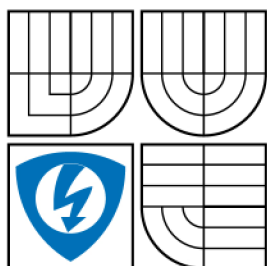


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

TŘÍOSÝ SENZOR ÚHLOVÉ RYCHLOSTI PRO LETECKÉ POUŽITÍ

THREE AXES ANGULAR SPEED SENSOR FOR AIRCRAFT APPLICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ LEMBARD

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

ING. VIERA BIOLKOVÁ

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ:	- 2 -
SEZNAM TABULEK:	- 2 -
SEZNAM PŘÍLOH:	- 3 -
1 ÚVOD	- 3 -
2 TEORIE GYROSKOPU	- 4 -
2.1 POHYBOVÁ ROVNICE DERIVAČNÍHO GYROSKOPU:.....	- 4 -
2.2 ÚHLOVÁ RYCHLOST:	- 5 -
2.3 POUŽITÍ MECHANICKÉHO GYROSKOPU:	- 7 -
2.4 NÁHRADY MECHANICKÉHO GYROSKOPU:	- 7 -
3 TECHNOLOGIE MEMS:	- 8 -
3.1 POUŽITÍ:	- 8 -
3.2 ZÁKLADNÍ PRINCIPY MĚŘENÍ ÚHLOVÝCH RYCHLOSTÍ V MEMS:.....	- 8 -
3.2.1 <i>Piezoelektrický jev</i>	- 8 -
3.2.2 <i>Coriolisova síla</i>	- 9 -
3.2.3 <i>Princip činnosti piezoelektrického snímače</i>	- 9 -
3.2.4 <i>“Wine glass resonator gyroscope” (vibrující kruh):</i>	- 10 -
3.3 GYROSKOP FIRMY ANALOG DEVICES:.....	- 10 -
4 POUŽITÉ INTEGROVANÉ OBVODY	- 11 -
4.1 ŘÍDÍCÍ MIKROKONTROLÉR ATMEGA16:	- 11 -
4.1.1 <i>Základní rysy a parametry mikrokontroléru ATmega16:</i>	- 11 -
4.1.2 <i>Zapojení vývodů ATmega16:</i>	- 12 -
4.2 DIGITÁLNÍ SENZOR ÚHLOVÉ RYCHLOSTI ADIS16250:	- 12 -
4.2.1 <i>Základní rysy a parametry senzoru úhlové rychlosti ADIS16250:</i>	- 12 -
4.2.2 <i>Zapojení vývodů senzoru ADIS16250</i>	- 13 -
4.3 DUÁLNÍ PŘEVODNÍK USB-UART FT232BM.....	- 14 -
4.3.1 <i>Základní parametry:</i>	- 14 -
4.3.2 <i>Blokové schéma a zapojení vývodů</i>	- 14 -
4.4 SNIŽUJÍCÍ DC-DC MĚNIČ LM25575.....	- 15 -
4.4.1 <i>Základní parametry:</i>	- 15 -
4.4.2 <i>Blokové schéma a obecné zapojení vývodů měniče LM25575</i>	- 16 -
5 PRAKTICKÁ REALIZACE, POPIS JEDNOTLIVÝCH BLOKŮ: - 17 -	
5.1 BLOKOVÉ SCHÉMA PŘÍPRAVKU PRO MĚŘENÍ ÚHLOVÉ RYCHLOSTI.....	- 17 -
5.2 MODUL SENZORŮ ÚHLOVÉ RYCHLOSTI A KOMUNIKACE S MCU	- 17 -
5.2.1 <i>SPI:</i>	- 17 -
5.2.2 <i>Přenos dat:</i>	- 18 -
5.2.3 <i>Komunikace po sběrnici SPI mezi ATmega16 a ADIS16250:</i>	- 18 -
5.2.4 <i>Zápis do registru:</i>	- 18 -
5.2.5 <i>Čtení dat z registru:</i>	- 19 -
5.2.6 <i>Výstupní datové registry:</i>	- 20 -
5.2.7 <i>Obvodové schéma:</i>	- 21 -
5.3 KOMUNIKACE MEZI MCU A PC:	- 21 -
5.3.1 <i>Obvodové zapojení:</i>	- 22 -
5.3.2 <i>Princip přenosu dat pomocí rozhraní UART</i>	- 22 -
5.4 BLOK SNIŽUJÍCÍHO DC-DC MĚNIČE:	- 23 -
5.4.1 <i>Obvodové schéma</i>	- 23 -
6 PROGRAM PRO ŘÍDÍCÍ MIKROKONTROLÉR	- 24 -
6.1 VÝVOJOVÝ DIAGRAM.....	- 24 -
6.2 INICIALIZACE ROZHRAŇÍ SPI A NASTAVENÍ REGISTRŮ	- 26 -

6.2.1	DDRB – Data Direction Register:.....	- 26 -
6.2.2	SPCR – SPI Control Register:.....	- 26 -
6.2.3	SPDR – SPI Data Register.....	- 27 -
6.3	INICIALIZACE ROZHŘANÍ USART A NASTAVENÍ REGISTRŮ.....	- 27 -
6.3.1	UCSRB – USART Control And Status Register B.....	- 27 -
6.3.2	UCSRC – USART Control And Status Register C.....	- 28 -
7	ŘÍDÍCÍ APLIKACE PRO PC.....	- 28 -
8	FUNKČNÍ OVĚŘENÍ.....	- 29 -
8.1	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	- 30 -
9	ZÁVĚR.....	- 32 -
10	POUŽITÁ LITERATURA.....	- 33 -

Seznam obrázků:

Obr. 2.1	Princip derivačního gyroskopu [1].....	-4-
Obr. 2.2	Graf výchylky β na úhlové rychlosti Ω	-5-
Obr. 2.3	Vektor úhlové rychlosti [1].....	-6-
Obr. 2.4	Rychlostní gyroskop pro modelářské účely [5].....	-7-
Obr. 2.5	Laserový rezonátorový gyroskop [2].....	-8-
Obr. 3.1	princip piezoelekt. gyroskopu [5].....	-9-
Obr. 3.2	“Wine glass resonator gyroscope” [2].....	-10-
Obr. 3.3	Celková struktura.....	-11-
Obr. 3.4	Snímač.....	-11-
Obr. 4.1	Zapojení vývodů ATmega16.....	-12-
Obr. 4.2	Vnitřní struktura senzoru ADIS16250.....	-13-
Obr. 4.3	Zapojení vývodů ADIS16250.....	-13-
Obr. 4.4	Vnitřní struktura převodníku FT232BM.....	-14-
Obr. 4.5	Zapojení vývodů převodníku FT232BM.....	-15-
Obr. 4.6	Vnitřní struktura měniče LM25575.....	-16-
Obr. 4.7	Základní zapojení externích součástek měniče LM25575.....	-16-
Obr. 5.1	Blokové schéma tříosého senzoru úhlové rychlosti.....	-17-
Obr. 5.2	Schéma propojení vývodů pro komunikaci pře rozhraní SPI.....	-18-
Obr. 5.3	Časové průběhy na jednotlivých vývodech při operaci zápis [3].....	-19-
Obr. 5.4	Časové průběhy na jednotlivých vývodech při operaci čtení [3].....	-19-
Obr. 5.5	Časové průběhy na vývodech při operaci čtení, konkrétní příklad [3].....	-20-
Obr. 5.6	Obvodové schéma ATmega16 – SPI.....	-21-
Obr. 5.7	Obvodové schéma komunikace ATmega16 – PC.....	-22-
Obr. 5.8	Obvodové zapojení DC-DC měniče.....	-24-
Obr. 6.1	Vývojový diagram.....	-25-
Obr. 8.1	Sestavený a oživený výrobek připojený k PC a JTAG programátoru.....	-29-
Obr. 8.2	Měřicí pracoviště.....	-30-
Obr. 8.3	Graf naměřených hodnot pro úhlovou rychlost $12^\circ/s$ v ose z.....	-30-
Obr. 8.4	Graf hodnot úhlové rychlosti při měření kuželovitého pohybu.....	-31-
Obr. 8.5	Statická charakteristika.....	-32-

Seznam tabulek:

Tab. 1:	Sjednocení názvu vývodů jednotlivých výrobců.....	-18-
Tab. 2:	Bitová mapa registru v senzoru ADIS16250.....	-20-
Tab. 3:	Přehled výstupních registrů senzoru ADIS16250.....	-20-
Tab. 4:	Tabulka zpracování naměřených hodnot.....	-31-

Seznam příloh:

Příloha č.1 Obvodové schéma zapojení.....	-34-
Příloha č.2 Deska plošných spojů:.....	-35-
Příloha č.3 Rozmístění součástek:.....	-36-

1 Úvod

Digitální třiosý senzor úhlové rychlosti se v letectví využívá jako součást inerciální referenční jednotky sloužící pro měření polohových úhlů letadla náklonu, sklonu a kurzu. Tyto letové informace jsou nutné jak pro manuální řízení, tak pro autopilota.

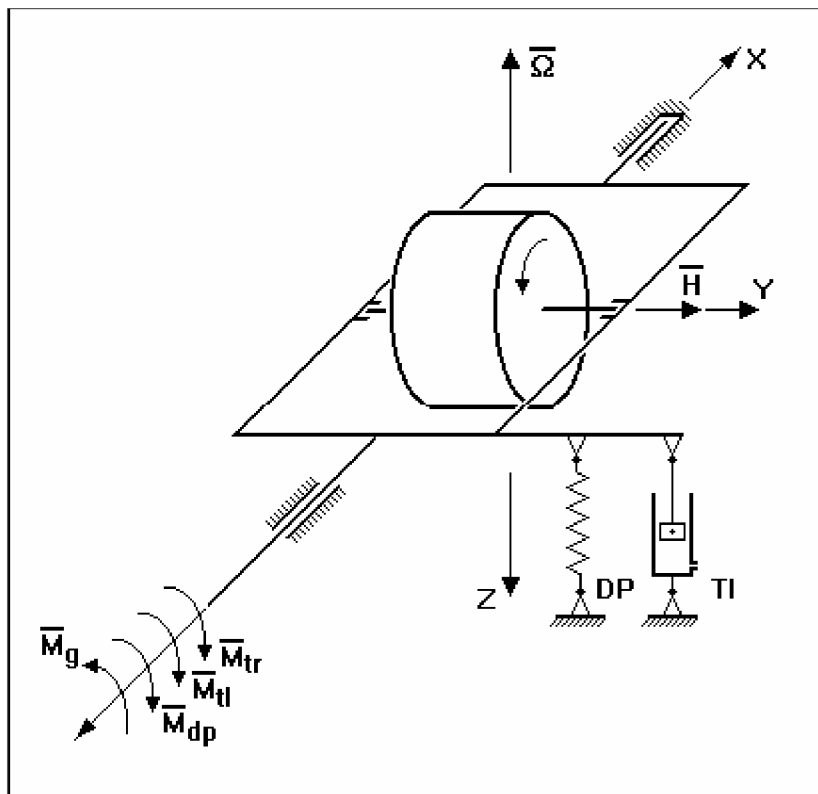
První stránky této práce jsou věnovány fyzikální podstatě a definici senzorů úhlové rychlosti (běžně slangově nazývaných gyroskopy). Dále je stručný přehled jednotlivých metod měření úhlových rychlostí od těch historických mechanických až po technologii MEMS a v dnešní době nejpřesnějším rezonátorovým laserovým gyroskopem. Poté následuje popis technologie MEMS a přehled výrobců vyrábějících senzory úhlové rychlosti technologií MEMS a podrobnější pohled na princip fungování iMEMS senzorů úhlové rychlosti firmy Analog Devices. Poté se už začneme zabývat realizací návrh blokového schéma, stanovení požadavků na jednotlivé bloky a výběr vyhovujících součástek. Řešení komunikace jednotlivých součástí, vysvětlení obecného principu komunikace pomocí rozhraní SPI a následné konkrétní využití pro komunikaci mezi senzory ADIS16250 a mikroprocesorem ATMega16. Využití obvodu FTDI pro komunikaci mezi mikroprocesorem a počítačem se sběrníci USB. V další části se následuje konečná realizace zařízení, vytvoření obvodového návrhu, návrh plošného spoje a využití prostředí matlab pro zobrazení a vyhodnocení naměřených dat.

Konečným výstupem této bakalářské práce je samotná realizace digitálního senzoru úhlové rychlosti ve formě laboratorního přípravku a jeho funkční ověření.

2 Teorie gyroskopu

Třiosý senzor úhlové rychlosti je založen na teorii gyroskopu. Obecně je gyroskop mechanické zařízení, jehož neoddělitelnou součástí je rychle rotující setrvačnickové kolo s těžkým obvodem, smontované tak, že jeho osa rotace se může natáčet kolem pevného bodu ležícího na této ose. Třiosý senzor úhlové rychlosti je gyroskop se dvěma stupni volnosti, nebo také derivační či rychlostní gyroskop.

2.1 Pohybová rovnice derivačního gyroskopu:



Obr. 2.1 princip derivačního gyroskopu [1]

[1] Vnutíme-li gyroskopu úhlovou rychlost $\vec{\Omega}$, pak gyroskop vytváří gyroskopický moment:

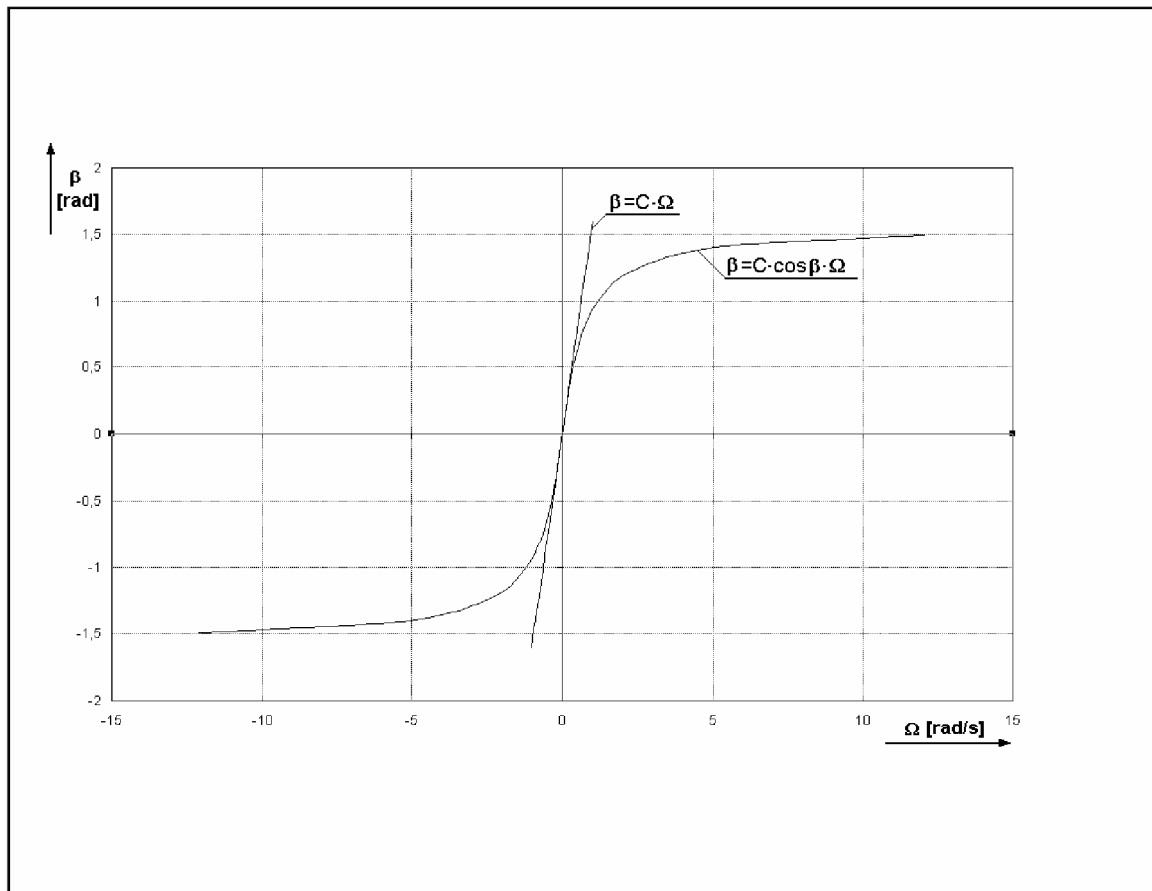
$$\vec{M}_g = \vec{H} \times \vec{\Omega} \quad [1] \quad (2.1)$$

Tento moment vychyluje Cardanův rám tak, aby vektor momentu hybnosti H splynul s vektorem úhlové rychlosti $\vec{\Omega}$. Proti tomuto pohybu působí momenty setrvačnosti, tlumení, tření, a moment direkční pružiny. V ustáleném stavu, za podmínky nulové rychlosti a zrychlení rotace Cardanova rámu, je rovnice výchylky β závislé na úhlové rychlosti $\vec{\Omega}$ rovna:

$$\beta = \frac{\vec{H}}{k_{dp}} \cdot \cos \beta \cdot \vec{\Omega} \quad [1] \quad (2.2)$$

$$\text{Zjednodušeně, pro } \cos \beta \cong 1: \quad \beta = C \cdot \vec{\Omega} \quad [1] \quad (2.3)$$

Z těchto rovnic vyplývá, že výchylka β je závislá na momentu hybnosti (sférické rychlosti gyroskopu), dále na tuhosti směrní pružiny a vnučené úhlové rychlosti.

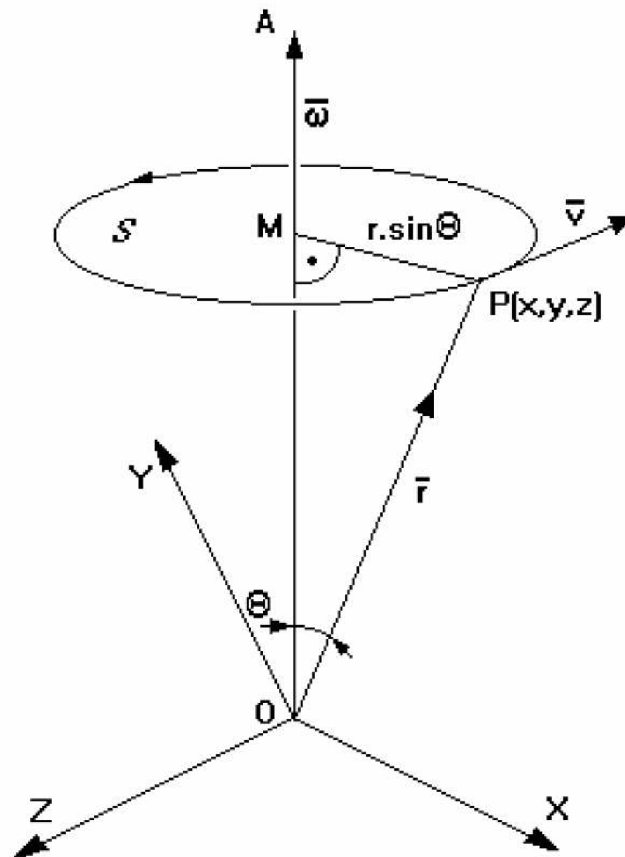


Obr. 2.2 graf výchylky β na úhlové rychlosti Ω

Z grafu závislosti měřené výchylky β na úhlové rychlosti Ω , je patrné, že výchylka je nelineární, nelinearita závisí na $\cos \beta$.3). Proto je vhodné v praxi využívat pouze střední část statické charakteristiky, která je téměř lineární (nelinearita $<1\%$ v intervalu $\pm 8,1^\circ$; nelinearita $<5\%$ v intervalu $\pm 18,2^\circ$).

2.2 Úhlová rychlost:

[1] Mějme tuhé těleso rotující úhlovou rychlostí ω kolem pevného bodu O. Nechť P představuje libovolný bod tělesa a \vec{r} nechť je vektorem jdoucím z bodu O do bodu P. Z obr. 2.3 je zřejmé, že okamžitá rychlost translačního pohybu bodu P je $\vec{v} = (\vec{r} \cdot \sin \Theta) \cdot \omega$. Budeme-li na tuto rychlost pohlížet jako na vektor, pak tento vektor bude vždy kolmý na rovinu určenou body OMP.



Obr. 2.3 Vektor úhlové rychlosti [1]

Představme si nyní, že bod O je počátkem souřadnicového systému OXYZ. Bod P je potom charakterizován radiusvektorem \bar{r} se složkami r_x, r_y, r_z , který má počátek v bodě O a konec v bodě P. Úhlová rychlost $\bar{\omega}$ je vektor, který má rovněž počátek v bodě O a má složky $\omega_x, \omega_y, \omega_z$. Vektor okamžité rychlosti \bar{v} bodu P můžeme vyjádřit ve tvaru:

$$\bar{v} = \bar{\omega} \times \bar{r} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ r_x & r_y & r_z \end{vmatrix} = \quad [1] \quad (2.4)$$

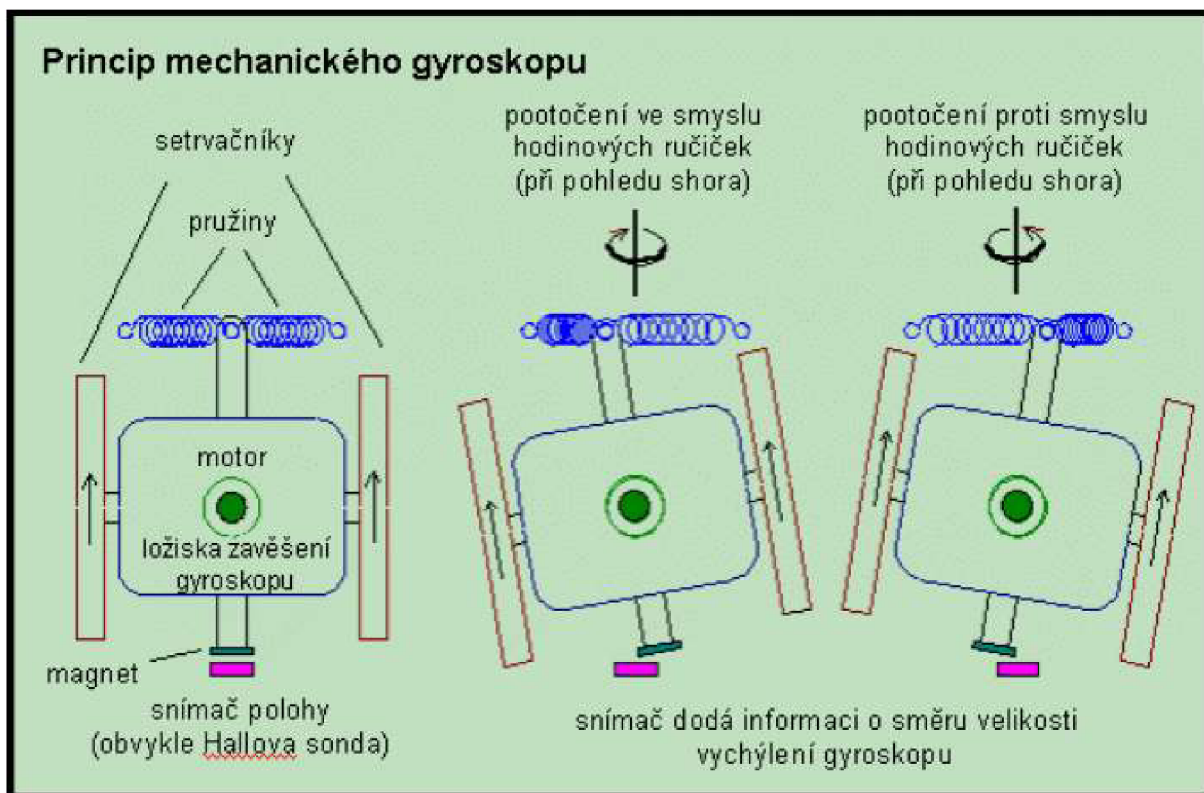
$$= (\omega_y \cdot r_z - \omega_z \cdot r_y) \cdot \bar{i} + (\omega_z \cdot r_x - \omega_x \cdot r_z) \cdot \bar{j} + (\omega_x \cdot r_y - \omega_y \cdot r_x) \cdot \bar{k}$$

jehož složky jsou:

$$\begin{aligned} v_x &= \omega_y \cdot r_z - \omega_z \cdot r_y \\ v_y &= \omega_z \cdot r_x - \omega_x \cdot r_z \\ v_z &= \omega_x \cdot r_y - \omega_y \cdot r_x \end{aligned} \quad [1] \quad (2.5)$$

2.3 Použití mechanického gyroskopu:

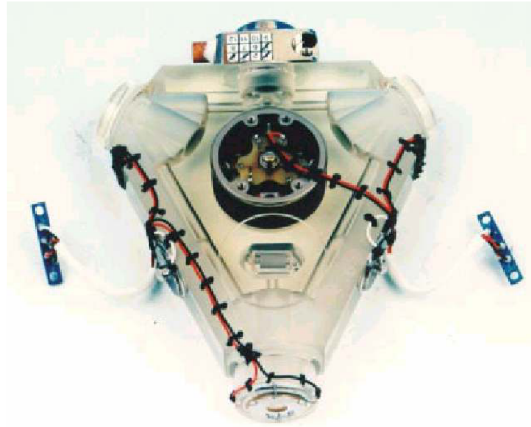
Základem klasického mechanického gyroskopu pro modelářské účely je setrvačnick, poháněný motorkem (viz obr. 3). Obvykle jsou použity rotory dva, každý na jedné straně pohonného elektromotorku. Celek je vyvážený vzhledem k ose opatřené ložisky, která umožňují výkyvný pohyb kolem vodorovné osy kolmé k ose hřídele motorku. Středová poloha je udržována direkčními pružinami, a tak je v klidu hřídel motorku vodorovná. Rotace kolem svislé osy, vyvolá gyroskopický moment, tedy „snahu setrvačnicku naklonit se kolem vodorovné osy“. Tento náklon je snímán, Hallova sondou, a lze podle něj určit úhlovou rychlost. U leteckých profesionálních gyroskopů se pohyb Cardanova rámu snímá potenciometrickými či indukčnostními snímači.



Obr. 2.4 Rychlostní gyroskop pro modelářské účely [5]

2.4 Náhrady mechanického gyroskopu:

Výroba gyroskopů je náročná, především z nutnosti vysoké přesnosti při výrobě jednotlivých součástí, tak i při kompletování. Tomu také odpovídá i vysoká cena. Z tohoto důvodu vznikly snahy nahradit gyroskop zaprvé levnějším zařízením, zadruhé vynalézt zařízení, které bude přesnější, nehledě na cenu a technologickou náročnost. U elektromechanických systémů se využívá Coriolisova zrychlení, při současném působení translační a rotační složky rychlosti na těleso. Přístroje optoelektronické jsou fyzikálně založeny na Sagnacově jevu, tedy na vzájemném fázovém posunu dvou světelných paprsků, běžících proti sobě v uzavřené optické smyčce, při její rotaci kolem osy kolmé na rovinu této smyčky. Pro inerciální navigaci je nejvýznamnější laserový rezonátorový gyroskop (Ring Laser Gyroscope – RLG) viz obr. 2.5, který je velice přesný, ale také velmi drahý.



Obr. 2.5 Laserový rezonátorový gyroskop

3 Technologie MEMS:

Mikroelektromechanické systémy (MEMS – Micro-electromechanical systems) je výrobní technologie, používaná pro výrobu malých integrovaných zařízení nebo systémů, které kombinují mechanické a elektrické součásti. Vyrábějí se stejnými metodami litografie, jako se vyrábějí polovodiče nebo jiné mikročipy a mohou měřit od několika mikrometrů do několika milimetrů. Zkratka MEMS je původem z USA, v Evropě se technologie pojmenovává MST (Microsystems Technology) a v Japonsku Micromachines.

3.1 Použití:

Technologie MEMS se mimo měření úhlové rychlosti také využívá k měření zrychlení (akcelerometry), ty mají uplatnění v letectví, ale dále třeba také v automobilovém průmyslu, kde slouží jako indikátory nárazu ke spuštění airbagu. Díky této technologii se snížila cena oproti klasickým mechanickým senzorům z cca 50-ti dolarů na 5dolarů. Dále má technologie MEMS uplatnění také například v lékařství pro měření krevního tlaku. V tomto čipu je možné vytvořit také tzv. mlot zrcadla, které je možno natačct, a tím měnit optickou trasu. Existuje také prototyp sloužící k zabezpečení zbraní proti odpalu. Uvnitř čipu jsou dvě zrcadla, každé připojené k jednomu hnacímu ústrojí. Tato hnací ústrojí jsou ovládána 24-bitovým kódem. Pokud je kód zadán správně, zrcadla se natočí tak, že vytvoří optický spoj, kterým je následně možné danou zbraň odpálit.

3.2 Základní principy měření úhlových rychlostí v MEMS:

3.2.1 Piezoelektrický jev

[6] Úkaz, který se nazývá přímý piezoelektrický jev, se projevuje u středově nesymetrických krystalů závislostí vzniku elektrického náboje na plochách krystalu v důsledku mechanického namáhání. Tato vlastnost umožňuje materiál použít jako senzor.

Obrácený piezoelektrický jev (elektrostrikce) spočívá v mechanické deformaci materiálu, způsobené přiloženým elektrickým polem. Umožňuje to například využití přesného a stálého kmitu krystalu křemene k řízení elektrických kmitů v elektrických obvodech.

Piezoelektrický bimorf je plátek (disk či jiný tvar) složený z více piezokeramických vrstev (většinou dvou), případně kombinovaný s dalšími materiály. Paralelní bimorf má

shodně orientované piezoelektrické plátky ve všech vrstvách. Seriový (antiparalelní) bimorf má naopak různý směr polarizace piezoelektrických keramických plátů. Po přivedení elektrického napětí se jedna vrstva začne smršťovat v rovinách kolmých na směr elektrického pole a roztahovat ve směru elektrického pole. Druhá vrstva se naopak roztahuje v rovinách kolmých na elektrické pole a smršťuje ve směru pole. Dojde k ohnutí bimorfu na jednu stranu. Při otočení napětí se bimorf ohýbá na opačnou stranu. Přivedením střídavého napětí lze bimorf rozkmitat.

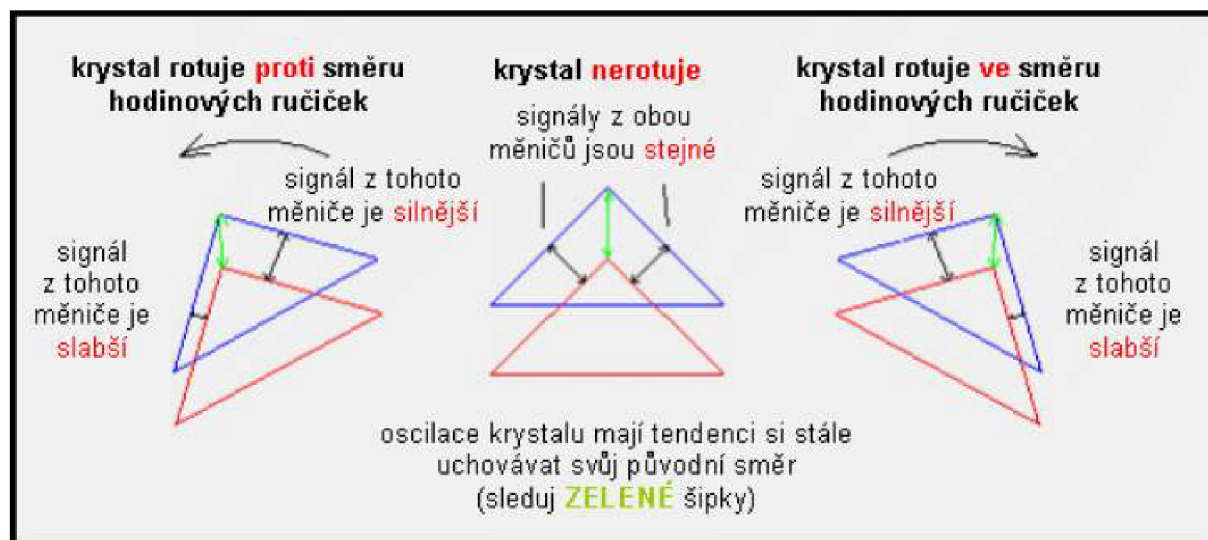
3.2.2 Coriolisova síla

[7] Coriolisova síla je zdánlivá síla, působící na pohybující se hmotný bod (těleso) v rotující soustavě. Uplatňuje se, je-li směr pohybu hmotného bodu jiný, než je směr osy rotace. Je-li těleso v otáčející se soustavě v klidu, nebo pohybuje-li se ve směru rovnoběžném s osou rotace, je vektorový součin nulový a Coriolisova síla nepůsobí. Síla je orientovaná kolmo k rovině tvořené osou rotace a směru pohybu hmotného bodu.

V praxi lze její působení kromě měření úhlových rychlostí spatřit například vymletými pravyými břehy řek, jelikož Země se otáčí a tím pádem vzniká Coriolisova síla.

3.2.3 Princip činnosti piezoelektrického snímače

Seriový piezoelektrický bimorf(krystal) je rozkmitán ve vertikálním směru. Přítomnost otáčivého pohybu vyvolá Coriolisovu sílu. Bimorf je horizontálně vychylován, ovšem oscilace bimorfu mají tendenci uchovat si svůj původní směr. Sensory, které na povrchu hranolu snímají analogovou hodnotu napětí. Podle fázového rozdílu a amplitud napětí, vyhodnocují velikost úhlové rychlosti otáčivého pohybu.



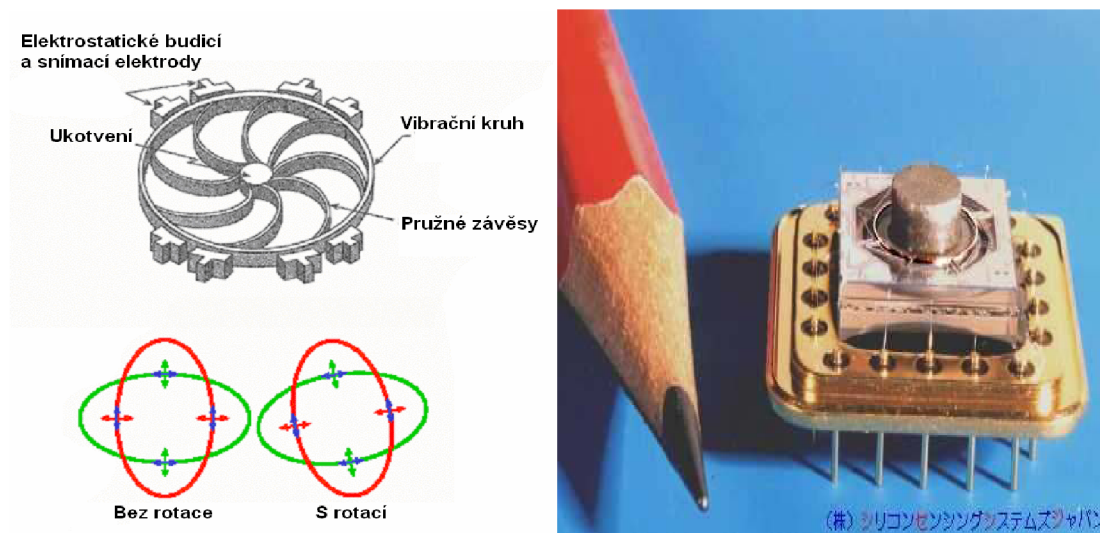
Obr. 3.1 princip piezoeel. gyroskopu [5]

Výhodou je, že tyto snímače mají krátkou odezvu, na změnu reagují do jedné padesátiny sekundy. Ovšem jejich teplotní stabilita je velmi špatná. U těchto snímačů je tím pádem nutné měřit také teplotu, a softwarově výslednou hodnotu podle dané teploty korigovat.

Výrobky založené na tomto principu vyrábí převážně firma BEI systron donner.

3.2.4 “Wine glass resonator gyroscope” (vibrující kruh):

Pracuje na podobném principu jak piezoelektrický snímač. Vibrující kruh v permanentním magnetickém poli je hnán vytvářením elektromagnetického pole do rezonance. Pohyb, který je vytvářený Coriolisovou silou, (oscilace si udržují původní směr), vytváří indukované napětí vytvořené změnou polohy v magnetickém poli (dráha kruhu se mění v elipsu). Velikost tohoto napětí určuje velikost úhlové rychlosti. No tomto principu vyrábí své čipy firma Silicon Sensing Systems.



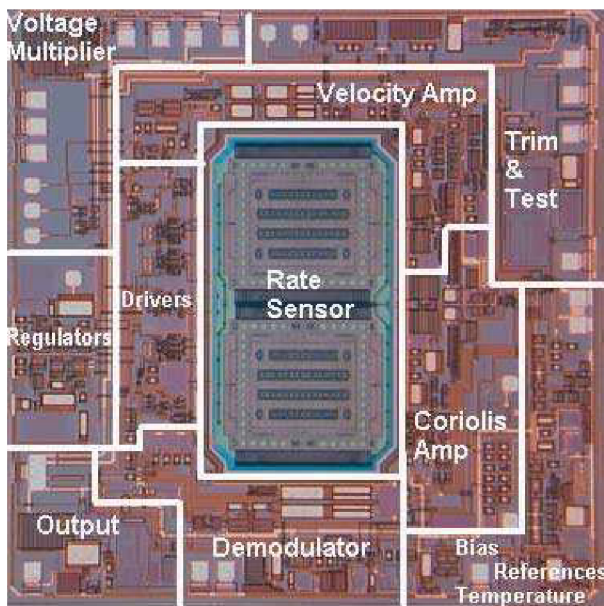
Obr. 3.2 “Wine glass resonator gyroscope” [2]

3.3 Gyroskop firmy Analog Devices:

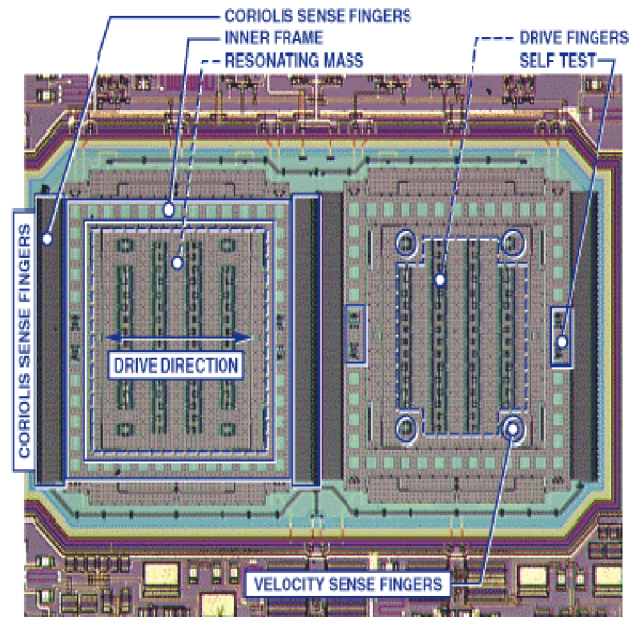
[7] V současnosti asi nejznámější a nejdostupnější integrované gyroskopy vyrábí firma Analog Devices. V jednom pouzdře je integrován samotný snímač, ale také všechny řídicí a vyhodnocovací bloky.

Jádem obvodu je samotný snímač (Rate Sensor), na který jsou "navěšeny" rezonanční obvody (Resonator Loop) pro generování pohybu snímače, obvody zpracování výstupního signálu snímače (Coriolis signal channel), testovací obvody (Self-test), obvody nábojové pumpy pro generování napětí pro rezonanční obvody, interní teplotní senzor a obvody referenčního zdroje napětí. Celý chip je provedený technologií iMEMS (integrated micro electro-mechanical system), kombinující mechanický snímač s již zmíněnými elektrickými bloky.

Strukturu samotného snímače gyroskopu tvoří dva čtvercové polykřemíkové rámy (inner frame), každý obsahující rezonanční strukturu (resonating mass) zajišťující nutnou pohybovou složku k vytvoření Coriolisovy síly (drive direction). Pohyb tohoto pružně upevněného meandru je zajišťován rezonančními piezoelektrickými budícími obvody, které jej přivedou do oblasti vlastní mechanické rezonance na frekvenci 14 kHz. Při otáčení součástky kolem jejího středu, je tak působící Coriolisova síla převáděna na změnu kapacity prostřednictvím změny vzdálenosti mnoha elektrod po stranách snímače (Coriolis Sense Fingers). Struktura je duální z důvodu potlačení vlivu nežádoucích externích rezonancí a nárazových šoků obvodu, které se na výstupu obvodu projevují jako nežádoucí šum.



Obr.3.3 celková struktura



Obr. 3.4 Snímač

4 Použité integrované obvody

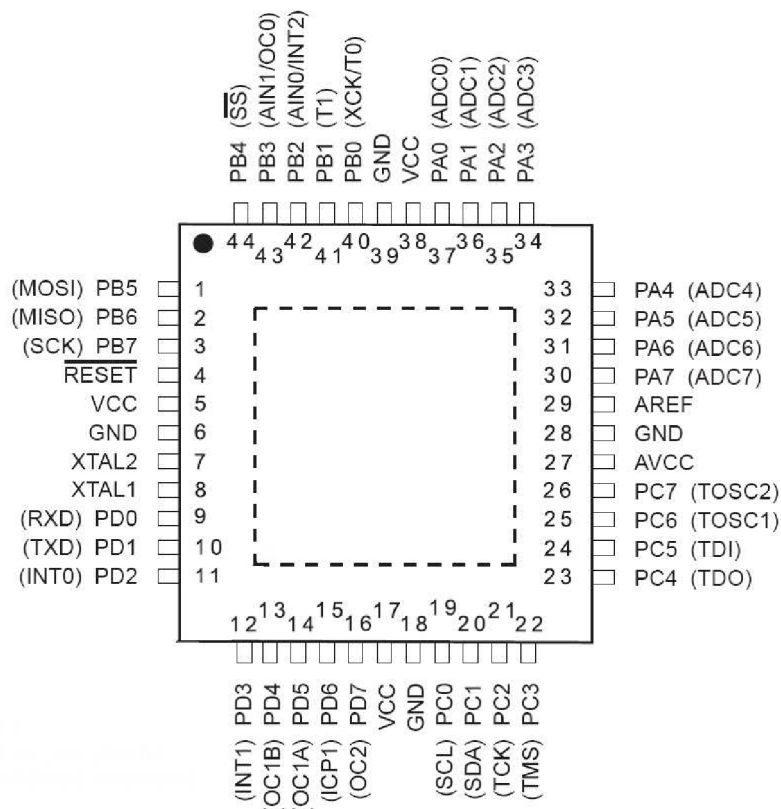
4.1 Řídící mikrokontrolér ATmega16:

Pro výběr vhodného mikrokontroléru je základem zvolit podmínky, které musí bezpodmínečně splňovat. Musí být schopen komunikovat se senzory úhlové rychlosti ADIS16250 které komunikují přes rozhraní SPI, dále musí být schopen komunikace s počítačem pomocí seriového rozhraní USART. Dále by bylo vhodné, aby pracovala při napájecím napětí 5V. Vybral jsem si mikroprocesor ATmega16 od firmy ATMEL, který všechny tyto podmínky splňuje. Tyto podmínky splňuje i plno jiných MCU, můj výběr byl ovlivněn tím, že s tímto mikroprocesorem už jsem pracoval a mám s ním své zkušenosti.

4.1.1 Základní rysy a parametry mikrokontroléru ATmega16:

- 8-mi bitová RISC architektura
- Paměť programu: 16kB Flash, až 10 000 programovacích cyklů
- Napájecí napětí: 4,5 – 5,5V
- Taktovací kmitočet: 0 – 16MHz, vnitřní oscilátor
- Programovací a ladící rozhraní JTAG
- 32 programovatelných I/O linek
- Plně duplexní seriové rozhraní USART
- Sériové master/slave SPI rozhraní
- Pouzdro TQFP44

4.1.2 Zapojení vývodů ATmega16:



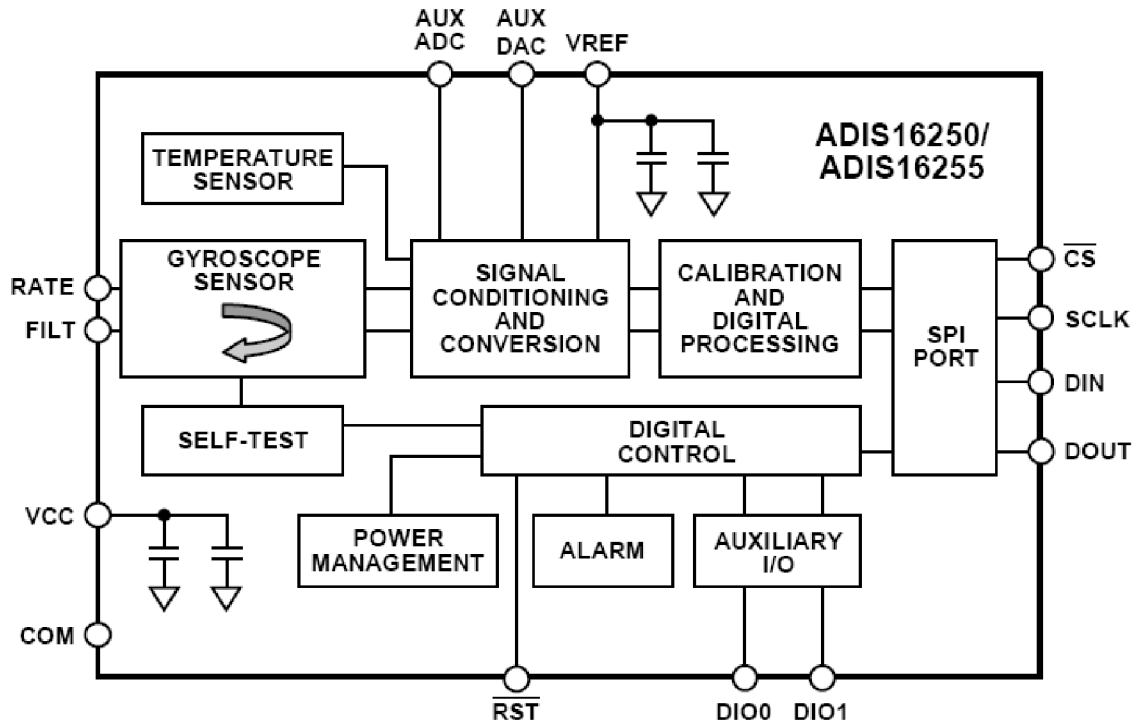
Obr. 4.1 Zapojení vývodů ATmega16

4.2 Digitální senzor úhlové rychlosti ADIS16250:

Pro svou práci jsem vybral senzor ADIS16250 od firmy Analog Devices. Jedná se o programovatelný senzor úhlové rychlosti provedený technologií iMEMS. Výběr byl omezen i finančními náklady, existují i třiosé senzory úhlové rychlosti v jediném pouzdře, které by byly vhodnější, jejich cena je ale zatím příliš vysoká. Dalším důvodem pro výběr tohoto senzoru byla nastavitelná citlivost a zabudovaný teplotní senzor a kalibrace což je vhodné pro laboratorní přípravky.

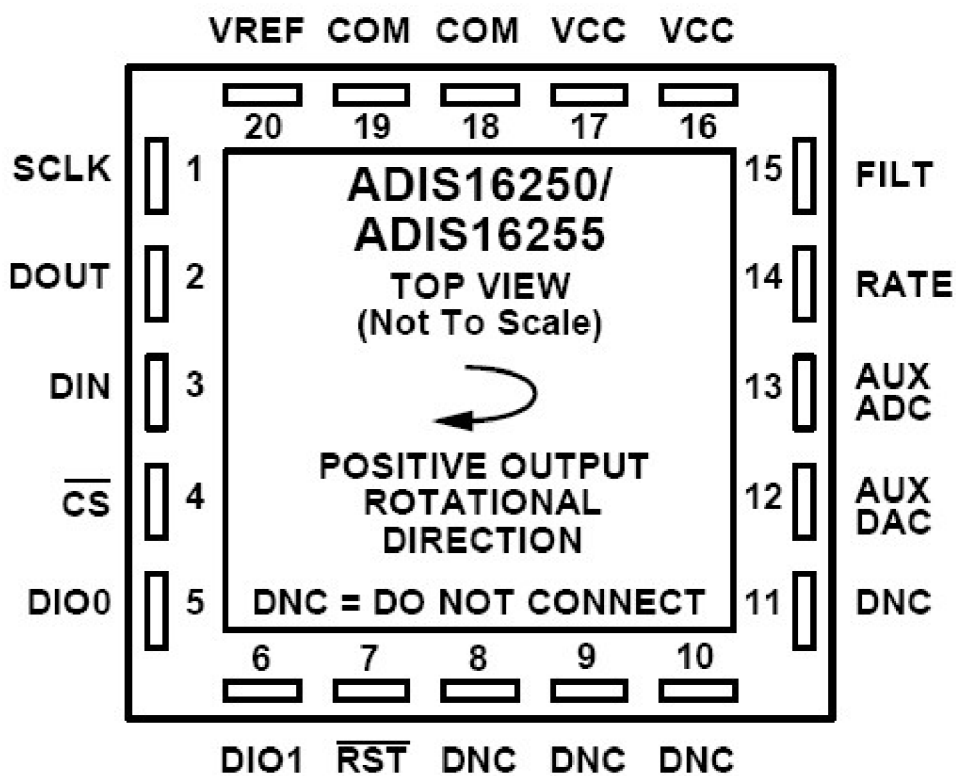
4.2.1 Základní rysy a parametry senzoru úhlové rychlosti ADIS16250:

- Nastavitelný rozsah digitálního výstupu v rozmezí $\pm 80^\circ/\text{sek.}$ až $\pm 360^\circ/\text{sek.}$
- 14-ti bitový digitální výstup měření úhlové rychlosti
- 12-ti bitový digitální výstup měření teploty
- Kalibrovaná citlivost a nulová výchylka v rozmezí teplot -40°C až 85°C
- Digitálně řízená vzorkovací frekvence
- Digitálně řízená frekvence odezvy
- Digitálně aktivovaná vlastní kontrola (self test)
- Digitálně aktivován přechod do úsporného režimu
- Komunikace přes sériové rozhraní SPI
- Napájecí napětí: 4,75-5,25V stejnosměrné
- Pouzdro LGA20



Obr. 4.2 Vnitřní struktura senzoru ADIS16250

4.2.2 Zapojení vývodů senzoru ADIS16250



Obr. 4.3 Zapojení vývodů ADIS16250

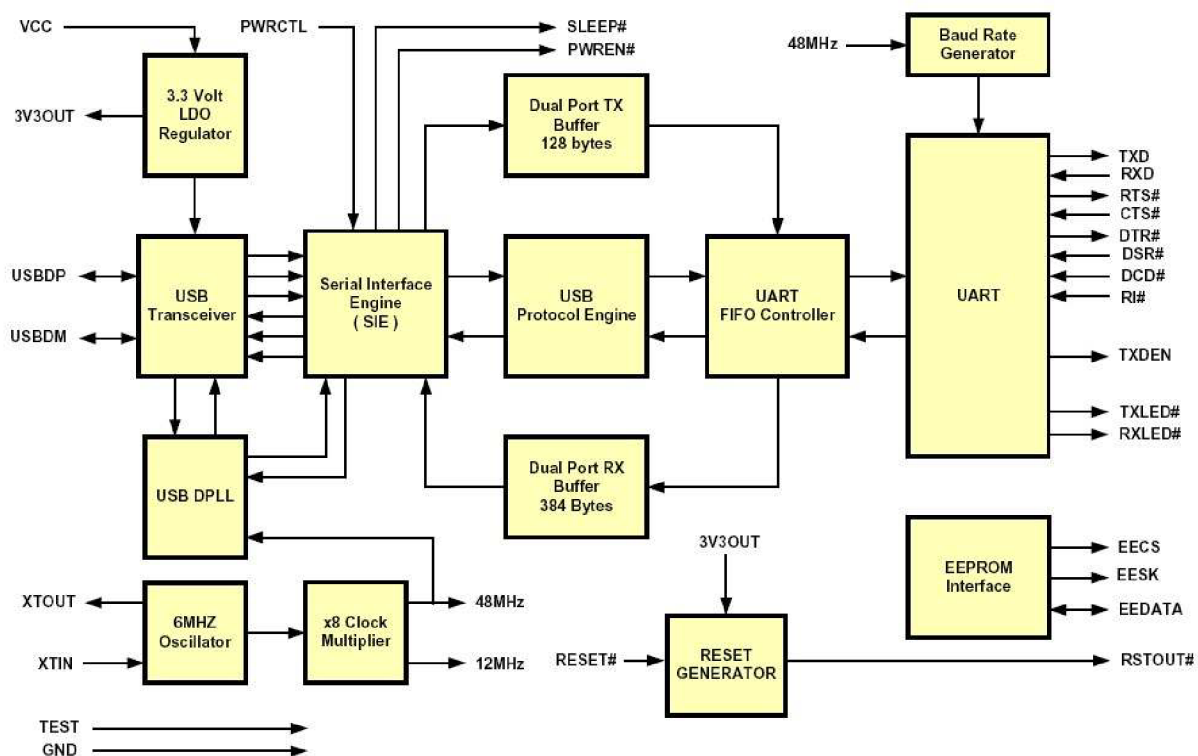
4.3 Duální převodník USB-UART FT232BM

V projektu je využit pro obousměrnou komunikaci mezi mikrokontrolérem a počítačem.

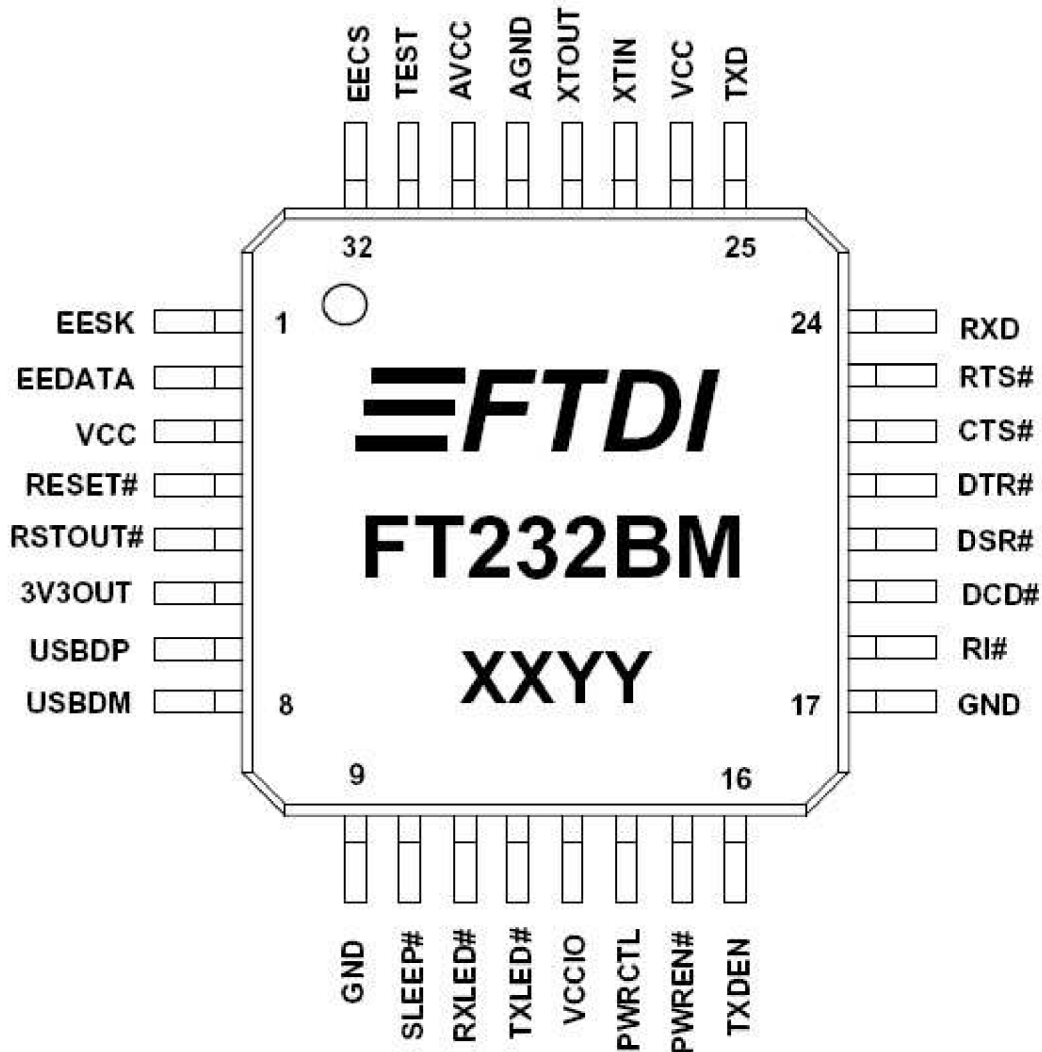
4.3.1 Základní parametry:

- Rozhraní UART podporuje 7/8 datových bitů, 1/2 stop bity a podporu parity
- Přenosová rychlost 300 Bd až 3 MBd
- Vstupní buffer o velikosti 384 Bytů, výstupní buffer 128 Bytů
- Možnost plně hardwarového řízení přenosu - signály RTS, CTS, DTR, DSR, DCD, RI
- Možnost práce s 5V i 3,3V logikou
- Integrovaný obvod Power-On-Reset
- Napájecí napětí 4,35 - 5,25V - možno napájet přímo z USB
- Kompatibilní s USB 1.1 i 2.0
- Pouzdro LQFP-32

4.3.2 Blokové schéma a zapojení vývodů



Obr. 4.4 Vnitřní struktura převodníku FT232BM



Obr. 4.5 Zapojení vývodů převodníku FT232BM

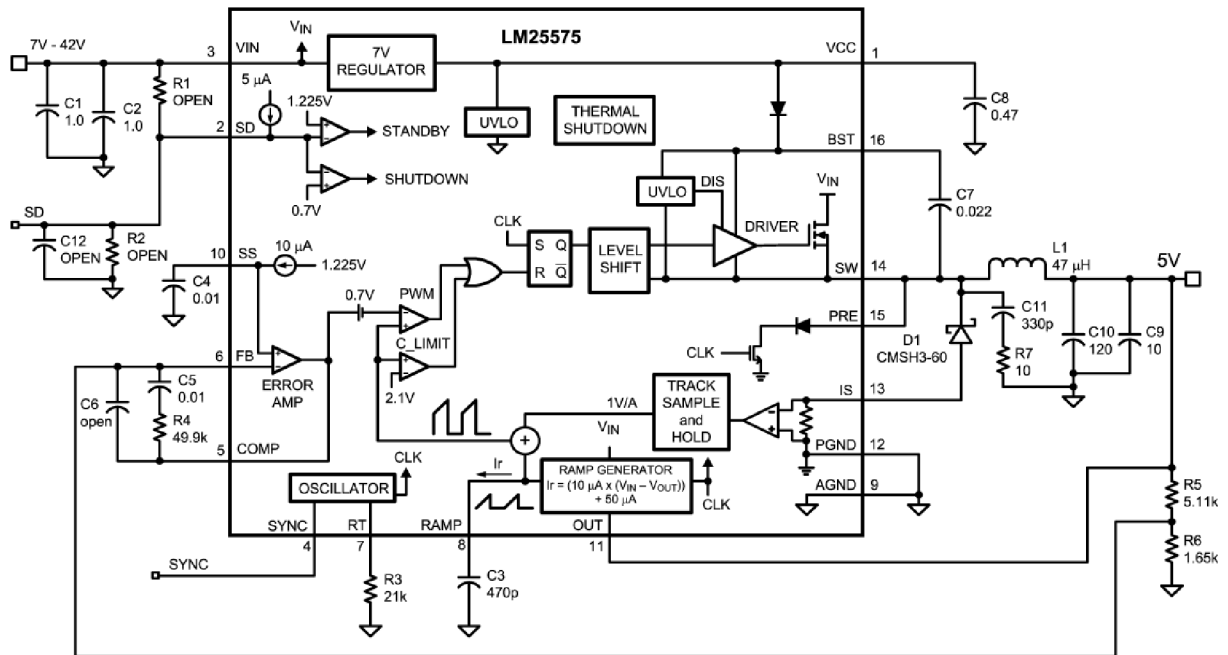
4.4 Snížující DC-DC měnič LM2575

V projektu je využít k transformaci palubního stejnosměrného napětí 28V, které se nachází v letadlech na 5V, což je napájecí napětí jednotlivých obvodů v projektu.

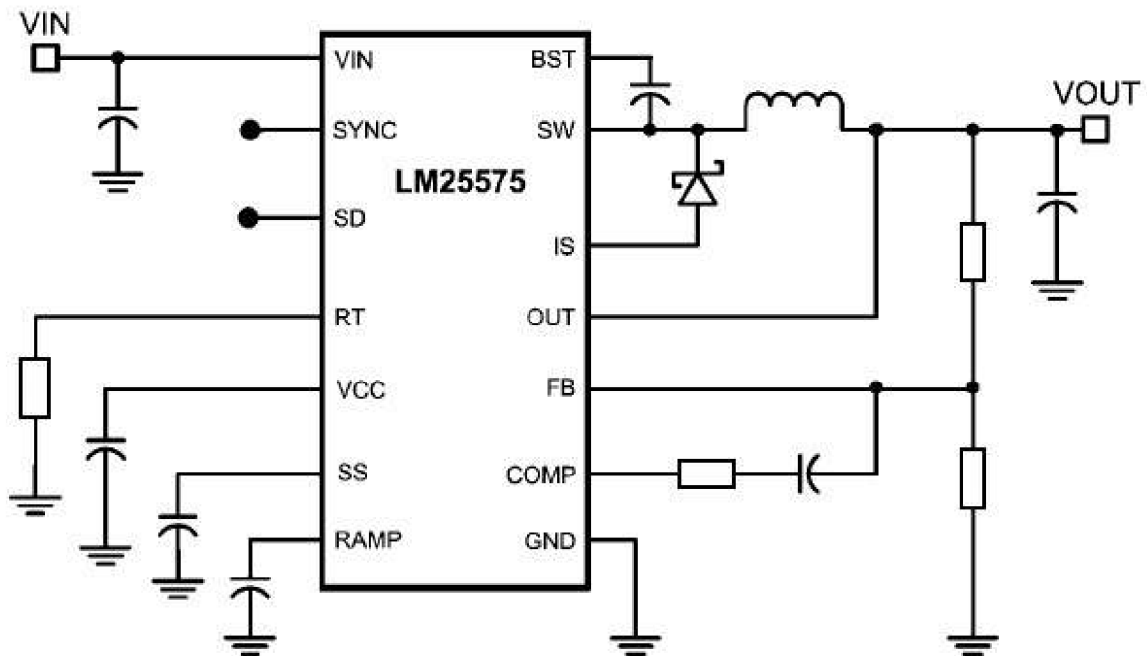
4.4.1 Základní parametry:

- Rozsah vstupního napětí: 6 – 42V
- Rozsah výstupního napětí: 1,23 – 40V
- Rozsah pracovních frekvencí: 50kHz – 1MHz nastavitelných jediným rezistorem
- Maximální výstupní proud: 1500mA
- Vysoká účinnost kolem 90%
- Integrovaný N-kanálový MOSFET tranzistor 42V, 330mΩ
- Programovatelný měkký start
- Ochrana proti přetížení
- Malé množství externích součástek

4.4.2 Blokové schéma a obecné zapojení vývodů měniče LM25575



Obr. 4.6 Vnitřní struktura měniče LM25575

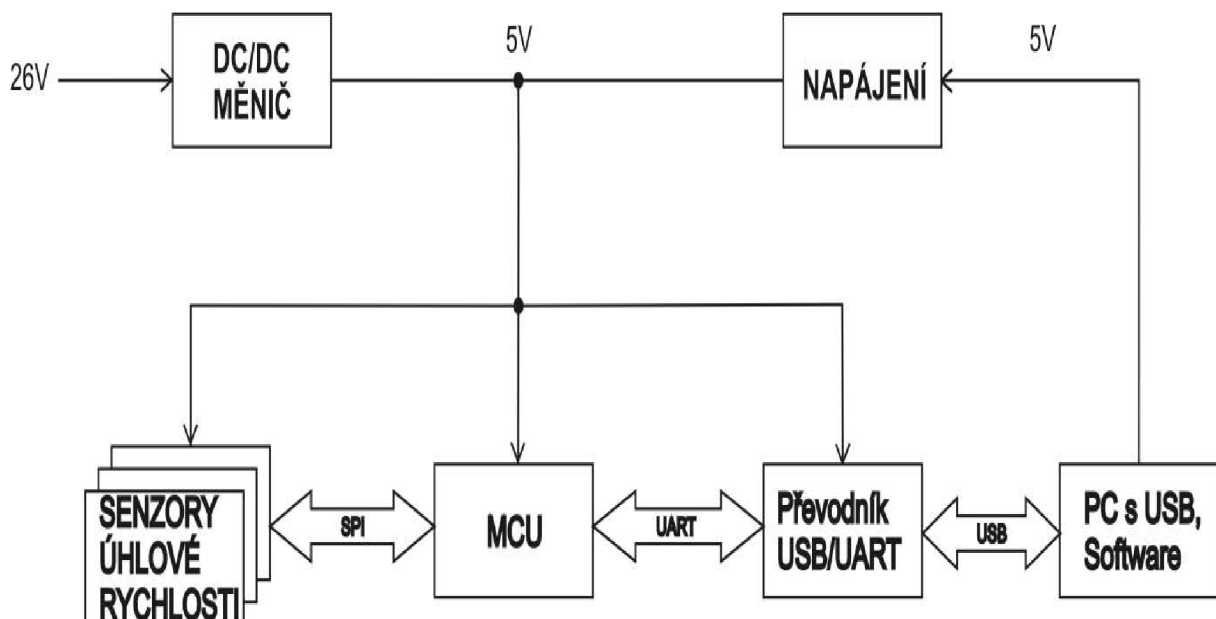


Obr. 4.7 Základní zapojení externích součástek měniče LM25575

5 Praktická realizace, popis jednotlivých bloků:

5.1 Blokové schéma přípravku pro měření úhlové rychlosti

Zařízení se skládá z několika dílčích částí, kterými jsou napájení, DC/DC měnič, mikroprocesorová jednotka, USB/UART převodník, počítač s USB rozhraním a softwarem pro zobrazení naměřených hodnot a třech senzorů úhlové rychlosti.



Obr. 5.1 Blokové schéma třiosého senzoru úhlové rychlosti

5.2 Modul senzorů úhlové rychlosti a komunikace s MCU

5.2.1 SPI:

Senzory úhlové rychlosti ADIS16250 jsou pro komunikaci vybaveny rozhraním SPI (Serial peripheral interface bus). Jedná se o sériový plně duplexní přenos pracující v master/slave módu. Pro komunikaci se využívá čtyř logických signálů:

- SCLK – serial clock (hodinový signál)
- MOSI – master output, slave input (přenos dat směrem od master do slave zařízení)
- MISO – master input, slave output (přenos dat směrem od slave k master zařízení)
- SS – slave select – slouží k výběru slave zařízení, se kterým chceme komunikovat. Slave zařízení vybíráme log. 0

5.2.2 Přenos dat:

Master zařízení vysílá hodinový signál, sloužící k synchronizaci komunikace a určující rychlost přenosu, která musí být zvolena tak, aby nepřekročila maximální přenosovou rychlost ani jednoho z komunikujících zařízení. Dále je nutné, aby na pinu SS slave zařízení byla log.0. Ostatní slave zařízení jsou v tu chvíli neaktivní a na jejich pinu SS musí být log.1. Z toho vyplývá, že master je schopen v jednu chvíli komunikovat pouze s jedním slave zařízením. Je-li na SS vysoká úroveň signálu, slave zařízení se nepoužívá a MISO je ve stavu vysoké impedance.

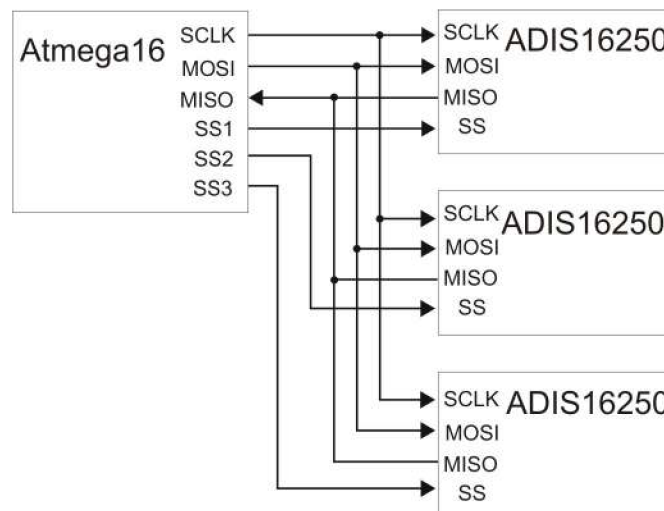
5.2.3 Komunikace po sběrnici SPI mezi ATmega16 a ADIS16250:

Z důvodu rozdílných označení jednotlivých vývodů pro shodnou funkci, jsou vývody a jejich názvy pro lepší přehled znázorněny pomocí následující tabulky. Dále v textu se bude používat běžné značení vývodů, stejné jako u ATmega16.

Tab. 1: Sjednocení názvu vývodů jednotlivých výrobců

ATmega16	SS	MISO	MOSI	SCLK
ADIS 16250	CS	DOUT	DIN	SCLK

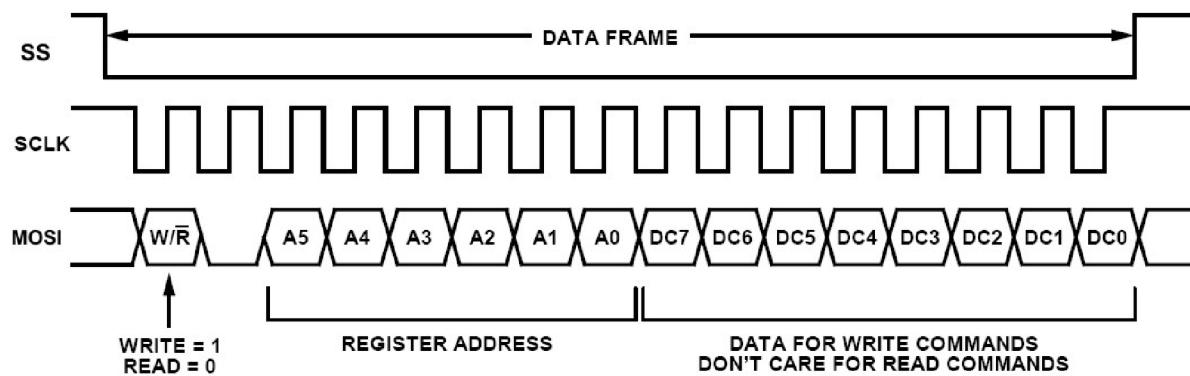
Mikroprocesor pracuje v režimu master, senzory v režimu slave.



Obr. 5.2 Schéma propojení vývodů pro komunikaci přes rozhraní SPI

5.2.4 Zápis do registru:

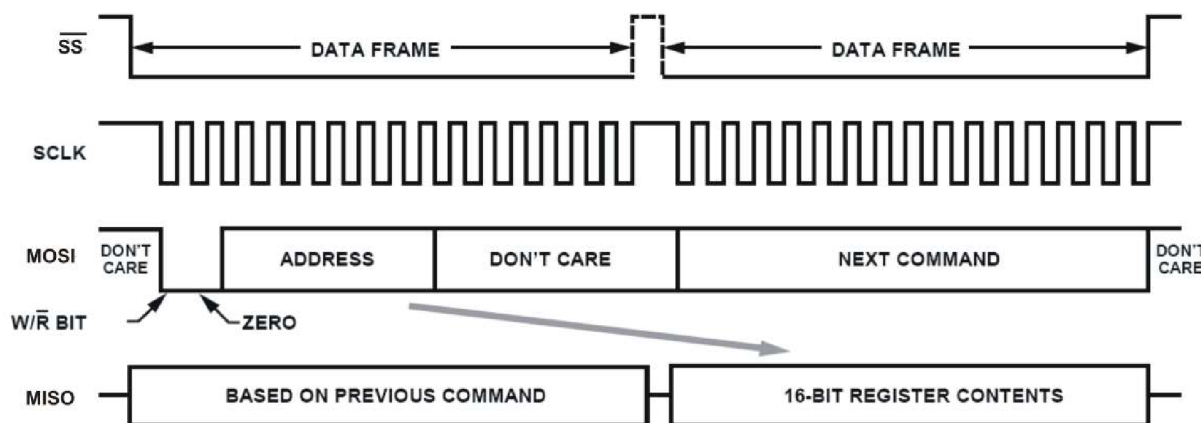
Senzor ADIS16250 pracuje s 16-ti bitovými registry. Registr je rozdělen na 2 Byty (MSB a LSB) a každý Byte má svou vlastní 6-ti bitovou adresu. Z toho vyplývá že jeden registr má dvě 6-ti bitové adresy.



Obr. 5.3 Časové průběhy na jednotlivých vývodech při operaci zápis [3]

Kompletní datový rámec je dlouhý 16 hodinových cyklů a obsahuje 16bitů. První bit určuje, jedná-li se o čtení nebo zápis, poté následuje pokaždé log.0. Dále následuje 6bitů obsahujících adresu registru. Z tohoto vyplývá že při zápisu informací do 16-ti bitového registru potřebujeme dva datové rámce, neboť první Byte datového rámce je použit pro řídicí informace a adresu registru a druhý byte slouží k zápisu dat do příslušného registru.

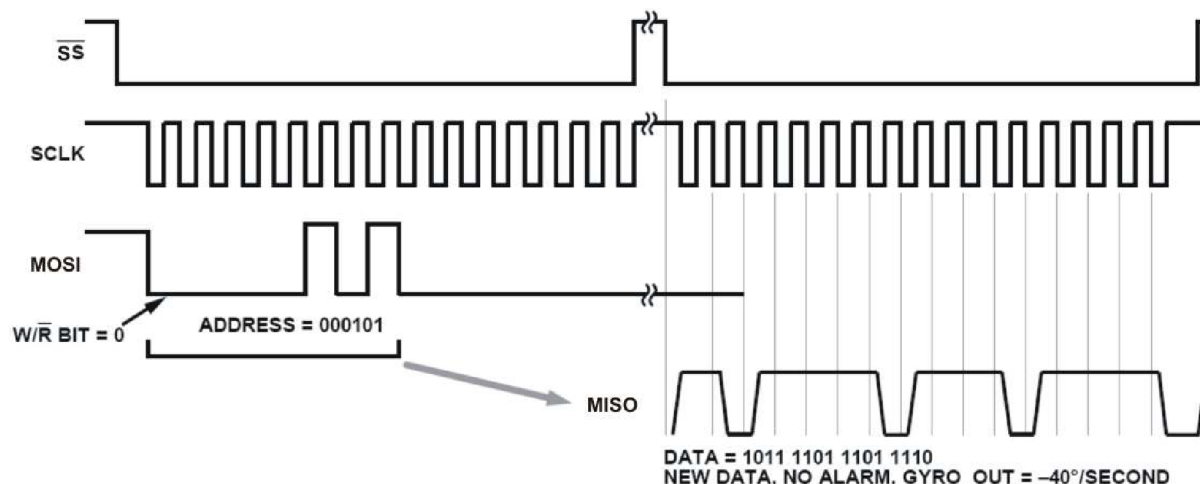
5.2.5 Čtení dat z registru:



Obr. 5.4 Časové průběhy na jednotlivých vývodech při operaci čtení [3]

Pro čtení dat naměřených senzorem je nutné, aby na vstupu SS byla přivedena log.0, čímž aktivujeme komunikaci s daným zařízením a aby master generoval hodinový signál. Komunikaci zahájíme přivedením dvou log.0 za sebou, s tím že ta první slouží jako příkaz čtení. Dále následuje 6-ti bitová adresa registru, kde očekáváme data, která chceme přijmout. Zbylých 8 bitů v tomto rámci se při příkazu čtení nepoužívá (využívají se pouze v módu zápis). Obsah námi adresovaného registru se přenese v následujícím datovém rámci přes vývody MISO, viz. obr 5.4. Pro přenesení celého registru obsahujícího dvě adresy stačí adresovat jen jednu kteroukoli adresou.

Na obr. 5.5 lze vidět konkrétní příklad přenosu naměřené úhlové rychlosti -40 %/s. V 1.časovém intervalu odpovídajícímu době trvání jednoho rámce, vyšle MCU po vodiči MOSI informaci, že chce číst a následně adresu daného registru, v našem případě se jedná o adresu: 0b000101 = 0x05 což je adresa registru GYRO_OUT viz tab.3. V následujícím datovém rámci je k dispozici na vývodech MISO obsah registru GYRO_OUT.



Obr. 5.5 Časové průběhy na jednotlivých vývodech při operaci čtení, konkrétní příklad [3]

5.2.6 Výstupní datové registry:

Senzor ADIS16250 obsahuje 6 výstupních registrů, které obsahují data o naměřené úhlové rychlosti, teplotě a dalších. Výstupní data jsou průběžně samočinně obnovována bez ohledu na rychlost čtení dat uživatelem.

Tab. 2: bitová mapa registru v senzoru ADIS16250

MSB

ND	EA	D13	D12	D11	D10	D9	D8
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0

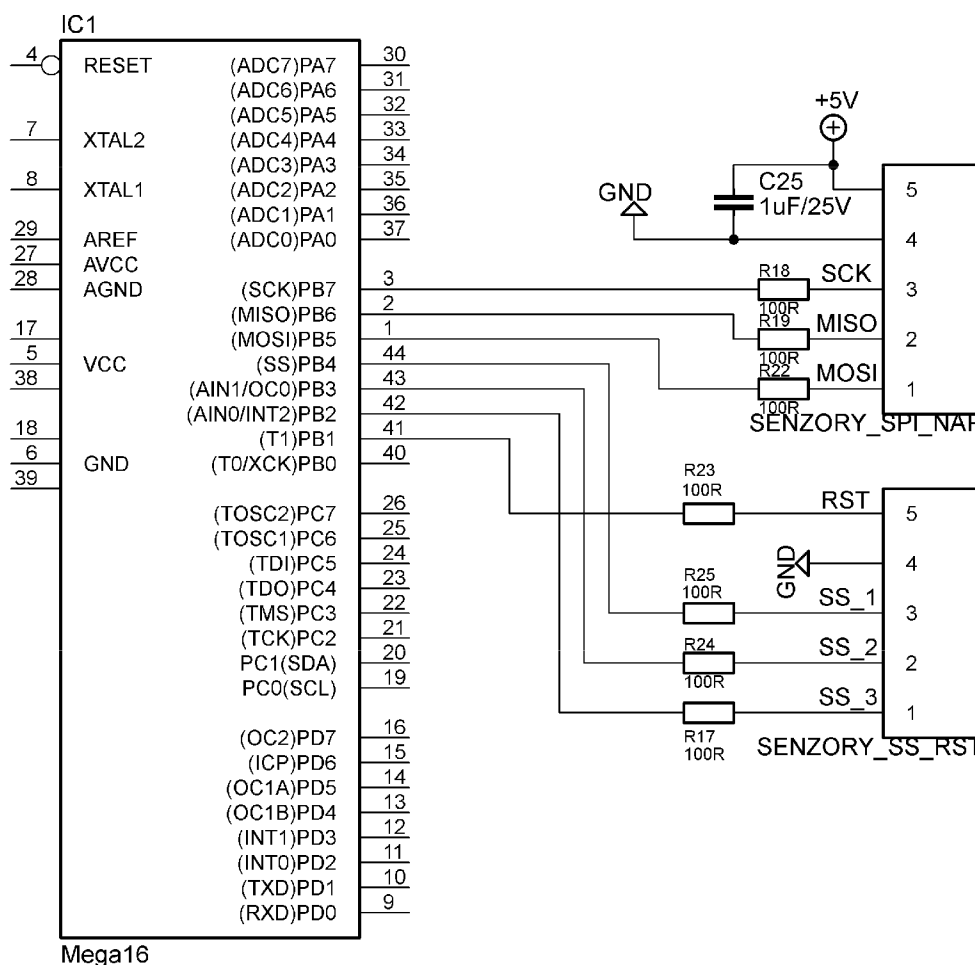
LSB

Každý registr obsahuje 16 bitů. ND, EA a 14 datových. ND, který je zároveň nejvýznamnější bit, slouží jako indikátor nových dat. Pokud je registr obnoven a tudíž obsahuje nová data, MSB bit se nastaví na log.1, po přečtení registru se vrátí do stavu log.0. Druhý nejvýznamnější bit slouží k indikaci chyby, která mohla být způsobena řadou příčin např. pokud by se napájecí napětí senzoru dostalo mimo povolený rozsah. Zbýlých 14 bitů slouží pro data. Výstupní data, které senzor ADIS16250 generuje jsou buď 12-ti nebo 14-ti bitová. Pokud jsou 12-ti bitová bity D13 a D12 se nevyužijí. Výjimku tvoří registr ENDURANCE obsahující data z čítače počtu zápisů do flash paměti, který obsahuje 16-ti bitová data, zde jsou bity ND a EA využity jako datové.

Tab. 3: Přehled výstupních registrů senzoru ADIS16250

Název	Obsahuje data o:	Adresa	Rozlišení [bity]	Datový formát	Měřítko (na 1 LSB)
ENDURANCE	Počtu zápisů do Flash paměti	0x01 0x00	16	Binární	1
SUPPLY_OUT	Napájecím napětí	0x03 0x02	12	Binární	1,8315 mV
GYRO_OUT	Úhlové rychlosti	0x05 0x04	14	Dvojkový doplněk	0,07326°/s
AUX_ADC	Napětí přídavného analog. vstupu	0x0B 0x0A	12	Binární	0,6105mV
TEMP_OUT	Teplotě	0x0D 0x0C	12	Dvojkový doplněk	0,1453 °C
ANGL_OUT	Úhlu	0x0F 0x0E	14	Binární	0,03663°

5.2.7 Obvodové schéma:



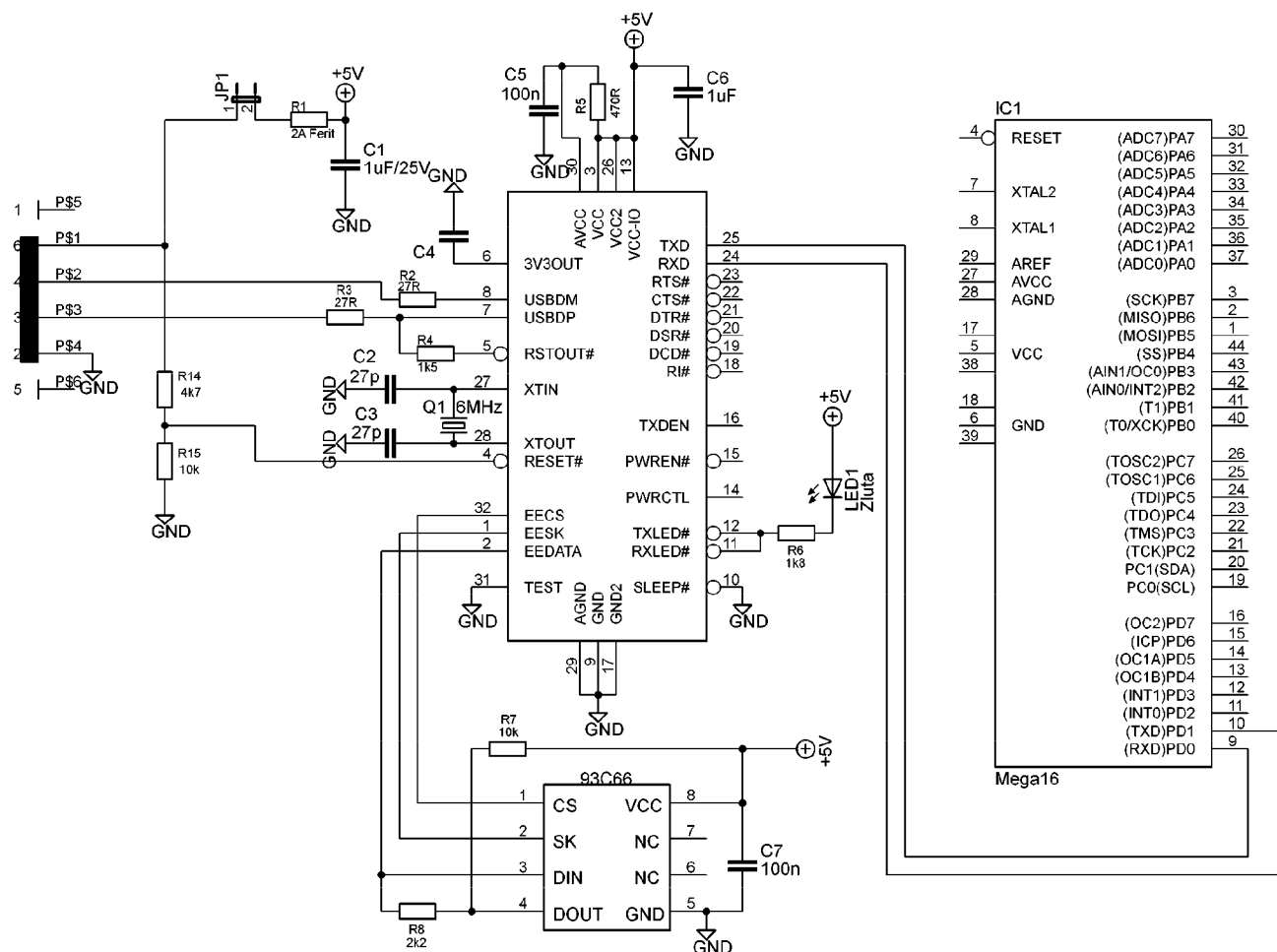
Obr. 5.6 Obvodové schéma ATmega16 –SPI

Obvodové propojení senzorů s mikrokontrolérem pomocí rozhraní SPI je vcelku jednoduché. U mikrokontroléru ATmega16 je pro SPI rozhraní využit port B. Všechny piny, krom SS jsou společné pro všechny senzory. Pomocí úrovně na pinech SS vybíráme s kterým senzorem zrovna chceme komunikovat. Na obr.5.6 jsou místo senzoru zakresleny konektory, na které se připojí modul se senzory úhlové rychlosti. Pro zapojení je vhodné použít pouze ochranné rezistory a filtrační keramické kondenzátory, které je vhodné umístit co nejbliž napájecím pinům senzoru ADIS16250.

5.3 Komunikace mezi MCU a PC:

Nejjednodušší komunikaci mezi mikroprocesorem ATmega16 a PC lze provést pomocí sériové linky, na straně MCU USART, na straně PC COM port. Jelikož ale v dnešní době už počítač s COM portem není samozřejmostí, použijeme pro komunikaci rozhraní USB a obousměrný převodník USB/UART: FT232BM.

5.3.1 Obvodové zapojení:

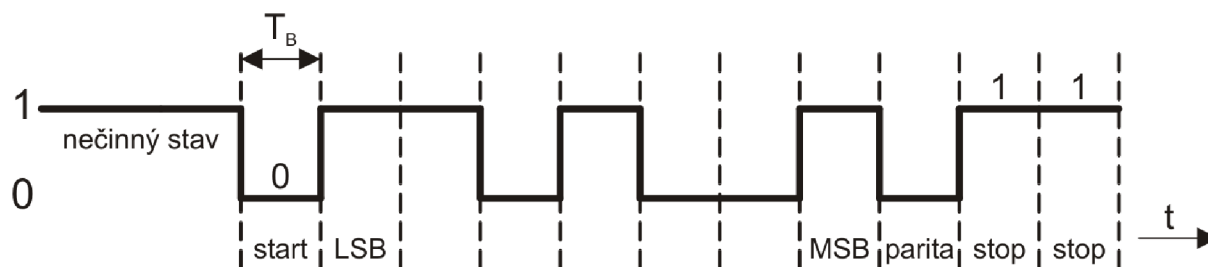


Obr. 5.7 Obvodové schéma komunikace ATmega16 – PC

Toto zapojení vychází z doporučeného zapojení od výrobce. Komunikace mezi MCU a převodníkem FT232BM je tvořena dvěma vodiči. Každý vodič pro jeden směr propojením vysílacího pinu (TXD) s přijímacím pinem (RXD) na druhém obvodu. Oproti doporučenému zapojení výrobce je zde úprava v podobě propojky JP1, pomocí které lze nastavit možnost využití napájení z portu USB.

5.3.2 Princip přenosu dat pomocí rozhraní UART

Využívá se principu seriového asynchronního (arytmického) přenosu dat, kdy vysílač ani přijímač nemají společný hodinový signál. Každá strana má svůj vlastní generátor hodinových impulzů. Tyto generátory musí být ovšem dostatečně přesné, aby po dobu přenosu několika málo bitů se daly považovat za společné a nedošlo k jejich rozfázování a tím pádem k chybné interpretaci přenesené informace na přijímací straně. Při asynchronní komunikaci musí být předem dána struktura přenášeného signálu, tato struktura se poté nazývá rámec. Tento rámec obsahuje start bit, 5 až 9 datových bitů, může obsahovat také paritní bit a 1 až 2 stop bity v tomto pořadí.



V klidovém stavu je signál vždy na log. úrovni 1. Začátek rámce je definován start bitem, který má vždy hodnotu log. 0. Po něm následuje 7 až 9 datových bitů, kdy nejméně významný bit je odvíšlán jako první. Poté může být vložen kontrolní paritní bit pro kontrolu správného přenosu pro sudou nebo lichou paritu. Následují 1 až 2 stop bity, které mají vždy úroveň log. 1.

Každé rozhraní UART obsahuje seriový vysílač (Tx) který přijímá paralelní datové slovo z vysílacího datového registru. Toto slovo převede do seriové podoby potřebné pro přenos a doplní o řídicí a kontrolní bity. Následuje seriové odeslání dat zvolenou přenosovou rychlostí která je řízena vysílacím hodinovým signálem TxCLK.

Seriový přijímač (Rx) přijímá seriová vstupní data. Začátek rámce identifikuje přechodem signálu z log. 1 na 0 a převádí je do paralelní reprezentace, která je následně k dispozici v přijímacím datovém registru pro přenos do mikrokontroléru.

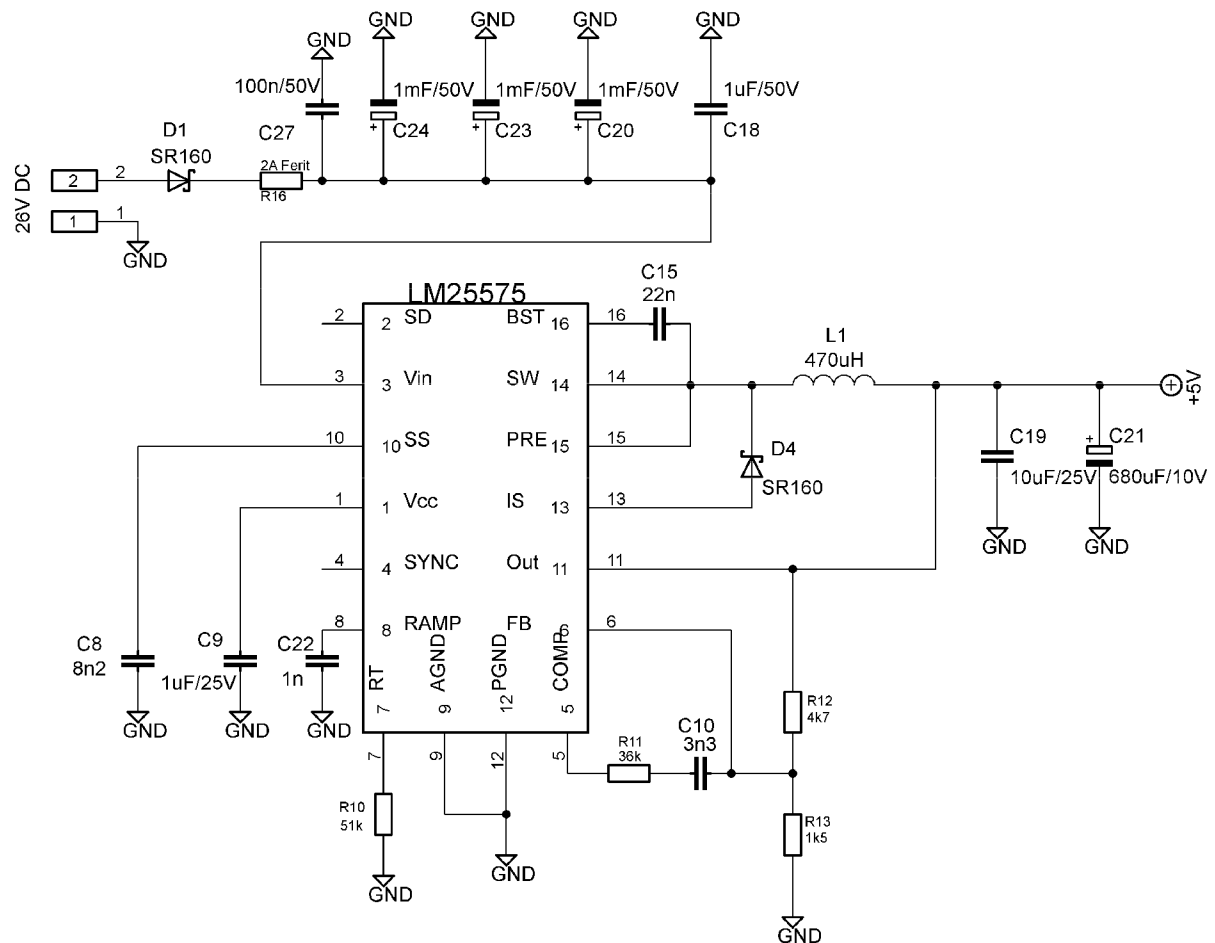
Pro lepší synchronizaci a odstranění nežádoucích zákmitů má hodinový signál přijímače RxCLK několikanásobně vyšší frekvenci než je přijímaná bitová rychlost. Toho se využívá např. k tomu, aby nedocházelo k chybné detekci začátku přenosu kdy přijímač po první sestupné hraně která označuje začátek přenosu několik hodinových taktů RxCLK vyčká a poté si ověří jestli je i nadále signál v úrovni. log. 0. Pokud ano jedná se skutečně o start bit a tím pádem začátek rámce.

5.4 Blok snižujícího DC-DC měniče:

Slouží k převodu stejnosměrného napětí 28V které se využívá v letadlech na 5V což je napájecí napětí potřebné pro přípravek.

5.4.1 Obvodové schéma

Toto zapojení na Obr. 5.8 vychází ze zapojení doporučeného výrobcem. Na www stránkách výrobce je také aplikace WEBENCH pro návrh a výpočet hodnot která po zadání potřebných parametrů vypočítá hodnoty jednotlivých externích součástek. Elektrolytické kondenzátory C20, 23 a 24 slouží k udržení napětí při chvilkovému poklesu palubního napětí při rozběhu motorů při startu letadla. Poměrem hodnot odporů R12 a R13 se nastavuje hodnota výstupního napětí. R10 slouží k nastavení pracovní frekvence DC-DC měniče. Podrobný postup výpočtu jednotlivých hodnot je v [10].



Obr. 5.8 Obvodové zapojení DC-DC měniče

6 Program pro řídicí mikrokontrolér

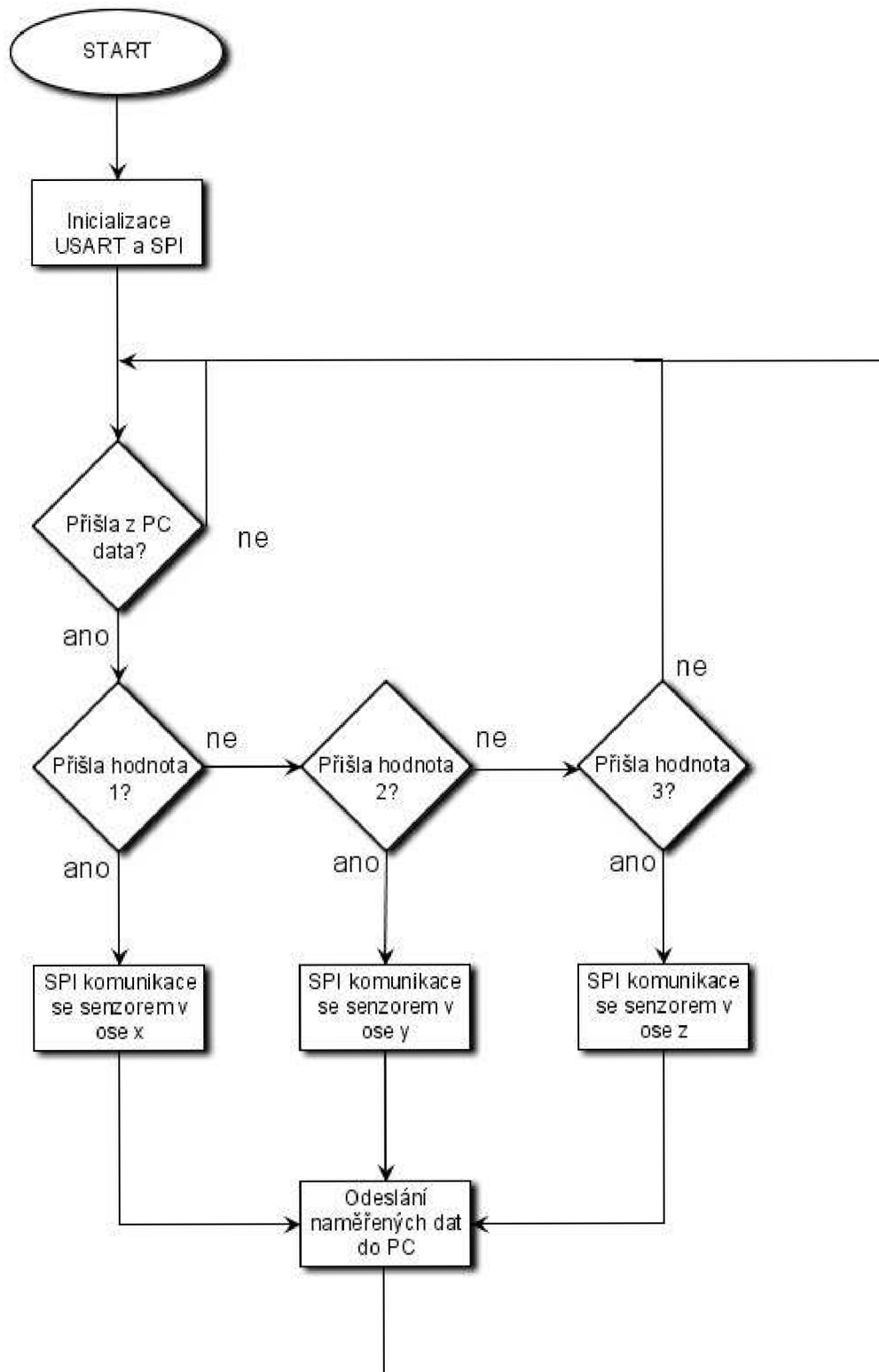
Zde budou uvedeny stěžejní části programu. Jejich popis a nastavení registrů pro inicializaci komunikace pomocí rozhraní SPI mezi mikrokontrolérem a senzory a rozhraní USART pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a PC. Program pro mikrokontrolér je napsán v programovacím jazyce C.

6.1 Vývojový diagram

Princip komunikace mezi mikroprocesorem a senzory je založen na principu požadavek/odpověď. Zjednodušený průběh programu je patrný z vývojového diagramu na Obr. 6.1.

Po zapnutí proběhne inicializace komunikačních rozhraní USART a SPI a povolení přerušování od přijímací jednotky USART při detekci signálu z PC. V tuto chvíli je program ve stavu kdy čeká na data vyslaná z PC. V programu je nastaveno na jaké datové posloupnosti má reagovat, a má k nim přiřazené informace se kterým senzorem má komunikovat a obsah jakého registru ze senzoru přečíst. Následně proběhne komunikace mezi MCU a zvoleným senzorem, kdy se v první fázi pošle do senzoru adresa námi požadovaného registru a v dalším kroku senzor obsah registru odešle do MCU, který je v následujícím kroku pošle pomocí

rozhraní USART do počítače a opět se program v MCU dostane do smyčky kdy čeká na přerušení generované příchozími daty z PC.



Obr. 6.1 vývojový diagram

6.2 Inicializace rozhraní SPI a nastavení registrů

Mikrokontrolér je v roli master, senzory v roli slave. Pro rozhraní SPI je u mikrokontroléru ATmega16 vyhrazen port B. Podstatné je nastavení následujících dvou registrů.

6.2.1 DDRB – Data Direction Register:

Slouží k nastavení jednotlivých I/O linek mikroprocesoru pro port B. Hodnota v tomto registru určuje jedná-li se o vstupní (0) nebo výstupní (1) linku.

bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	DDB7	DDB6	DDB5	DDB4	DDB3	DDB2	DDB1	DDB0
Implicitně	0	0	0	0	0	0	0	0

Pro komunikaci v režimu master je třeba nastavit jako výstupní linky ty, které plní následující funkce: SCK, MOSI, SS a RESET. Jediná vstupní linka je MISO.

6.2.2 SPCR – SPI Control Register:

bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	SPIE	SPE	DORD	MSTR	CPOL	CPHA	SPR1	SPR0
Implicitně	0	0	0	0	0	0	0	0

- SPE – aktivace SPI rozhraní: **1 – aktivní**
0 – neaktivní
- DORD – pořadí přenášených dat: 1 – první je přenesen LSB bit
0 – první je přenesen MSB bit
- MSTR – výběr režimu master/slave: **1 – režim master**
0 - režim slave
- CPOL – polarita hodinového signálu: **1 – vysoká úroveň při nečinnosti**
0 – nízká úroveň při nečinnosti
- CPHA – nastavení aktivní hrany: **1 – data se zapisují při sestupné hraně**
0 – data se zapisují při nástupné hraně
- SPR1, SPR0 – kombinace těchto dvou hodnot slouží k nastavení kmitočtu hodinového signálu v poměru k vnitřní taktovací frekvenci mikrokontroléru. V tomto projektu je

vnitřní taktovací frekvence $f_{osc} = 6 \text{ MHz}$ a hodnoty SPR1 a SPR0 odpovídají taktovací frekvenci $f_{osc}/16 = 375 \text{ kHz}$ viz.[4]

Tučným písmem je znázorněno použité nastavení. Hodnoty CPOL, CPHA a DORD jsou pevně dány výrobcem senzoru.

6.2.3 SPDR – SPI Data Register

bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	MSB							LSB
Implicitně	-	-	-	-	-	-	-	-

Datový registr, zápis do tohoto registru iniciuje přenos tím, že hodnoty zapsané v tomto registru se přesunou do výstupního posuvného registru a odešlou se do senzorů. Čtení toho registru způsobí načtení dat z bufferu vstupního posuvného registru.

6.3 Inicializace rozhraní USART a nastavení registrů

Rozhraní USART slouží pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a PC. Přenosová rychlost je 19200 bd. Datový rámeček má formát 8 bitů/2 stop bity. Paritní bit není využit. Příklad výpočtu hodnoty UBRR, pomocí které se nastavuje přenosová rychlost, kde f_{cpu} je taktovací frekvence procesoru a SR je námi požadovaná přenosová rychlost. Výpočet převzat z [4].

$$UBRR = \frac{f_{cpu}}{16 \cdot SR} = \frac{6 \text{ Mhz}}{16 \cdot 19200} \approx 20 \quad [-]$$

6.3.1 UCSRB – USART Control And Status Register B

bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	RXCIE	TXCIE	UDRIE	RXEN	TXEN	UCSZ2	RXB8	TXB8
Implicitně	0	0	0	0	0	0	0	0

- RXCIE – povolení přerušení pro příjem: **1 – aktivní**
0 – neaktivní
- RXEN – aktivace přijímače: **1 – aktivní**
0 – neaktivní

- TXEN – aktivace vysílače: **1 – aktivní**
0 – neaktivní

Ostatní hodnoty zůstávají implicitně nastaveny v 0.

6.3.2 UCSRC – USART Control And Status Register C

bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	URSEL	UMSEL	UPM1	UPM0	USBS	UCSZ1	UCSZ0	UCPOL
Implicitně	1	0	0	0	0	1	1	0

- USBS – počet stop bitů: **1 – 2 stop bity**
0 – 1 stop bit

Ostatní hodnoty zůstávají implicitně nastaveny v 0.

7 Řídící aplikace pro PC

Na straně počítače je pro řízení a sběr dat využito prostředí Matlab. Zde je uvedení a popis skriptu pro aktivaci seriového portu, zachycení a zobrazení naměřených hodnot. Příkazy jsou vypsané tučně.

smazání předchozích proměnných a zavření předchozích oken:

```
clear all;  
close all;
```

nastavení počtu naměřených vzorků:

```
pocet=input('zadej pocet mereni');
```

nastavení seriového portu a formátu rámce:

```
s=serial('COM2','BaudRate',19200,'Parity','none','DataBits',8,'StopBits',2)
```

otevření příslušného seriového portu:

```
fopen(s);
```

spuštění vnitřního čítače pro měření času(časomíra):

```
tic;
```

cyklus pro zvolený počet vzorků:

```
for k=1:pocet
```

odeslání požadavku do MCU (odesílanou hodnotu 2 má řídicí program MCU nadefinovanou pro úhlovou rychlost senzoru v ose z):

```
fprintf(s,'3');
```

načtení 2 datových rámců odeslaných z MCU na požadavek z předchozího příkazu do maticové proměnné `data`, datové rámce musí být právě dva, neboť hodnota úhlové rychlosti je vyjádřena 14-ti bity a v jednom datovém rámci je možné odeslat nanejvýš 8bitů. Proto je rozdělena na dvě části: MSB a LSB:

```
data(:,k)=fread(s,2);
```

přepočítání získaných hodnot na údaj o úhlové rychlosti a zápis do proměnné:

```
gyro_z(k,2)=(twoscomplement((data(1,k)*256+data(2,k)),14))*0.07326;
```

ke každému údaji o změřené úhlové rychlosti je přiřazena časová značka:

```
gyro_z(k,1)=toc;
```

zobrazení grafu, který se načítá průběžně s naměřenými hodnotami:

```
plot(gyro_z(:,1),gyro_z(:,2)),xlabel('cas [s]'),ylabel('uhlova rychlost [stupnu/s]'),title('uhlova rychlost osa z')
```

konec cyklu `for`:

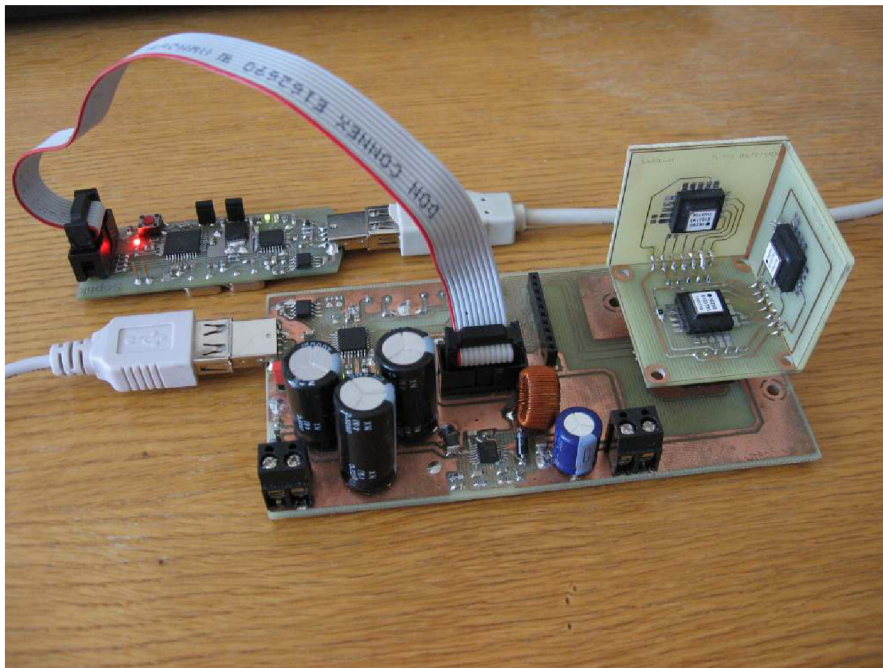
```
end
```

uzavření seriového portu:

```
fclose(s)
```

8 Funkční ověření

Navržený a vyrobený přípravek viz obr. 8.1 je v konečné fázi potřeba ještě odměřit, odzkoušet a tyto naměřené hodnoty srovnat s údaji výrobce. Funkční ověření bylo provedeno měřením v laboratoři na otočné stolici, která umožňuje nastavení rychlosti otáčení v rozmezí úhlové rychlosti $\pm 18^\circ/\text{s}$.



Obr. 8.1 sestavený a oživený výrobek připojený k PC a JTAG programátoru

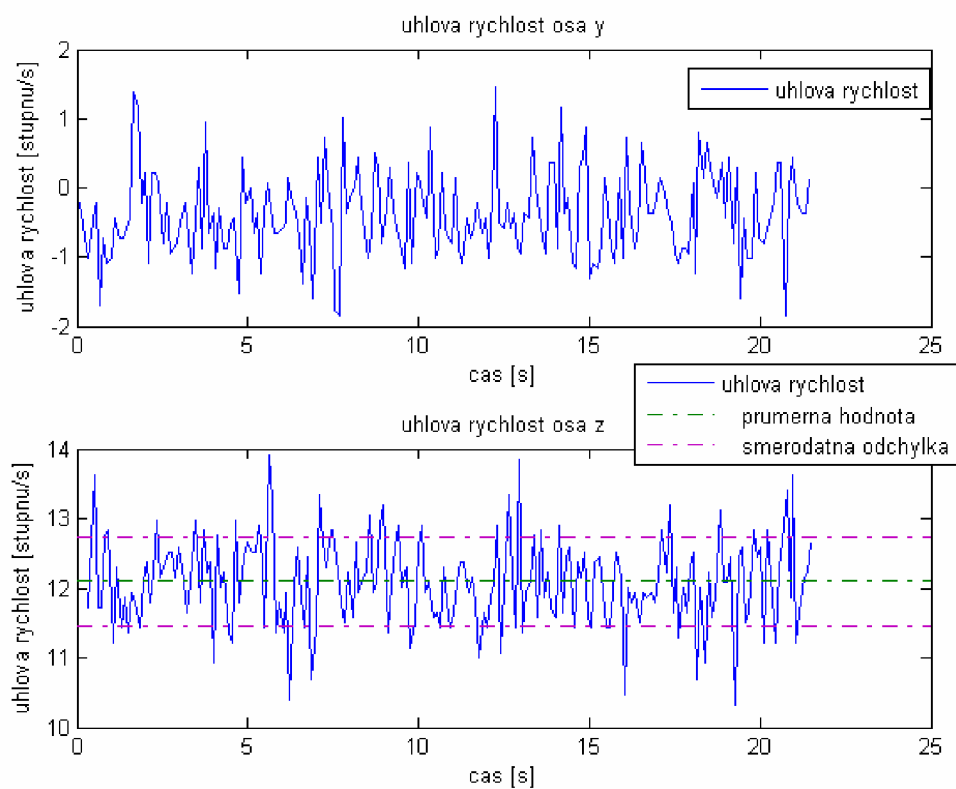


Obr. 8.2 Měřící pracoviště

8.1 Výsledky měření

Při každém měření bylo zaznamenáno 200 naměřených hodnot úhlové rychlosti. Z nich vypočítána průměrná hodnota a směrodatná odchylka.

Při měření je vždy jeden senzor v citlivé ose na pohyb otáčení a druhý senzor umístěný v ose, ve které se úhlová rychlost nemění.

Obr. 8.3 graf naměřených hodnot pro úhlovou rychlost $12^\circ/\text{s}$ v ose z

Tab. 3: Tabulka zpracování naměřených hodnot

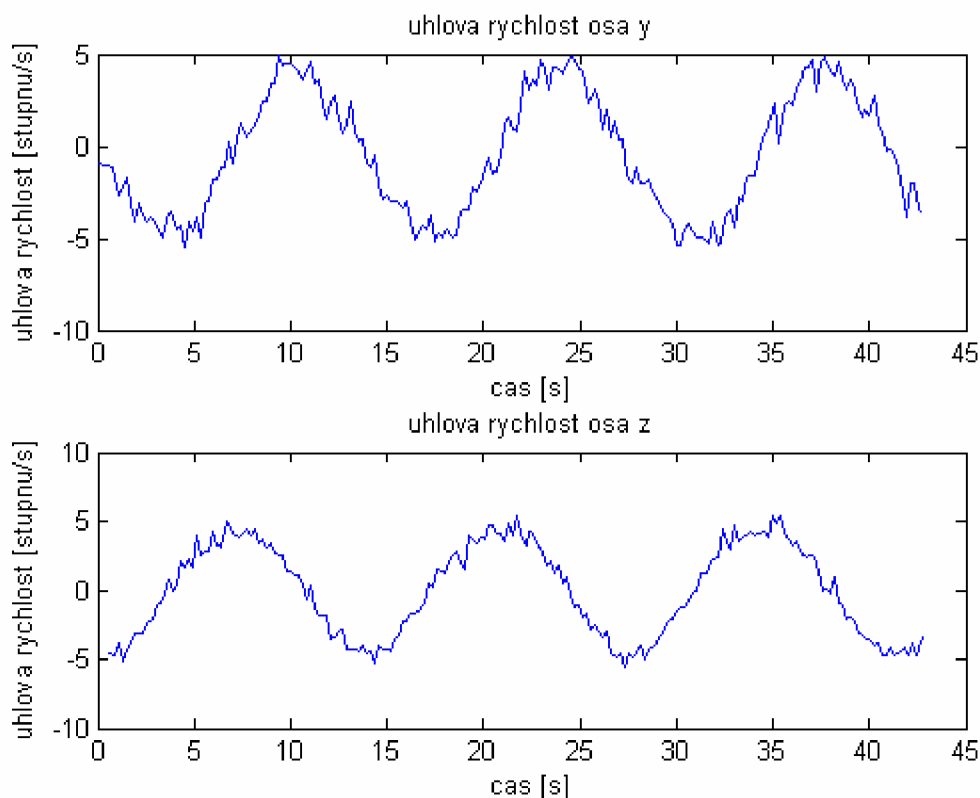
nastavená úhlová rychlost [°/s]		6	-6	12	-12	18	-18
senzor v citlivé ose	průměrná hodnota [°/s]	5,78	-6,8	12,1	-11,78	18,05	-19,18
	směrodatná odchylka	0,57	0,71	0,57	0,62	1	0,69
senzor v necitlivé ose	průměrná hodnota [°/s]	-0,28	-0,62	-0,62	-0,38	-1,05	-0,42
	směrodatná odchylka	0,65	0,45	0,45	0,52	0,37	0,69

Pro senzor měřící v citlivé ose by se v ideálním případě měly naměřené hodnoty úhlové rychlosti rovnat nastaveným rychlostem kterými se točila otočná měřící stolice.

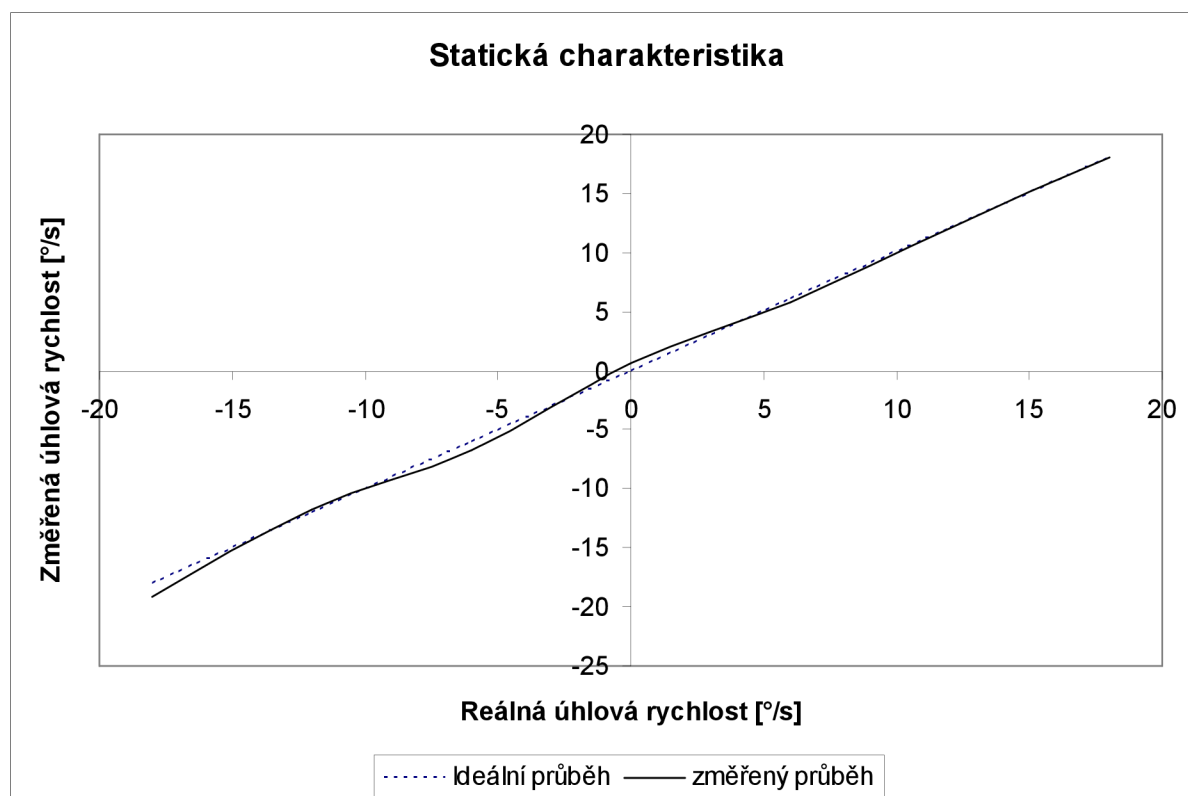
Zjištěné chyby měření mají hned několik příčin, za nejvýznamnější lze považovat:

- nepřesně nastavenou úhlovou rychlost měřící stolice,
- nedokonalosti převodového mechanismu měřící stolice,
- vlastní nepřesnost senzoru,
- chyby kvantování a zpracování signálu.

Naopak senzor umístěný mimo citlivou osu otáčení by na otáčivý pohyb neměl reagovat vůbec a v ideálním případě by vykazoval nulovou úhlovou rychlost. Odchytky od nulové hodnoty jsou způsobeny ne zcela přesným usazením senzoru mimo citlivou osu otáčení tzv. housing. Dalším důvodem proč hodnoty nejsou ideální je samotný šum senzoru.

**Obr. 8.4 graf naměřených hodnot úhlové rychlosti při měření kuželovitého pohybu**

Na obr. 8.4 je zobrazen graf naměřených úhlových rychlostí při tzv. kuželovitém pohybu. Zde by výsledným průběhem měl být harmonický průběh fázově posunutý pro jednotlivé osy. Tento předpoklad se měřením ověřil.



Obr. 8.5 Statická charakteristika

9 Závěr

Úvodním cílem této práce bylo seznámení se s problematikou měření úhlových rychlostí, možnostmi jakými způsoby se dá úhlová rychlost měřit a na základě těchto poznatků zvolit vhodný senzor pro měření úhlové rychlosti vyrobený technologií MEMS. V době příprav projektu kdy jsem senzor potřeboval zvolit byly ještě třiosé senzory vyráběné technologií MEMS nedostupné. Jediným řešením tedy bylo využití tří senzorů, kdy každý měří úhlovou rychlost pro jednu osu. Proto bylo potřeba vytvořit modul, který konstrukčně vyřeší usazení senzorů. Při usazení senzorů není důležitá absolutní poloha ale naopak podstatná pro správnou činnost je orientace citlivé osy každého senzoru. Modul lze vidět na pravé straně obr. 8.1.

Pokračováním projektu je návrh přípravku s mikroprocesorem, který zajišťuje tři základní funkce a to komunikaci se senzory přes rozhraní SPI, komunikaci s PC za použití převodníku USB-USART a zajištění napájení 5V potřebných pro napájení jak senzorů, tak i mikrokontroléru a převodníku. Přípravek je možné napájet hned několika způsoby a to využitím napájení 5V z portu USB počítače. Dále musel být přípravek navržen pro napájení z palubní sítě letadla stejnoměrným napětím 28V. Proto bylo potřeba aby přípravek obsahoval i snižující DC-DC měnič na 5V. Měnič je dostatečně proudově dimenzován pro odběr až do 1,5A a je možné jej zároveň využít jako zdroj pro další zařízení. Přípravek je také možno napájet 5V z externího zdroje.

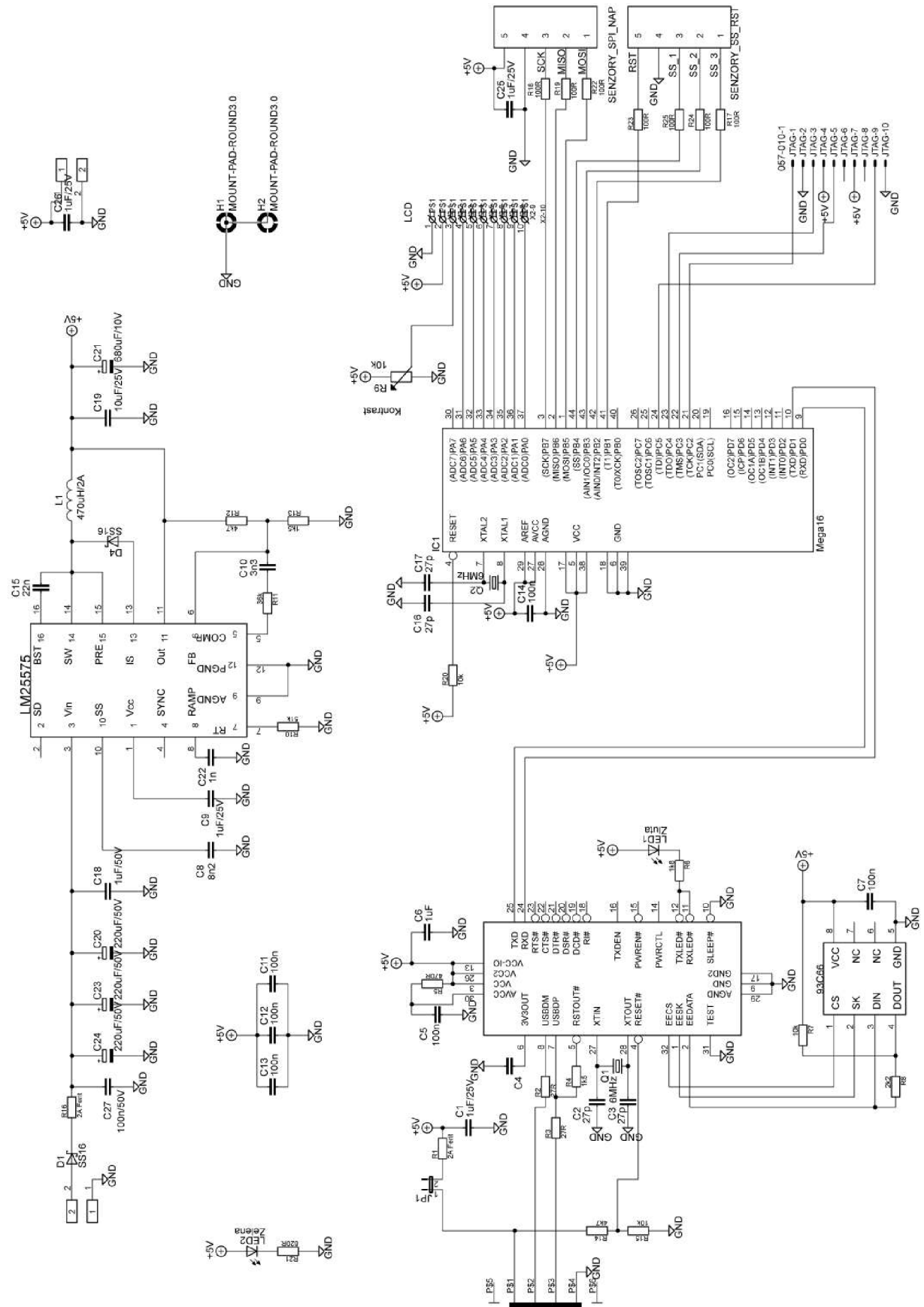
Jelikož má toto zařízení sloužit jako laboratorní přípravek, využil jsem pro sběr naměřených dat prostředí Matlab, které je vhodné pro práci s maticemi a kde si lze jednoduše funkci pro sběr dat jakkoli podle potřeby upravit a naměřené hodnoty rovnou zpracovat. V kapitole 7 jsou poté popsány základní příkazy pro navázání komunikace a sběr dat v prostředí Matlab.

Posledním bodem zadání je funkční ověření přípravku. To jsem provedl měřením v laboratoři na otočné stoličce. Údaje o měření jsou v kapitole 8. Z měření vyplývá, že přípravek funguje správně a splňuje co se od něj na začátku očekávalo. Ověření jsem musel provést pouze se 2 senzory. Třetí senzor bohužel po zapájení nefungoval. Pouzdra těchto senzorů totiž nejsou vhodná pro běžné pájení, protože nemají klasické vývody ale pouze pájecí plošky ze spodní strany součástky. Tyto pouzdra jsou konstruované na pájení přetavením v pájecích pecích, kde se využívá tekutých pájecích past které se při zahřátí na určitou teplotu přetaví a tím dojde k vodivému spojení. K této možnosti zapájení jsem se bohužel nedostal.

10 Použitá literatura

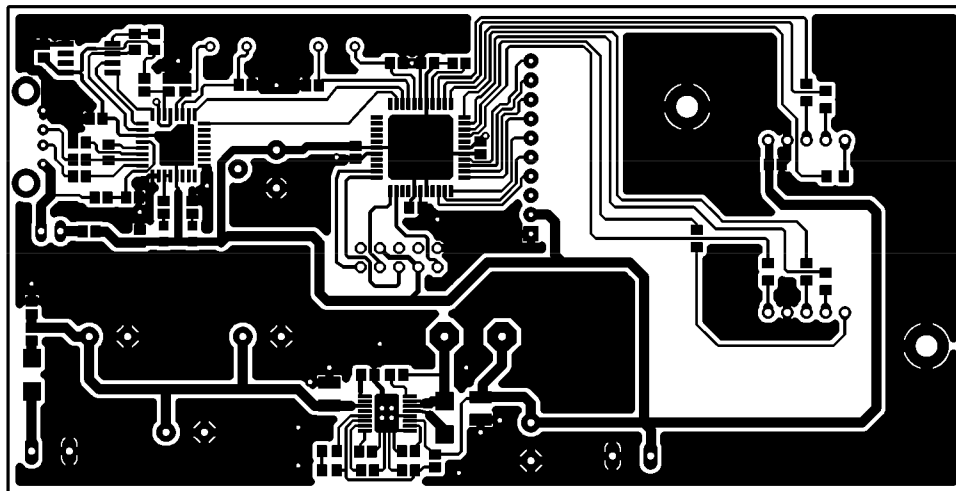
- [1] ČIŽMÁR, Jan. *Letecké přístroje II*. Skriptum S-1041/2. Brno: VA v Brně, 2003. 225 s
- [2] ČIŽMÁR, Jan. *Vývoj a aplikace gyroskopických technologií*, Acta Avionica, č. 11, str. 69 - 81 1, 2005, ISSN 1335-9479
- [3] ADIS16250/16255 – Analog Devices Data Sheet, Analog Devices, U.S.A.
Dostupné na WWW: < <http://www.analog.com/>>
- [4] ATmega16 – Atmel Data Sheet, Atmel corporation, U.S.A.
Dostupné na WWW: < <http://www.atmel.com/>>
- [5] MILL, Colin; ZVĚDĚLÍK, Zdeněk. *Teorie letu heli*.
Dostupné na WWW: < <http://zd.wwwcity.cz/zd/Files/TeorieHELlcm07-08.pdf/>>
- [6] HRDLIČKA, Ivo. *Bezkartanový systém orientace pro bezpilotní letoun*
Dostupné na WWW: < <http://1202.fi.muni.cz/?tpl=doc/project3&lang=en>>
- [7] VOJÁČEK, Antonín. *Gyroskopy v integrovaném provedení MEMS*
Dostupné na WWW: < <http://jonatan.spse.pilsedu.cz/~mazanec/gyroskopy.htm>>
- [8] Wikipedia: Serial Peripheral Interface Bus: [online]
Dostupná na WWW: < http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus>
- [9] FT232BM – FTDI Data Sheet, Future Technology Devices International Ltd., U.K.
Dostupné na WWW: < <http://www.ftdichip.com/>>
- [10] LM25575 – National Semiconductor Data Sheet, National Semiconductor corporation..
Dostupné na WWW: < <http://www.national.com/>>

Příloha č.1 Obvodové schéma zapojení:

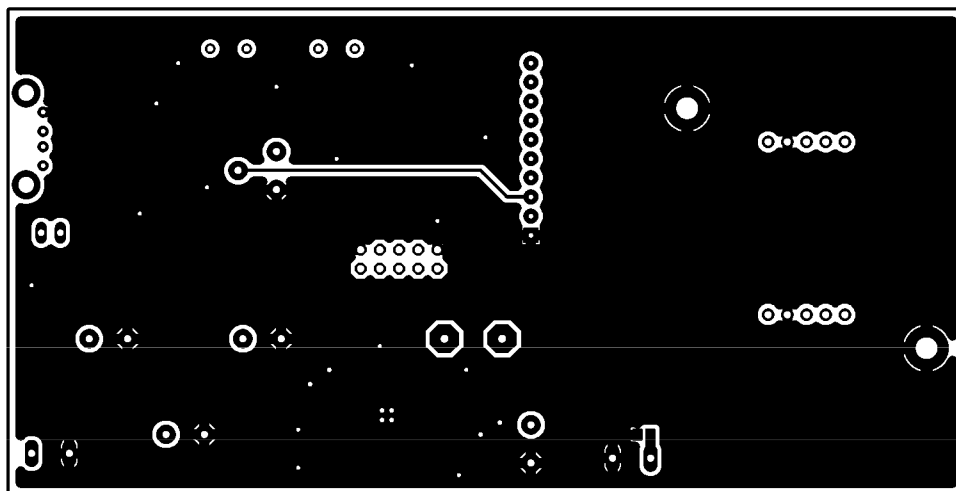


Příloha č.2 Deska plošných spojů:

Vrstva TOP



Vrstva BOTTOM



Příloha č.3 Rozmístění součástek:

