, by potenciálně z finálního řešení mohl být vynechán, tentokrát ale ne z důvodu úspory množství přenášených dat, ale z důvodu úspory procesorového času, který je vyžadovaný k výpočtu kontrolního součtu obzvláště takto dlouhých rámců.

Přestože využití tohoto komunikačního protokolu má svá negativa, je vyvinutá platforma v současné době schopna odesílat nasbíraná data rychlostí stokrát za sekundu, při rychlosti SPI sběrnice jenom 2 MHz při použití komunikačního rámce popsáno v tabulce 3.4 a pořád s výraznou rezervou výpočetního výkonu.

Na závěr ještě pohled na zapnutou testovací platformu v klidovém stavu.



Obrázek 3.37 Zapnutá testovací platforma



Obrázek 3.38 Detail LED zobrazujících stav napájecích linek (zelené) i uživatelských (žluté)

4 ZÁVĚR

Práce v úvodních kapitolách informuje o problematice inerciálních senzorů v avionice a dále obeznamuje s vlastním návrhem univerzální testovací platformy pro testování dříve zmíněných prvků.

Dokument popisuje požadavky na systém, zadané firmou Honeywell International spol. s.r.o., a jejich následné konkrétní splnění. Práce postupně popisuje hledání možných řešení, použitelných součástí a rozhodovací procesy při zkoumání nevhodnějšího návrhu mechaniky, hardwaru a nakonec i softwaru.

Výsledkem práce je řešení, které splňuje zadané požadavky a nabízí široké možnosti využití. Navržená mechanická konstrukce nabízí dostatečnou pevnost, robustnost a stabilitu při zachování co nejmenší hmotnosti. Návrh elektroniky prototypu základní desky i prototypů první sensorové desky se ukázal funkční téměř na 100 %. Na základní desce se objevil pouze drobný problém se spínacím tranzistorem 3,3 V větve.

Vzhledem k omezeným časovým možnostem není software zcela kompletní, ale dostatečně demonstruje funkčnost jednotlivých klíčových částí, jako je obousměrná komunikace s PC přes USB rozhraní a spolehlivou komunikaci s připojenými senzory. Připravené jsou i funkce pro práci s EEPROM paměťmi na sensorových deskách, pouze je nebylo možné propojit s grafickým rozhraním z důvodu omezení vyplývajících z použitého komunikačního protokolu, který bude potřeba do budoucna přehodnotit.

V konečném hodnocení práce zadání splnila.

LITERATURA

- [1] Microelectromechanical systems. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Microelectromechanical_systems#Applications
- [2] TRLIČÍK, J. *Modelování inerciálních snímačů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013.
- [3] Tearing down LEGO MINDSTORMS®. In: [Http://www.findmems.com](http://www.findmems.com) [online]. 2010 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.findmems.com/stmicroelectronics/tearing-down-lego-mindstorms@-stmicroelectronics-mems-accelerometer-lis344alh>
- [4] Gyroscope. In: [Http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu) [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/gyr.html>
- [5] MEMS Accelerometers, Gyroscopes, and Geomagnetic Sensors - Propelling Disruptive Consumer Applications. In: [Http://www.digikey.com](http://www.digikey.com) [online]. 1995-2014 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2011/apr/mems-accelerometers-gyroscopes-and-geomagnetic-sensors---propelling-disruptive-consumer-applications>
- [6] Gyroscopes and Accelerometers on a Chip. In: [Http://www.geekmomprojects.com](http://www.geekmomprojects.com) [online]. 2014 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.geekmomprojects.com/gyroscopes-and-accelerometers-on-a-chip/>
- [7] Sensoror AS - High precision MEMS sensors - SAR100. In: [Http://www.sensoror.com](http://www.sensoror.com) [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.sensoror.com/gyro-products/gyro-sensors/sar100.aspx>
- [8] Electrolytic Tilt Sensors and Inclinometers. In: [Http://archives.sensorsmag.com](http://archives.sensorsmag.com) [online]. 2004 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://archives.sensorsmag.com/articles/0904/41/main.shtml>
- [9] Tilt Sensors and Inclinometer Design and Manufacturing - Spectron. [Http://www.spectronsensors.com](http://www.spectronsensors.com) [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.spectronsensors.com/tilt-sensors.php>
- [10] HMC1051ZL datasheet. In: [Http://www51.honeywell.com](http://www51.honeywell.com) [online]. 2010 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/HMC_1051-1052-1053_Data_Sheet.pdf
- [11] 74HC138 datasheet. [Www.nxp.com](http://www.nxp.com) [online]. 2012 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/74HC_HCT138.pdf
- [12] AT25320B and AT25640B datasheet. [Www.atmel.com](http://www.atmel.com) [online]. 2015 [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/Atmel-8535-SEEPROM-AT25320B-640B-Datasheet.pdf>
- [13] SAM4S series Datasheet. ATMEL CORPORATION. [Www.atmel.com](http://www.atmel.com) [online]. 2014 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-11100-32-bit-Cortex-M4-Microcontroller_Datasheet.pdf
- [14] SCC1300-D04 Datasheet. MURATA ELECTRONICS OY. [Www.murata-mems.fi](http://www.murata-mems.fi) [online]. 2014 [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://www.murata-mems.fi/sites/default/files/documents/82113100e_scc1300-d04_datasheet.pdf
- [15] MANN, B. *C pro mikrokontroléry*. Praha: BEN - technická literatura, 2003.

- [16] GREWAL, M. S., WEILL, L. R., ANDREWS, A. P. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. Danvers: John Wiley & Sons, 2004.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ARM	Acorn RISC Machine
ASF	Atmel Software Framework
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BGA	Ball Grid Array
CDC	Communication Device Class
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
COM	Communication Port
CPU	Central Processing Unit
DPS	Deska plošných spojů
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
GPIO	General Purpose Input Output
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphic User Interface
I2C	Inter Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
IMU	Inertial Measurement Unit
JTAG	Joint Test Action Group
LED	Light Emmiting Diode
MEMS	Micro Electro-Mechanical System
MISO	Master In Slave Out (SPI signal)
MOSI	Master Out Slave In (SPI signal)
PC	Personal Computer
PID	Product ID
PLC	Programmable Logic Controller
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Acces Memory
ROM	Read Only Memory
SCLK	Serial Clock (SPI signal)
SMT	Surface Mount Technology
SPI	Serial Peripheral Interface
TQFP/LQFP	Thin Quad Flat Package
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus