

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**KATEDRA ŘÍDÍCÍ TECHNIKY**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Zařízení pro inerciální navigaci



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady ( literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....

podpis







## **Poděkování**

Děkuji především vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlovi Němečkovi za vedení bakalářské práce a za cenné rady při její realizaci. Dále děkuji Ing. Radkovi Pulpánovi za konzultaci týkající se návrhu hardwaru. A v neposlední řadě děkuji svým rodičům a příbuzným za podporu a trpělivost během tvorby této bakalářské práce.

## **Anotace**

Bakalářská práce se zabývá návrhem hardwaru zařízení na inerciální navigaci v místech, kde není k dispozici signál GPS, jako například v jeskyních či pod vodní hladinou. Zařízení tvoří několik senzorů, pomocí kterých jsme schopni zjistit informace o pohybu a jeho směru. Nejdůležitějšími senzory jsou tříosý akcelerometr pro určení zrychlení se kterým se zařízení pohybuje, senzory na měření magnetického pole Země, pomocí nichž je sestaven elektronický kompas, gyroskop na zpřesnění údajů o směru a externí modul s inklinometry, pro určení náklonu zařízení.

Všechny naměřené hodnoty z výše uvedených senzorů jsou zpracovávány za pomoci 16-bitového mikroprocesoru z řady MSP430 od firmy Texas Instruments. Pro komunikaci a vizualizaci s obsluhou je použit dostatečně velký grafický dotykový displej. Naměřená a vyhodnocená data je možno ukládat do paměti a v případě potřeby je pomocí rozhraní RS232 přenést do PC, kde je možnost je dále zpracovávat a uchovávat.



## Summary

My bachelor thesis describes the hardware project of the inertial navigation equipment for the situations where no GPS signals are available - in caves or under water surface for example. The equipment is made of several sensors detecting the movement and direction information. There are important sensors involved:

- tri-axes accelerometer detecting the acceleration value of the moving object
- the sensors for measuring the values of the geomagnetic field (the electronic compass is constructed of these sensors)
- the gyroscope for accuracy of the direction data
- the external module with the inclinometers detecting the equipment inclination.

All the values measured by these sensors are processed by the 16-bit microprocessor MSP430 produced by Texas Instruments company. The graphical touch display of the sufficient size is used for communication and visualization. It is possible to save the measured and interpreted data to the equipment memory and transmit them by the RS232 interface to the PC to process or save them here if required.

# Obsah

Úvod.....	1
Inerciální navigace .....	3
Popis hardwaru .....	6
3.1 Celkový popis .....	6
3.1.1 Deska s procesorem .....	7
3.1.3 Deska se senzory.....	8
3.2 Mikroprocesor MSP430F169 .....	8
3.2.1 Architektura mikroprocesoru .....	8
3.2.2 Programování uP .....	10
3.3 Napájení zařízení .....	11
3.3.1 Zdroj 5V, 3,3V .....	11
3.3.2 Úprava napěťových úrovní 5V - 3,3V .....	11
3.3.3 Kontrola napájení zařízení .....	11
3.4 Akcelometr LIS3LV02DQ.....	12
3.4.1 Popis senzoru .....	12
3.4.2 Struktura akcelerometru LIS3LV02DQ.....	13
3.4.3 Komunikace s okolím a zapojení .....	14
3.5 Gyroskop ADXRS300 .....	16
3.5.1 Princip a popis měření rotace .....	16
3.5.2 Technické možnosti gyroskopu ADXRS300.....	17
3.6 Elektronický kompas.....	18
3.6.1 Magnetické pole Země.....	18
3.6.2 Senzor KMZ51 .....	20
3.6.3 Konstrukce elektronického kompasu.....	21
3.7 Inklinometr .....	23
3.7.1 Modul Planar NS-25C2 .....	23
3.8 Komunikační rozhraní pro uživatele .....	24
3.8.1 Grafický displej.....	24
3.8.2 Touch screen .....	26
3.8.2.1 Princip snímání polohy .....	26

3.8.2.2 Touch screen controller ADS7843.....	27
3.8.3 Klávesnice.....	27
3.8.4 Sériové rozhraní.....	28
3.8.5 Sériová flash paměť.....	28
Popis softwaru.....	30
4.1 Základní informace.....	30
4.2 Implementované části.....	30
Závěr.....	32
Literatura.....	34
Obsah příloženého CD.....	36
Obrazová příloha.....	37



# Kapitola 1

## Úvod

Navigační přístroje, jsou již od nepaměti používány k orientaci v neznámém prostředí. V dnešní době se již ve velké prosazují pro osobní navigaci levné zařízení GPS(Global Positioning System), které jsou již lehce dostupné široké veřejnosti. Široké využití nacházejí například v plánování a navigaci cest v automobilismu, jednodušší modely jsou využívány v outdoorových aktivitách jako je turistika, horolezectví, cyklistika, pomocí nichž je možné lehce určit aktuální polohu. Bohužel ale zařízení GPS nejsou využitelná ve všech prostředích, signál ze satelitů není možno přijímat v uzavřených prostorech jako jsou například budovy, jeskyně či například pod vodní hladinou. V těchto místech přichází na řadu navigační přístroje využívající inerciální navigaci, která není závislá na žádném signálu ze satelitů. Tato metoda byla vyvinuta a používána po druhé světové válce. První systémy pracovali s mechanickými gyroskopy, později tyto senzory nahradily elektromechanické nebo elektrooptické senzory. Takovéto systémy jsou vyvinuty pro využití v armádě, letectví, námořnictví, jsou to velice drahé, rozměrově velké zařízení a tudíž nevyužitelné a nedostupné pro osobní využití v potápění či speleologii či v jakékoliv jiné činnosti. Cílem mé bakalářské práce bylo prozkoumání dostupných senzorů využitelných pro tyto účely a návrh hardwarové části relativně dostupného zařízení využitelného v uvedených podmínkách pomocí mnou vybraných senzorů. V první řadě jde o návrh modulárního zařízení se senzory, které sbírají data potřebné pro vyhodnocení polohy pomocí metody, která je nazývána inerciální navigace, mezi něž patří výše uvedené gyroskopy, akcelerometry, kompas a také inklinometry. Na mojí práci měla navazovat další bakalářská práce, který měla za úkol implementaci algoritmu pro zpracování dat ze zařízení mnou navrženým a odzkoušením funkčnosti a přesnosti této metody navigace.

Bakalářská práce je rozdělena do pěti kapitol. První kapitola nás seznamuje s obsahem bakalářské práce a jejím cílem. Druhá kapitola je zaměřena na inerciální navigaci jako obecný celek. Třetí kapitola popisuje hardwarovou část bakalářské práce, podrobněji rozebírá jednotlivé části zařízení, senzory a jejich zapojení. Čtvrtá kapitola se

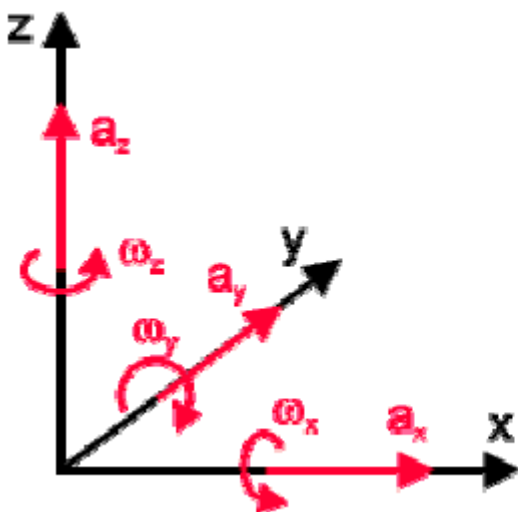
zabývá softwarovou částí pro základní oživení zařízení. V poslední páté kapitole jsou celkově zhodnoceny výsledky bakalářské práce.

# Kapitola 2

## Inerciální navigace

Inerciální navigace je metoda pomocí které je možno určovat aktuální polohu v prostředí bez jakýchkoliv dodatečných signálů ze satelitů, používá totiž senzorů jako jsou akcelerometry, gyroskopy pro měření zrychlení a úhlové polohy. Princip je jednoduchý při známé výchozí poloze navigovaného objektu, který nese jednotku se zařízením pro inerciální navigaci a zaznamenává změny zrychlení a úhlového natočení, z těchto údajů je možné vypočítat rychlost a polohu tohoto zařízení. Praktická realizace je již obtížnější, jelikož je třeba při výpočtu několikrát integrovat naměřený signál a tím se zvyšuje i chyba určení polohy zařízení.

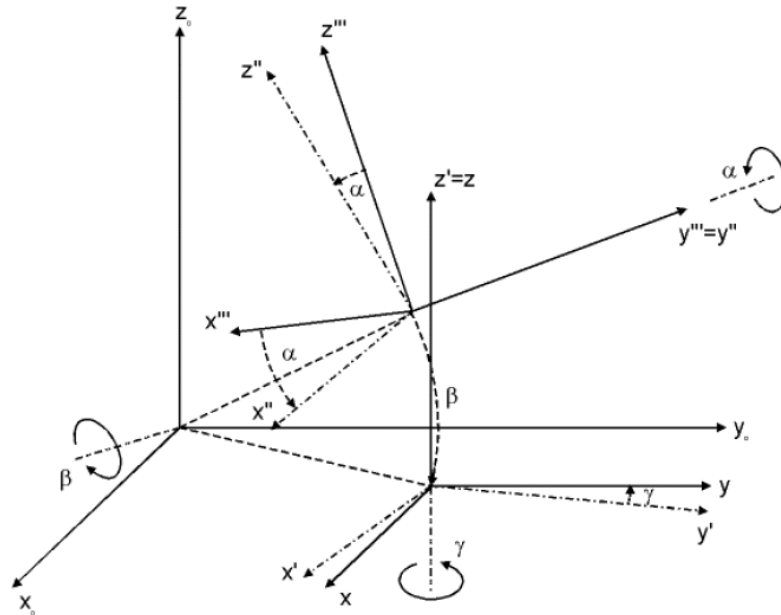
Aktuální polohu pohybujícího se tělesa můžeme popsat pomocí šesti parametrů: tři translací (x-,y-,z-zrychlení) a tří rotací (x-,y-,z-úhel natočení). To stačí k určení polohy zařízení, s využitím například tří akcelerometrů a tří gyroskopů, dohromady tyto údaje tvoří ortogonální soustavu. Hodnotu urazené vzdálenosti a aktuálního natočení zařízení získáme pomocí integrace jednotlivých translací a rotací. Při precizním a periodickém vykonávání těchto výpočtů je možné s ideálním systémem vytvářet trasu pohybu a zjišťovat aktuální polohu a kurz.



$$s(\mathbf{t}) = \iint a(t) dt^2$$
$$\varphi(\mathbf{t}) = \int \omega(t) dt$$

Obr. 2.1 Šest stupňů volnosti, popis pomocí translací a rotací

Hlavní omezení systémového provedení je dáno konečnou precizností senzorů. Průběžná malá chyba v akceleraci se v první řadě integruje ve velkou chybu určení aktuální rychlosti a při druhém integrování v ohromnou chybu ve vzdálenosti. Proto jsou precizní senzory a opravné mechanismy proti chybám velice důležité k dosažení přesné platformy pro inerciální navigaci. Jako příklad levného zpětnovazebního algoritmu je G-vektor. Není potřeba žádný dodatečný hardware, ale jen jednoduchý předpoklad, že průměrný směr akcelerace osy Z jde většinou kolmo dolů k zemskému povrchu a jeho průměrná hodnota je  $-9,81 \text{ m/sec}^2$ . Jiná zpětnovazební metoda je zavedení GPS pozice přímo do inerciálního navigačního systému, ale tento koncept vyžaduje pečlivé rozvrhování při obnovovacím mechanismu nerušeného vstupního systému. Jiný složitý, který potřebuje pečlivý výpočet je přidání pravoúhlého souřadnicového systému. Zde existují rozdílné řešení - nějaký z nich s přidáním povolenou redundancí pro přesnější určení hodnot. Jsou definovány tři osy: roll(alpha), pitch (beta) a směr (gamma). Translace jednotlivých složek vztahujících se k výchozímu systému je vyjádřena jako::  $(x''', y''', z''') = (\alpha) \Rightarrow (x'', y'', z'') = (\beta) \Rightarrow (x', y', z') = (\gamma) \Rightarrow (x, y, z)$  .



Obr. 2.2 Vyjádření aktuální prostorové situace  $(x''', y''', z''')$  referovaný k výchozímu systému  $(x, y, z)$  v eulerově souřadné soustavě



$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) * \cos(\alpha) & -\sin(\gamma) * \cos(\beta) & -\cos(\alpha) * \sin(\beta) * \sin(\gamma) \\ -\sin(\gamma) * \sin(\beta) * \sin(\alpha) & & +\sin(\alpha) * \cos(\gamma) \\ \sin(\beta) * \sin(\alpha) * \cos(\gamma) & \cos(\gamma) * \cos(\beta) & \cos(\gamma) * \sin(\beta) * \cos(\alpha) \\ -\cos(\alpha) * \sin(\gamma) & & +\sin(\gamma) * \sin(\alpha) \\ \cos(\beta) * \sin(\alpha) & -\sin(\beta) & \cos(\beta) * \cos(\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x''' \\ \Delta y''' \\ \Delta z''' \end{pmatrix}$$

obr. 2.3 Výpočet aktuálních zrychlení

$$\begin{pmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta \beta \\ \Delta \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin(\alpha) * \tan(\beta) & -\cos(\alpha) * \tan(\beta) \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) / \cos(\beta) & \cos(\alpha) / \cos(\beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \alpha''' \\ \Delta \beta''' \\ \Delta \gamma''' \end{pmatrix}$$

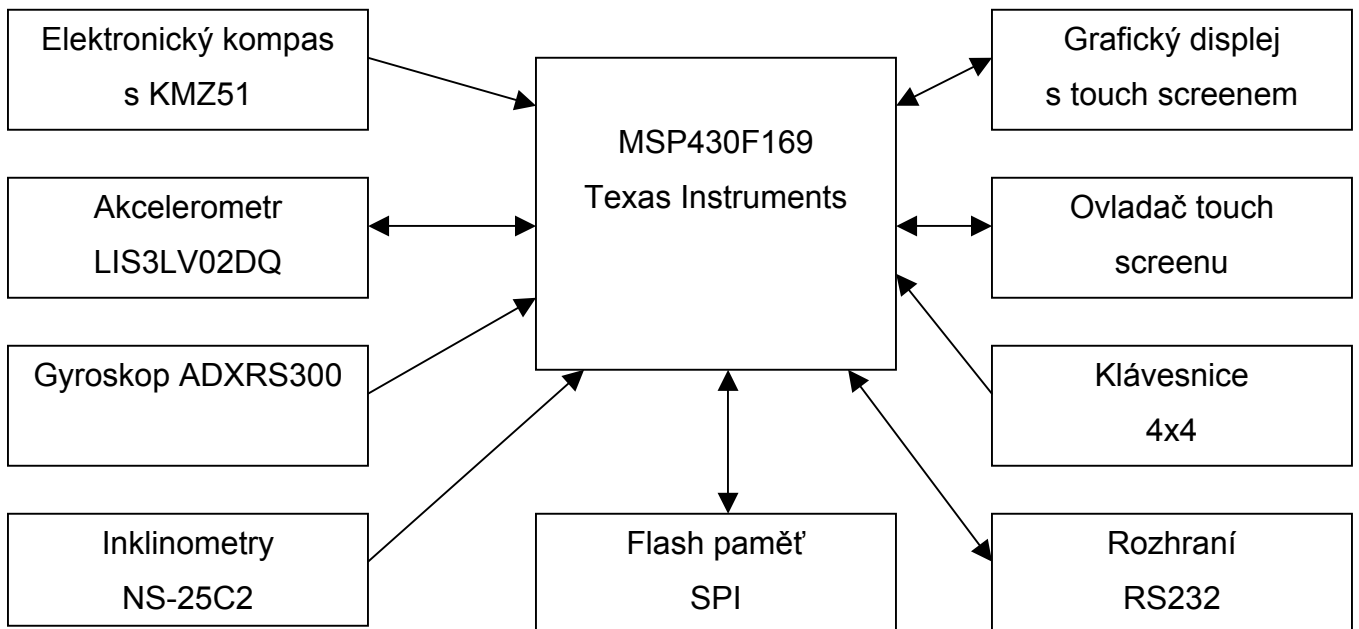
obr. 2.4 Výpočet aktuálních úhlových natočení

# Kapitola 3

## Popis hardwaru

### 3.1 Celkový popis

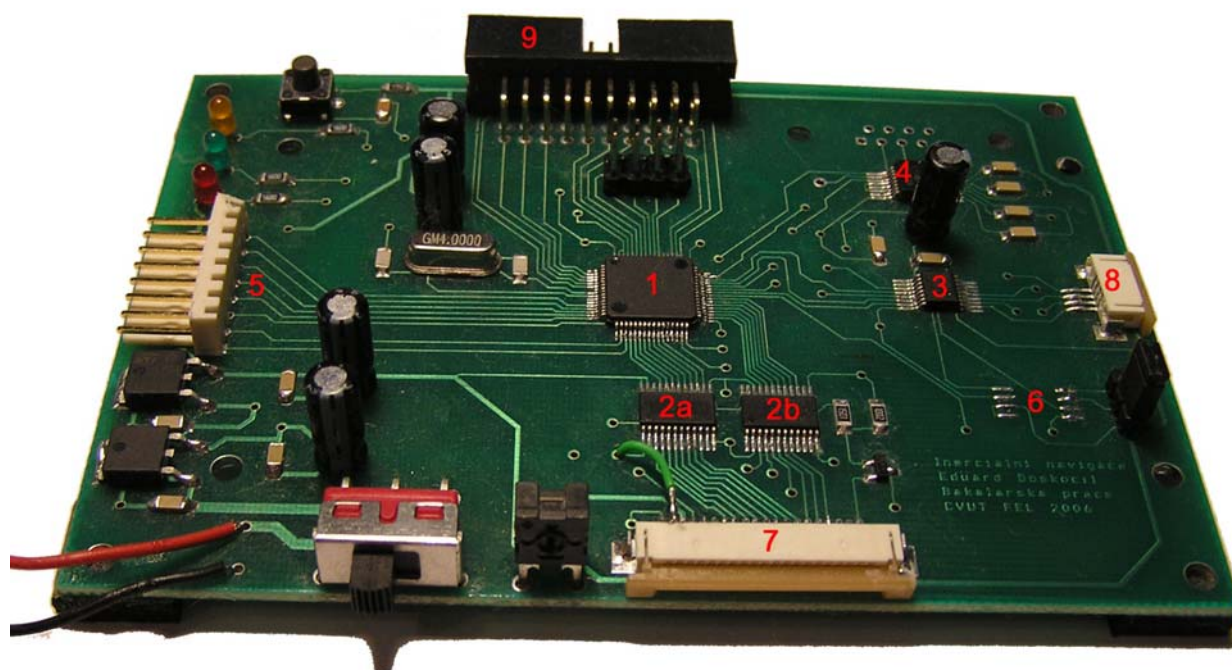
Zařízení pro inerciální navigaci je navrženo jako prototypový modulární systém s relativně malou hustotou součástek na plošném spoji. Systém je rozdělen na dva oboustranné prokovené plošné spoje stejné velikosti o rozměrech 114 mm x 81 mm. Jelikož jde o modulární systém a nebylo účelem mého návrhu miniaturizovat velikost plošného spoje a maximalizovat hustotu součástek na něm, byl zvolen tento rozměr desek, který se odvíjí od rozměrů displeje, který bude umístěn nad nimi. Jedna deska obsahuje mikroprocesor MSP430F169, rozhraní RS232, sériovou paměť, konektory potřebné pro připojení grafického displeje, maticové klávesnice, touch screenu a připojení druhé desky, JTAG rozhraní pro programování procesoru a několik indikačních LED diod. Druhá deska nese většinu potřebných senzorů potřebných k inerciální navigaci. Těmi jsou tříosý akcelerometr, gyroskop, magnetometry využívané ke konstrukci elektronického kompasu a konektor pro připojení externího modulu s inklinometry.



obr. 3.1.1 Blokové schéma zařízení na inerciální navigaci

Při návrhu plošných spojů bylo samozřejmě nutné dodržet důležitá návrhová pravidla, jako například co nejbližší připojení blokovacích kondenzátorů jednotlivých součástek. Z důvodu omezení možnosti rušení, jsou obě desky opatřeny rozlévanou mědí ve vrstvě GND v tomto případě na spodní straně desky. U obou desek bylo využito pokud možno co nejvíce součástek v provedení SMD. Schémata obou desek jsou v příloze B.1 a B.2

### 3.1.1 Deska s procesorem



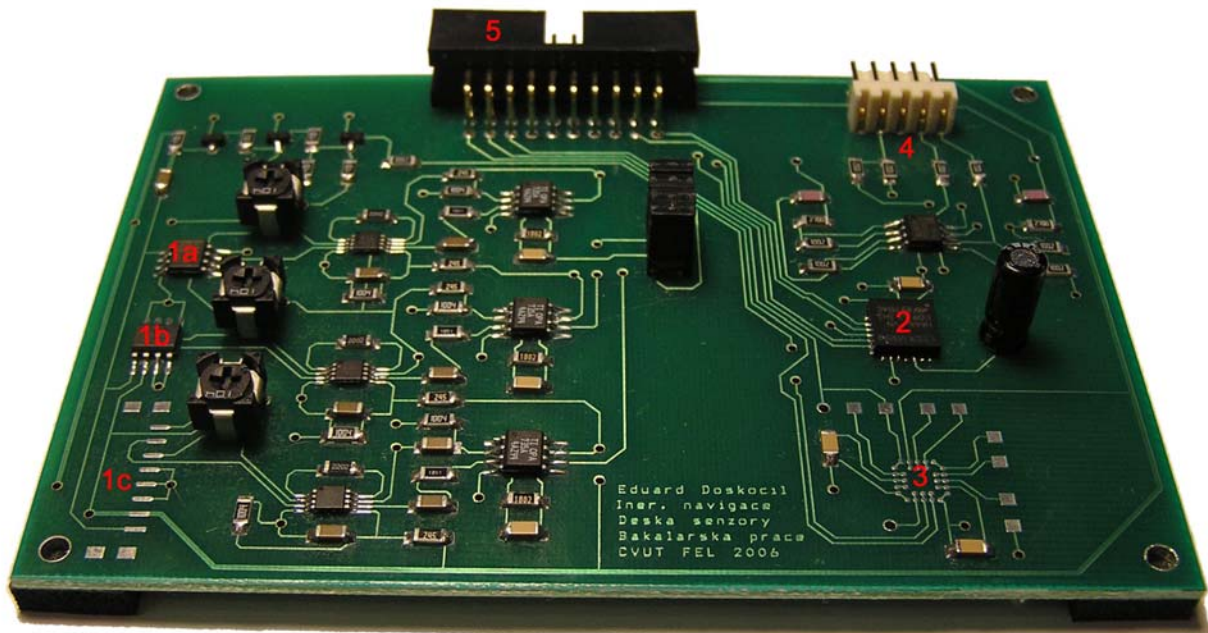
obr. 3.1.2 Deska s procesorem

Popis k obr. 3.1.2

- 1 Procesor MSP430F169
- 2a,b Měnič napěťových úrovní 74LVC4245
- 3 Touch screen controller ADS7843
- 4 RS232 vysílač/přijímač MAX3221
- 5 Konektor pro maticovou klávesnici 4x4
- 6 Flash paměť SPI Atmel
- 7 Konektor Molex 20 pro grafický displej
- 8 Konektor Molex 4 pro touch screen

9 20 pinový konektor pro spojení s deskou se senzory

### 3.1.3 Deska se senzory



obr.3.1.3 Deska se senzory

Popis k obr. 3.1.3

1a,b,c Magnetometry KMZ51

2 Akcelerometr LIS3LV02DQ

3 Gyroskop ADXRS300

4 Konektor pro připojení modulu s inklinometry

5 Konektor 20 pinů pro spojení s deskou s procesorem

## 3.2 Mikroprocesor MSP430F169

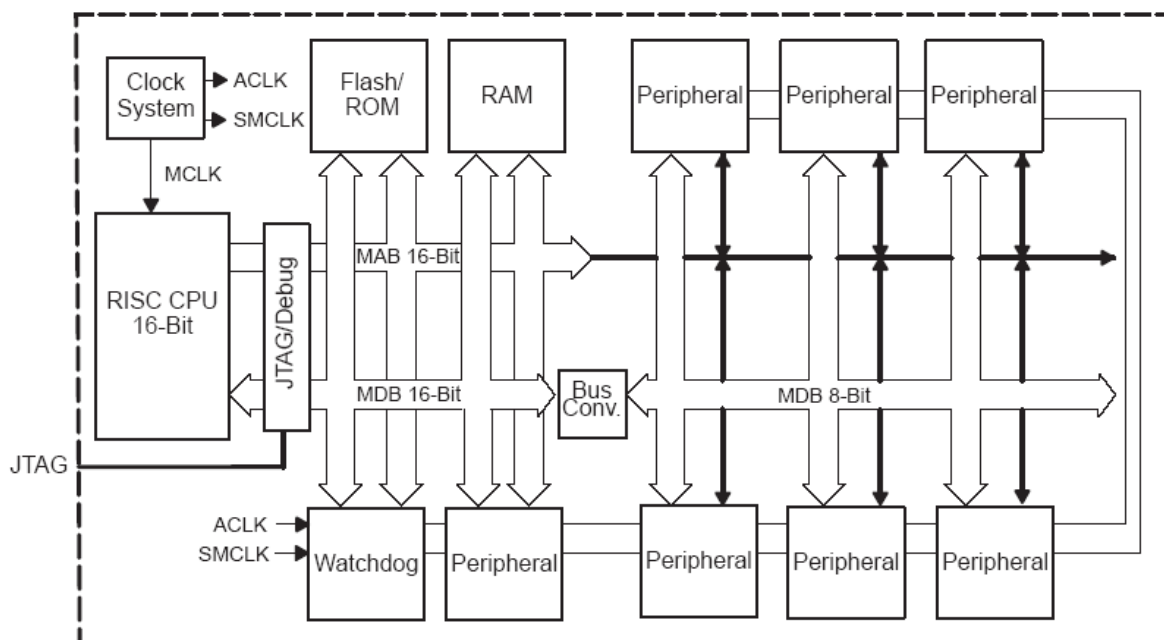
### 3.2.1 Architektura mikroprocesoru

Mikrokontrolér je jeden z hlavních prvků zařízení pro zpracování naměřených signálů z jednotlivých senzorů. Při výběru procesoru bylo potřeba splnit několik podmínek, které byly kladeny ze strany výpočetního výkonu potřebného pro výpočet polohy z naměřených senzorů a také periférií potřebných pro tuto aplikaci: komunikační

kanál SPI pro připojení akcelerometru, paměti flash, obvodu pro zpracování dat z touch screenu grafického displeje, seriový kanál USART pro možnost komunikace s PC po sběrnici RS232, dostatečný počet A/D převodníků pro zpracování signálů z magnetometrů a gyroskopu a v neposlední řadě výstupy pro připojení periférií uživatelského rozhraní a to grafického dotykového displeje a maticové klávesnice. Jelikož jde o zařízení, které je napájeno z baterií a bude využíváno jako příruční navigátor, je vhodné aby byla spotřeba co nejmenší.

Tyto výše uvedené podmínky splnil mikrokontrolér od firmy Texas Instruments MSP430f169. Jedná se o 16-bit RISC (Reduced Instruction Set Computer) CPU, procesor je založen na von-Neumann architektuře tedy se společným adresovým prostorem pro data a program. Jádro CPU má šestnáct plně adresovatelných jednoduchých 16-bitových registrů, pouze 27 jednoduchých instrukcí a 7 adresových módů. Výsledkem toho je vyšší výpočetní efektivita, menší velikost čipu a větší efektivita kódu než u jiných 8-/16-bit mikrokontrolérů. Procesor má několik hodinových režimů, mezi kterými lze flexibilně za běhu aplikace přepínat. Spotřeba udávaná výrobcem je 250 $\mu$ A/MIPS v aktivním módu, 0.8  $\mu$ A v real-time clock módu. Samozřejmě jsou tyto údaje pro nejmenší frekvenci oscilátorů. Obecná architektura MSP430 je na obrázku obr. 3.2.1.

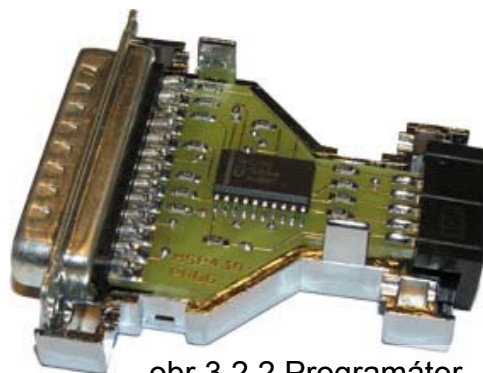
Nyní uvedu specifikace a vybavení MSP430f169, kterou jsem v mé práci použil. Procesor obsahuje 60 KB programové paměti a 2048 Kb SRAM paměti. Je možno využít až celkem 48 vstupně-výstupních vývodů rozdělených do 6 portů jejichž jednotlivé piny lze na nakonfigurovat pro periférie mikrokontroléru. U tohoto jsou to dvě rozhraní USART, jedno rozhraní I<sup>2</sup>C, 8 kanálový 12 bitový A/D převodník, 12 bitový D/A převodník. Procesor je dále vybaven funkcí DMA (Direct Memory Access) pro přesun dat z jedné adresy bez využití CPU, funkcí SVS (Supply Voltage Supervisor) což je monitor napájení, který může jen informovat či vyvolat reset při poklesu napětí pod danou úroveň, je možno využít časovačů Timer\_A a Timer\_B. Procesor je dodáván v 64 pinovém pouzdru ve dvou provedeních a to QFN nebo LQFP/TQFP. Cena při odběru 1000 kusů je kolem 8 dolarů.



obr 3.2.1 Blokové schéma procesoru řady MSP430

### 3.2.2 Programování uP

Všechny procesory z řady MSP430Fxxx s flash pamětí jsou vybaveny JTAG rozhraním na programování a emulaci mikrokontroléru. Pro tento účel bylo třeba vyrobit potřebný programátor. Z důvodu malé složitosti a dostupnosti byl vybrán paralelní programátor komunikující přes LTP port (schéma v příloze B.3). Programátor je napájen



obr 3.2.2 Programátor

pomocí propojovacího kabelu přímo z desky s procesorem a to minimálně 2.7 V, které jsou předepsány výrobcem pro správné naprogramování flash paměti. Standardní 14 pinový dvouřadý JTAG konektor (2x7pinů) byl nahrazen kvůli úspoře místa na plošném spoji pouze 8 pinovým konektorem, jelikož v původním zapojení je pět pinů nezapojeno a šestý napájecí (napájení z LTP portu)

mohl být také vypuštěn. Pro komunikaci s programátorem jsem využil „open source“ balíček MSPGCC určený pro procesory MSP430, který v sobě obsahuje GNU C překladač, assembler, linker, debugger (GDB) a nějaké další nástroje potřebné pro kompletní vývojové prostředí MSP430. Je možné ho používat pod Windows, Linux,

BSD a dalších Unixových systémech. Pro používání pod Windows NT, 2000 a XP je třeba mít nainstalovaný ovladač „giveio“ pro přímý přístup k portu. Vše je možné zdarma stáhnout z oficiálního webu projektu MSPGCC a to na: <http://mspgcc.sourceforge.net/> .

### **3.3 Napájení zařízení**

#### **3.3.1 Zdroj 5V, 3,3V**

Jelikož jde o zařízení, které bude napájeno z baterií je vhodné, aby bateriový zdroj zbytečně nezvyšoval váhu zařízení. Proto jsem se rozhodl využít dvou tří nožičkových „low drop“ stabilizátorů LF33CDT a LF50CDT od firmy STMicroelektronics, které pracují s úbytkem napětí pouze 0,2V. Napájení 3,3V využívá většina komponent od firmy Texas Instrumets, mezi ně patří v první řadě procesor, dále pak ovladač touchscenu, MAX3221 pro RS232, operační zesilovače využívané v konstrukci elektronického kompasu a úpravy signálů z inklinometrů, dále pak tříosý akcelerometr a sériová flash paměť. Pět voltové napájení muselo být zavedeno kvůli grafickému displeji, gyroskopu a magnetometrům v elektronickém kompasu.

#### **3.3.2 Úprava napěťových úrovní 5V - 3,3V**

Z důvodu rozdílných logických napěťových úrovní mezi mikroprocesorem MSP430 (3,3V) a řadičem displeje (5V) bylo třeba vhodným řešením upravit napěťové úrovně. Jelikož bylo nutné zvýšit úroveň z 3,3V na 5V bylo by možné využít například tranzistorů, vznikl by pak ale problém s obousměrnou komunikací po datové sběrnici řadiče displeje. Druhé řešení je využít obvodů upravujících napěťové úrovně, v nabídce je několik podobných obvodů od různých výrobců. Zvolil jsem obvod od firmy TI 74HC244. Jde o osminásobný měnič napěťových úrovní s třístavovým výstupem. Režim přenosu dat z portu A (5V) na port B (3,3V), druhý režim přenosu z B na A a ve třetím stavu jsou porty od sebe odpojeny.

#### **3.3.3 Kontrola napájení zařízení**

Procesor MSP430F169 disponuje užitečnou funkcí kontroly napájecího napětí mikrokontroléru SVS (supply voltage supervisor). Je možné ho využít k monitorování napájecího napětí nebo externího napětí. SVS může být nakonfigurováno k nastavení

znamení nebo může generovat POR reset (Power-On Reset) když napájecí napětí nebo externí napětí klesne pod uživatelem nastavenou hodnotu. Je možno si vybrat ze 14 úrovní sledovaného napětí. Jednotlivé nastavení se zapisují do SVSCTL registru, jehož upořádání je na obr 3.3.1.. Bit SVSFG indikuje přítomnost malého napětí. SVSOP zobrazuje výstupní hodnotu SVS komparátoru. Tento bit zobrazuje stav SVS operace,



obr. 3.3.1 Registr SVSCTL

PORON povoluje možnost vyvolání POR resetu zařízení. V bitech 4 až 7 si nastavuje uživatel hodnotu porovnávacího napětí.

### 3.4 Akcelerometr LIS3LV02DQ

Akcelerometr je hlavní senzor pro získání informace o zrychlení v dané ose (x,y,z), proto musela být věnována značná pozornost při jeho výběru. V nabídce firem (Analog, ST, Freescale) je možné najít různé provedení, které je možné rozdělit podle rozsahů ve kterých měří, rozhraní pomocí, kterého komunikují s okolím a také počtů akcelerometrů integrovaných v jednom pouzdře. Vybral jsem senzory, které budou schopny měřit dostatečně velké zrychlení kolem  $\pm 5g$  s dostatečným rozlišením a také jsem požadoval digitální rozhraní pro komunikaci s procesorem. Další z užitečných vlastností je samozřejmě možnost využití různých úsporných módů, jelikož jak bylo zmíněno zařízení bude napájeno z baterií.

#### 3.4.1 Popis senzoru

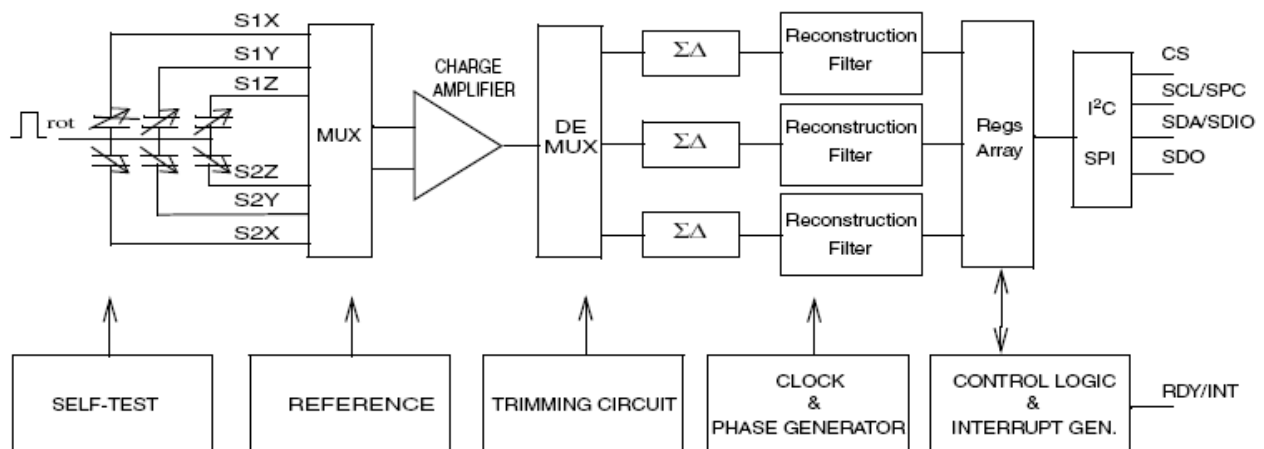
LIS3LV02DQ je tříosý lineární akcelerometr s digitálním výstupem vyrobený MEMS technologií, který obsahuje senzorovou část a rozhraní pro komunikaci senzorové části a okolí pomocí sériového I2C nebo SPI na jednom integrovaném obvodu. Rozhraní I2C je vyráběno za pomoci CMOS procesu, který umožní vysokou úroveň integrace designu a jedinečný obvod který je v továrně seřízen na nejlepší možnou charakteristiku



senzoru. LIS3LV02DQ má uživatelem plně volitelný rozsah  $\pm 2g$  nebo  $\pm 6g$  a je schopen měření zrychlení v šířce pásma 640 Hz pro všechny osy. Šířka pásma může být upravena podle daného využití v aplikaci. „Self-test“ umožňuje jednoduše uživateli zjistit funkčnost systému. Zařízení může být nastaveno ke generování inerciálního „wake-up“ nebo „free-fall“ přerušovacího signálu, když je překročena naprogramovaná hranice zrychlení v jedné nebo více ze tří os akcelerometru. LIS3LV02DQ je dostupný v plastické SMD pouzdru a jeho rozsah teplotního použití udává výrobce od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+85^{\circ}\text{C}$ . Tento senzor patří do skupiny produktů vhodných v různých aplikacích: detekce volného pádu, aktivační pohybová funkce v přenosných terminálech, zabezpečovací systémy, inerciální navigace, měření vibrací, herní průmysl a zařízení pro virtuální realitu.

### 3.4.2 Struktura akcelerometru LIS3LV02DQ

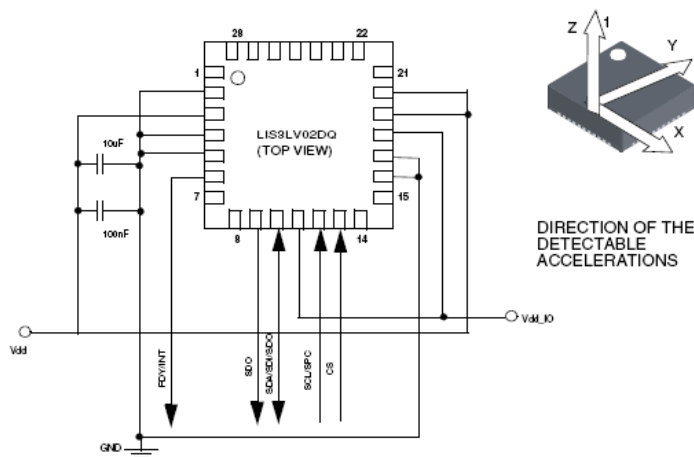
LIS3LV02DQ je „low-cost“ senzor v plastické pouzdru Quad Flat No-Lead(QFN) vyráběný technologií umožňující realizovat pružné silikonové struktury, které jsou připojeny na podložku v několika bodech nazvaných kotvami a volně se pohybující v rovině paralelní k substrátu. Z důvodu kompatibility s tradičními pouzdry je citlivá část umístěna na horní část senzoru, aby se zabránilo blokování pohyblivé části během



obr. 3.4.1 Blokové schéma senzoru

výrobního procesu plastického pouzdra. Při aplikaci lineárního zrychlení, zkouškou vychýlením sensorické části z klidové pozice, dojde k rozvážení kapacitního půl můstku. Toto rozvážení je měřeno za pomoci nábojové integrace jako odezva na napěťové

pulsy z citlivého kapacitoru. Nominální hodnota kapacitorů v ustálené poloze je v rozmezí několika pF a když působí zrychlení tak maximální změna kapacity vzroste o 100fF. Měřící rozhraní integrovaného obvodu je založeno na standardním CMOS procesu zaručující vysokou úroveň integrace. Celý měřící řetězec je složen ze zesilovačů s nízkým šumem, které převádějí nestabilní kapacitu z MEMS senzoru na analogové napětí a tři  $\Sigma\Delta$  A/D převodníků, jeden pro každou osu, které převádějí produkovaný signál na digitální. Převodníky  $\Sigma\Delta$  jsou úzce spojeny s rekonstrukčními filtry, které odstraňují vysoké frekvence šumu při kvantování a zaručují jeho nízkou hodnotu a velké rozlišení digitálních slov. Nábojový zesilovač a  $\Sigma\Delta$  převodníky jsou provozovány v tomto pořadí na 107.5 kHz a 35.8 kHz. Rozsah dat na výstupu je závislý při rekonstrukci na uživatelem vybraným „decimation faktoru“ a je v rozsahu od 280 Hz do 4480 Hz. K měřeným datům je možné přistupovat pomocí I2C nebo SPI rozhraní, které činí senzor mimořádně vhodným pro přímé připojení k mikrokontroléru. LIS3L02DQ je význačný „Data-Ready“ signálem, který indikuje nově dostupná naměřená data s informací o akceleraci a tak zjednodušuje synchronizaci v digitálním systému. LIS3L02DQ může být také nakonfigurován ke generování „Wake-up“ signálu přerušení podle naprogramované úrovně zrychlení v dané ose.



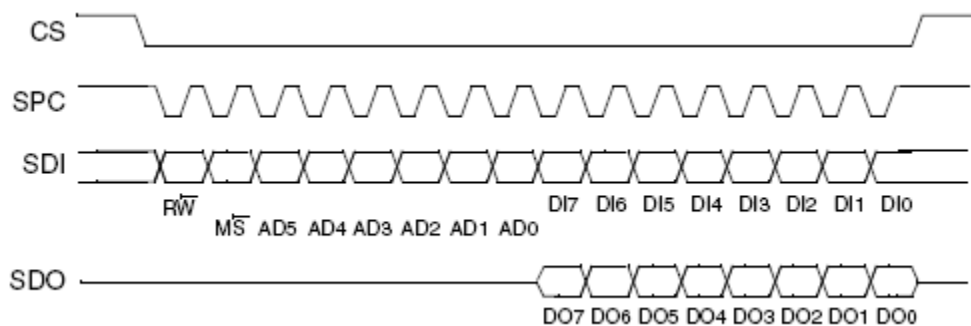
obr. 3.4.2 Základní zapojení senzoru

### 3.4.3 Komunikace s okolím a zapojení

Způsob připojení a popis signálu na pinech zobrazuje obr 3.4.2. Jak je vidět ze schématu, senzor má dvoje napájení - jedno pro jádro senzoru (Vdd) a druhé pro I/O pady (Vdd\_IO). Pro blokování napájení je třeba použít dvou kondenzátorů (keramický 100

nF, elektrolitycký 10 $\mu$ F), které by měli být umístěny co nejbližší jak je možné k pinu 3 tohoto senzoru.

V mé práci jsem využil pro připojení zařízení SPI rozhraní a je připojen jako slave. Sériové rozhraní komunikuje s okolím pomocí čtyř vodičů CS, SPC, SDI a SDO. CS znamená povolení sériového rozhraní a je řízeno SPI master zařízením. Při zahájení přenosu přechází do stavu „low“ a po jeho ukončení se vrací zpět do „high“ stavu. Signál SPC jsou seriové hodiny a ty jsou řízeny od SPI master. Jsou vypnuty, když CS je ve stavu „high“ (žádný přenos). Signály SDI a SDO jsou vlastní datové vodiče sériového přenosu pro vstupní a výstupní data. Tyto linky jsou řízeny spádovou hranou od sériových hodin (SPC) a měly by být zachyceny do náběžné hrany hodin (SPC). Oba registry pro čtení a zápis jsou kompletně obslouženy během 16 pulsů nebo ve složeném režimu během 8 pulsů pro čtení a zápis. Trvání bitu je čas mezi dvěma spádovými hranami sériových hodin. První bit (bit 0) začíná s první spádovou hranou SPC po spádové hraně CS, protože poslední bit začíná po poslední spádové hraně SPC právě před náběžnou hranou CS.



obr. 3.4.3 Průběh komunikace SPI

*bit 0:* RW bit. Když je 0, tak data DI(7:0) jsou zapsána do zařízení. Když je 1, tak jsou data DO(7:0) ze zařízení čtena.

*bit 1:* MS bit. Když je 0, tak adresa zůstane nezměněna ve složeném read/write příkazu. Když je 1, tak je adresa inkrementována ve složeném příkazu read/write

bit 2-7: Adresa AD(5:0). Toto je adresa pole z indexovaného registru.

bit 8-15: Data DI(7:0) pro mód zápisu. Jsou data, která chceme zapsat do zařízení (MSb je první)

bit 8-15: Data DO(7:0) pro mód čtení. Jsou data, která chceme číst ze zařízení (MSb je první)

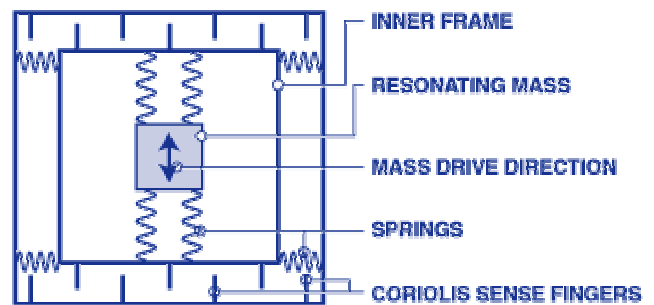
### 3.5 Gyroskop ADXRS300

#### 3.5.1 Princip a popis měření rotace

Gyroskop je zařízení na určování a měření změny polohy nebo natočení předmětu ke kterému je připevněn. V dřívějších dobách byly využívány hlavně mechanické gyroskopy, které byly velké a těžké. V dnešní době jsou již vyráběny několika výrobci malé gyroskopy MEMS technologií, které v sobě obsahují jak měřící jednotku tak i obvody pro zpracování naměřených signálů a jejich vyhodnocení. V nabídce gyroskopů nalezneme senzory jak s analogovým výstupem tak i digitálním. Gyroskopy naleznou své uplatnění kromě inerciální navigace také například v stabilizaci plošin nebo v automobilovém průmyslu.

Gyroskopy jsou obecně určeny pro měření úhlové rychlosti, tj. údaj o tom, jak se měřený objekt rychle otáčí v jednotkách stupňů/sekundu ( $^{\circ}/s$ ). Rotaci je možné typicky měřit vzhledem k jedné ze tří os z, y, x, někdy označované jako svislá (kolmá) osa (yaw axis), příčná osa (pitch axis) a podélná osa (roll axis) - viz. obrázek 1. Gyroskopy vyráběné jako integrované MEMS obvody pracující na principu Coriolisovy síly ( $F_c = 2 \cdot m \cdot v \times \omega$ ), umí měřit pouze v jednom směru - kolmém na plochu chipu (yaw axis). Pro jiné směry je nutné zajistit správné natočení a umístění součástky.

Při praktickém použití Coriolisovy síly v integrovaných gyroskopech se využívá technologie MEMS, kde se vytváří na chipu spolu s elektrickými obvody i mechanické mikrosoučásti, které tvoří



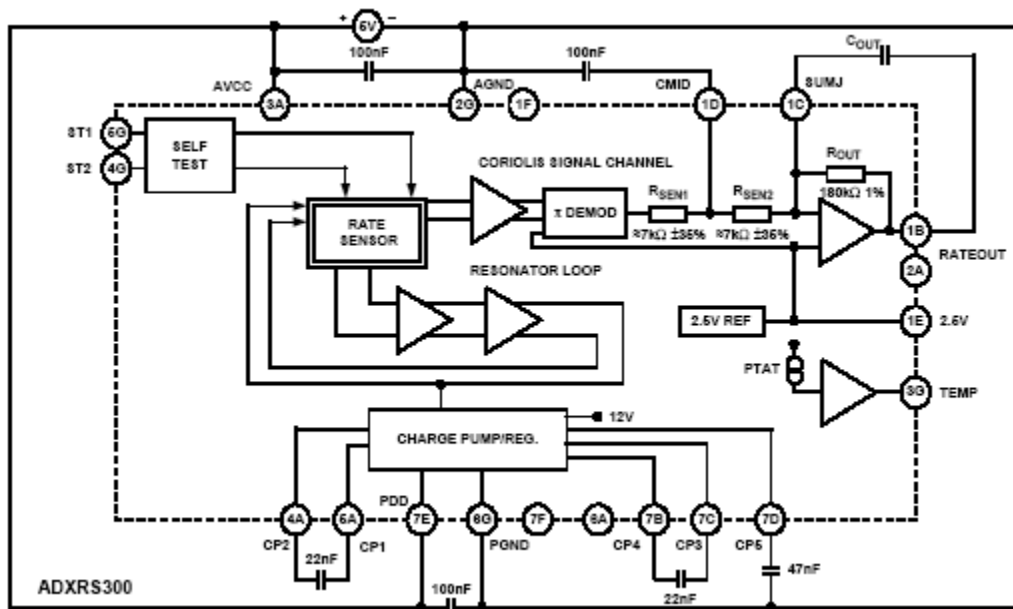
obr. 3.5.1 Princip gyroskopu

samotný snímač. Různí výrobci sice používají trochu odlišné struktury, ale základní princip je vždy podobný a znázorňuje je ho obrázek 3.5.1. Základ tvoří rezonující struktura (resonating mass) upevněná v rámu (inner frame), která se vlivem vlastní mechanické rezonance, zde reprezentované pružinami (springs), pohybuje v uvedeném směru (Mass drive direction) - kolmém na směr otáčení. Přitom vzniká Coriolisova síla úměrná úhlové rychlosti otáčení, která stlačí vnější pružiny rámu a způsobí vzájemný posuv měřících plošek (Coriolis sense fingers)

fungující jako elektrody vzduchových kondenzátorů. Výstup je tedy změna kapacity úměrná úhlové rychlosti otáčení °/s.

### 3.5.2 Technické možnosti gyroskopu ADXRS300

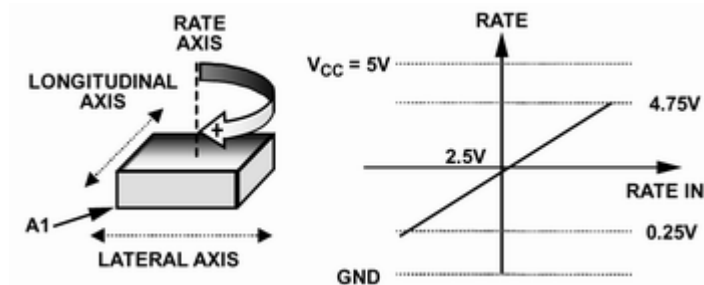
Pro toto zařízení jsem vybral iMEMS (integrated micro electro-mechanical system) gyroskop z nabídky firmy Analog Devices ADXRS300. Jak již jeho název napovídá, jeho rozsah je  $\pm 300$  °/s. Tento obvod má integrovaný nejen vlastní snímač, ale i vyhodnocovací a řídicí části. Blokové schéma senzoru je na obrázku 3.5.2. včetně externích součástek. Tyto gyroskopy jsou vyráběny v BGA pouzdrech s rozměry 7 x 7 x 3 mm. Jádrem 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.



obr. 3.5.2 Blokové schéma gyroskopu ADXRS300

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. Funkce je tedy shodná s principem uvedeným již výše v článku. 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.



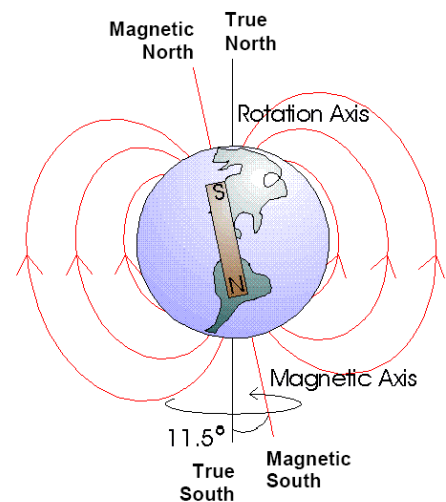
obr. 3.5.3 Výstupní napěťová závislost na rotaci gyroskopu

Z pohledu elektrických vlastností a rozhraní jsou obvody řady ADXRSxxx vybaveny analogovým výstupem na pinu RATEOUT, který dává lineární napětí v rozsahu 0.25 až 4.75 V přímo úměrné měřenému úhlovému zrychlení.

### 3.6 Elektronický kompas

#### 3.6.1 Magnetické pole Země

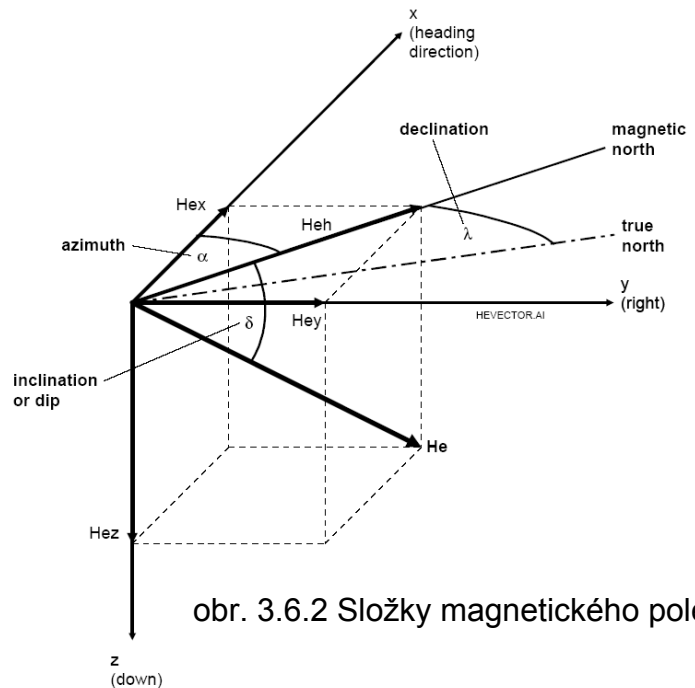
Magnetické pole Země je fyzikální veličina, kterou vyhodnocuje kompas k určení azimutu, proto zde uvádím několik základních informací pro uvedení do problematiky návrhu elektronického kompasu. Síla tohoto pole není na všech místech Zemského povrchu stejná, pohybuje se mezi 20  $\mu\text{T}$  na geomagnetické rovníku a 50  $\mu\text{T}$  na geomagnetických pólech. Pro představení můžeme znázornit magnetické pole Země jako dipól, který je zobrazen na obrázku 3.6.1, jehož osa kolísá v čase a prostoru (obr 3.6.2.) někde kolem 440 kilometrů od středu a 11,5 stupně od osy rotace naší planety Země. Magnetické siločáry směřují od jižního (south)



obr. 3.6.1 Mag.pole

k severnímu (north) geomagnetickému pólu. Geomagnetické póly jsou však umístěny kvůli shodnosti s geografickými póly opačně než póly dipólu.

Pro přiblížení jednotlivých termínů používaných v této oblasti využijte obrázek 3.6.2 znázorňující jednotlivé složky magnetického pole (horizontální, vertikální), úhly azimut, declination a inclination. Horizontální osa X (heading direction) ukazuje směrem pohybu. Osa Y je též horizontální a je kolmá k ose X a též k ose Z, která má směr gravitační síly. Vektor  $H_{eh}$  je též horizontální složka a je kolmá na gravitační sílu



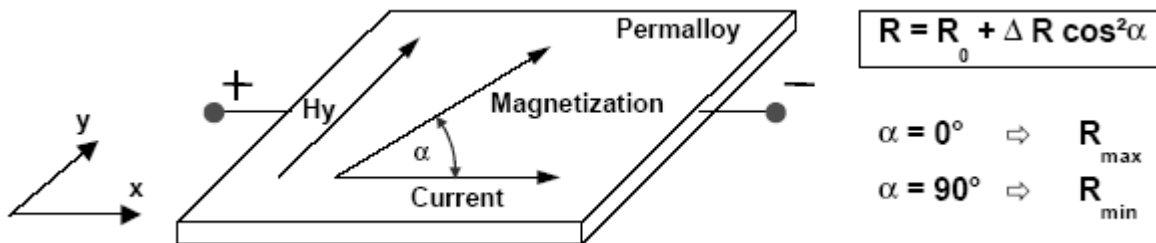
obr. 3.6.2 Složky magnetického pole

a směřuje k magnetickému severu Země. Složka  $H_e$  zobrazuje celkovou intenzitu a směr magnetického pole Země. Azimut  $\alpha$  je úhel mezi směrem pohybu zařízení a magnetickým severem a je ho možné vypočítat jako  $\arctan(H_{ey}/H_{ex})$ , kde  $H_{ey}$  je horizontální složka v ose Y a  $H_{ex}$  je horizontální složka v ose X. Declination vyjadřuje úhel mezi vektorem složky magnetického pole a směrem ukazujícím skutečný geografický sever, jeho velikost je závislá na geografické poloze a pohybuje se v rozmezí  $\pm 25$  stupňů. Pro informaci mezi skutečným geografickým severem a směrem pohybu je třeba k azimutu přičíst velikost úhlu declination. Úhel mezi vektorem magnetického pole Země a vektorem horizontální složky se nazývá inclination. Inclination je na geomagnetickém rovníku roven nule a na geomagnetických pólech je roven  $\pm 90$  stupňů. Jelikož úhly inclination a declination se s časem a geografickou polohou mění, jsou vydávány korekční tabulky, které jsou tisknuty přímo na mapách pro danou polohu.

### 3.6.2 Senzor KMZ51

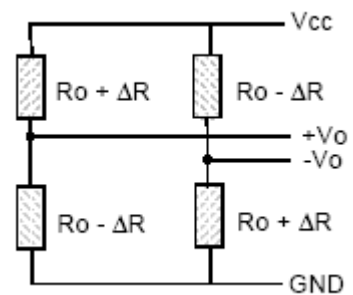
Ke konstrukci elektronických kompasů je ve velké většině především levnějších kompasů využíváno senzorů, které měří malé magnetické pole Země, resp. jeho horizontální složku. Jelikož pro určení azimutu je třeba znát horizontální složky pole, jak již bylo zmíněno výše. Sensory pro měření magnetického pole vyrábí více výrobců v různých provedeních (integrace více os do jednoho pouzdra) například Philips a Honeywell. Z důvodu snadné dostupnosti, kvalitní dokumentace a ceny, která se pohybuje kolem 250 Kč za kus, byl mnou zvolen magnetometr od firmy Philips s označení KMZ51.

KMZ51 je velice citlivý magnetometr, založený na magnetorezistivním jevu v tenké vrstvě magnetického materiálu(permalloy). V pouzdře senzoru je umístěn



obr.3.6.3 Magnetorezistivní efekt v permalloy

magnetorezistivní Wheatsonův můstek a také kompenzační a nastavovací(set/reset) cívky. Jedna kompenzační cívka je určena ke kompenzaci teplotní závislosti. Znaménko citlivosti může být nastaveno nebo měněno pomocí nastavovací cívky. Pokud byl magnetometr umístěn v silném magnetickém poli, pak můžeme krátkými proudovými impulsy do kompenzační cívky magnetometr znovu nastavit. Záporné proudové reset pulsy nastaví senzor na citlivost s opačným znaménkem. Použitím pravidelně střídajících se flipping pulsů a synchronního zesilovače dosáhneme nezávislosti na offsetu senzoru a zesilovače.



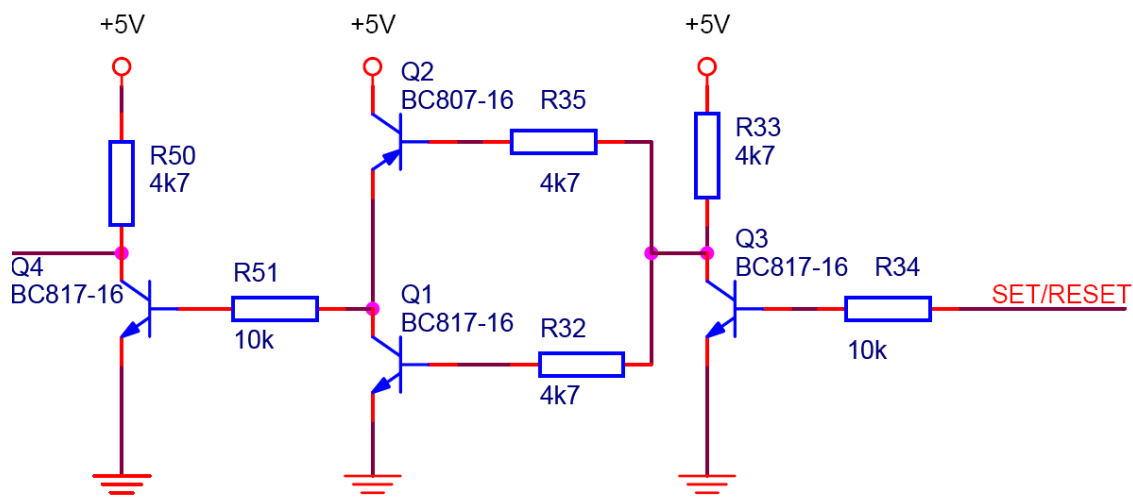
obr 3.6.4 Konfigurace můstku



### 3.6.3 Konstrukce elektronického kompasu

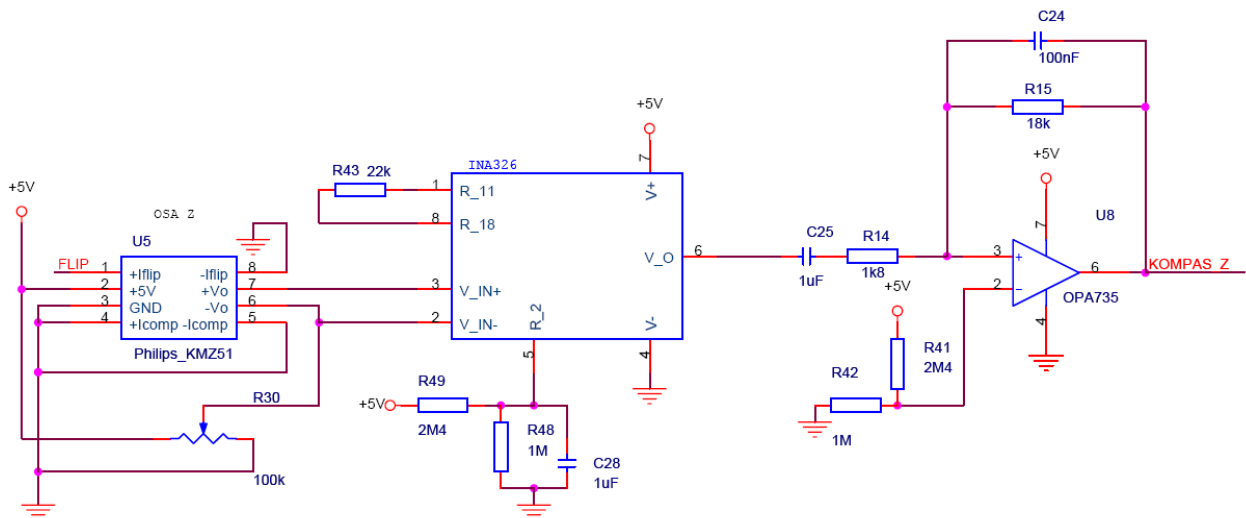
Elektronický kompas je v mém zařízení pro inerciální navigaci jeden z důležitých prostředků jak určit směr pohybu navigačního zařízení. Při zkoumání trhu s elektronickými kompas, jsem narazil na problém, kompas vyhovoval všem požadavkům, ale jeho cena byla příliš vysoká nebo byl kompas cenově dostupný, ale nevyhovoval požadavkům, které jsem potřeboval (chybějící kompenzace náklonu kompasu, nedostatečná přesnost). Tudíž jsem zvolil variantu vlastního návrhu elektronického kompasu se senzory KMZ51, který bude schopen správně měřit azimut, alespoň do náklonu zařízení  $\pm 25^\circ$ , Jde tede o konstrukci kompasu se třemi magnetometry (osy x,y,z), kde jednotlivý magnetometr měří magnetické pole v jedné os na kterou je natočen, tudíž musí být na plošném spoji umístěn dle potřebného směru dané osy. Pokud by byli využity jen dva magnetometry, bylo by potřeba zajistit vodorovnou polohu kompasu, jinak může dojít k chybě určení azimutu, až o úhel rovný naklonění kompasu. Při konstrukci se třemi magnetometry je tedy třeba měřit například pomocí inklinometrů náklon zařízení a následně pak při výpočtu azimutu kompenzovat tento náklon.

V konstrukčním zapojení stojí za zmínku dva z hlavních obvodů, které zajišťují ovládaní a zpracování signálu ze senzoru. Jednak se jedná o zapojení několika tranzistorů pro generování flipovacích pulzů pro nastavování jedné z kompenzačních



obr. 3.6.5 Obvod flipovacích pulzů

cívky, který je zobrazen na obrázku 3.6.4., který zajišťuje periodické nastavování a resetování magnetometru za pomoci proudových pulzů a to z důvodu jeho průběžného rozladování nebo ovlivnění silným magnetickým polem (naříklad při přiblížení k magnetu reproduktoru). Zde bylo třeba řešit problém řízení impulsů z procesoru, který má výstupní napětí 3,3 V a je třeba spínat napětí o hodnotě 5V.



obr 3.6.6 Zapojení pro zpracování signálu z magnetometru

Signál, který je následně generován na výstupech můstku je třeba upravit na vhodnou velikost pro zpracování A/D převodníkem, který je součástí procesoru MSP430F169. Precizní přístrojový operační zesilovač INA 326 zpracovává signál přímo z můstku v magnetometru, kde odporem R30 je třeba nastavit offset senzoru. Operační zesilovač OPA735 zesiluje signál na požadovanou hodnotu pro A/D převodník a integruje signál, aby nebyl citlivý na příliš rychlé změny signálu, kterými je nežádoucí šum. Tyto zapojení jsou stejné pro jednotlivé magnetometry v ostatních osách. V tomto zapojení není ještě část doporučená výrobcem magnetometru, která zajišťuje absolutní hodnotu výstupního signálu, který musí pracovat synchronně s flipovacími signály, což jsem se rozhodl řešit softwarově uvnitř v procesoru během výpočtu.

Pro elektronicky vyvažovaný kompas vypadá výpočet Hex a Hey dle vzorců na obrázku 3.6.7, kde Hxc, Hxz, Hxy jsou jednotlivé složky naměřené magnetometry umístěné na osách. K následnému výpočtu azimutu se dostaneme podle vzorce na obrázku 3.6.8.

$$H_{xe} = H_{xc} \cdot \cos \phi - H_{yc} \cdot \sin \phi \cdot \sin \rho - H_{zc} \cdot \sin \phi \cdot \cos \rho$$

$$H_{ye} = H_{yc} \cdot \cos \rho + H_{zc} \cdot \sin \rho$$

obr.3.6.7 Korekce náklonu kompasu

$$\alpha = \arctan \frac{V_y}{V_x}$$

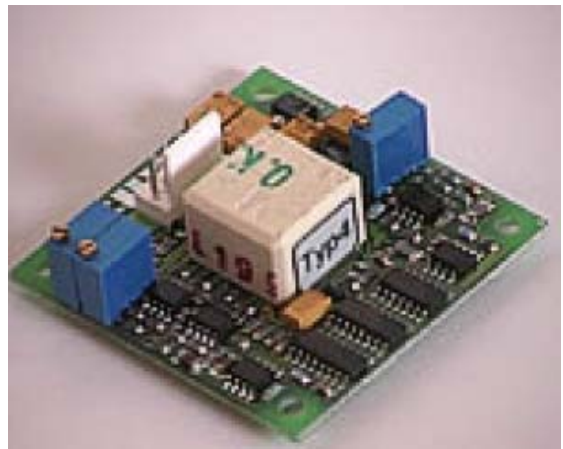
obr 3.6.8 Výpočet azimutu

### 3.7 Inklinometr

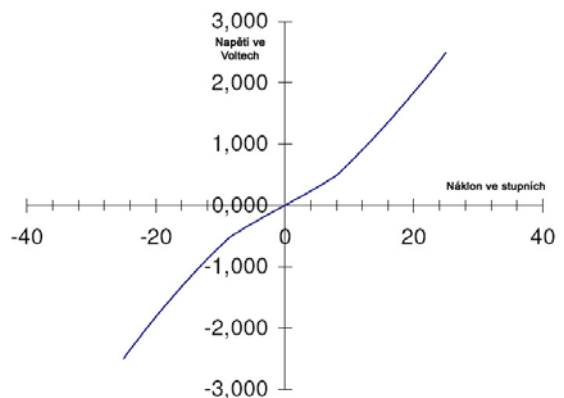
#### 3.7.1 Modul Planar NS-25C2

Jelikož nebude vždy zaručena zcela vodorovná poloha navigačního zařízení, je třeba měřit náklony zařízení ve dvou osách v letecké oblasti nazývaných roll (levo-pravý) a pitch (předo-zadní). Pomocí těchto hodnot je pak korigován výpočet azimutu kompasu, jak již bylo zmíněno výše.

Kompletní modul od německé firmy HL-Planartechnik se senzory, vyhodnocuje náklon ve dvou osách a to v rozmezí  $\pm 25^\circ$ , proto je tedy třeba provozovat zařízení v těchto rozmezech náklonů jinak chyba určení azimutu může být až velikost náklonu zařízení. Tento senzor náklonu využívá jako základní element vodivou buňku. Pomocí rozptylového pole je měřen stav hladiny kapaliny v buňce, čímž se spočte objem a pomocí diferenčního měření se určí úhel náklonu. Měření hladiny se provádí pomocí střídavého napětí, přičemž kombinací mikrostruktury a speciálně pro to vyvinuté techniky je možné eliminovat teploty na výstupní úhel. Výstup z modulu inklinometru je analogový a to s průběhem naznačeným na obrázku 3.7.2.



obr.3.7.1 Modul inklinometru



obr. 3.7.2 Průběh napětí inklinometru

V mém zapojení je modul napájen napětím 5 V, přičemž výstup je vztažen k 2,5 V. Tedy

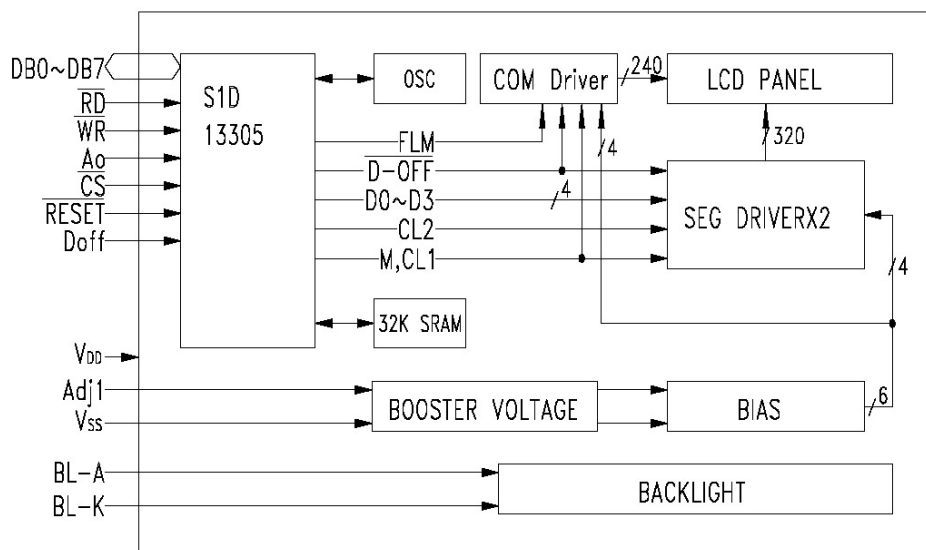
výstupní napětí se nesoucí informací o náklonu se pohybuje mezi 0,5 V až 4,5 V. Spotřeba modulu je udávána výrobcem mezi 7 .. 30 mA, rozlišení senzoru je  $\pm 2^\circ$  a rozměry jsou 50 mm x 50 mm x 12 mm.

K mé desce se senzory je možné modul připojit pomocí pěti pinového konektoru. Zde je následně napětí z jednotlivých os zpracováno pomocí operačních diferenčních zesilovačů od firmy TI OPA2703 na hodnotu zpracovatelnou A/D převodníkem procesoru MSP430.

### **3.8 Komunikační rozhraní pro uživatele**

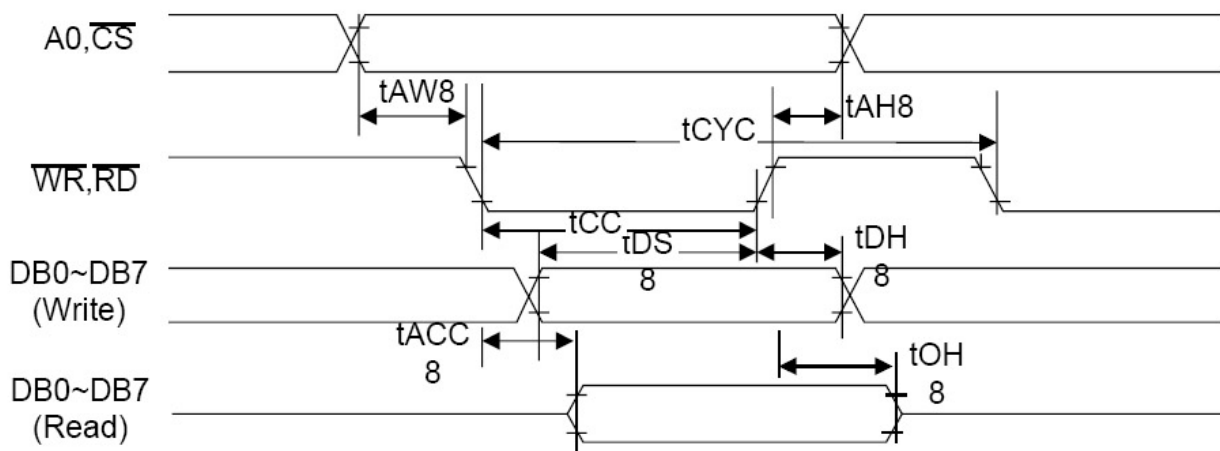
#### **3.8.1 Grafický displej**

Kvalitní zobrazovací jednotka zajišťuje, aby naměřená a zpracovaná data byla v co nejvhodnější a uživatelsky příjemné podobě podána uživateli zařízení. Pro zobrazování souřadnic či číselných údajů z jednotlivých senzorů by jistě stačily zobrazovací jednotky jako jsou například LED displeje nebo řádkové LCD displeje. Pro tento účel byl vybrán grafický displej od firmy POWERTIP distribuovaný v České republice firmou Elatec. Tento displej disponuje zobrazovací plochou 320 x 240 bodů s bílým podsvícením LED v provedení FSTN, což zaručuje excelentní zobrazení s vysokým kontrastem a data jsou na displeji zobrazována černo-bíle. Pro řízení zobrazování dat, využívá tento displej inteligentního řadiče od firmy Epson s typovým číslem S1S13305. Zajímavostí tohoto displeje je analogový touch screen, který je nalepen na vrchní části displeje. Samozřejmě je nutno počítat s částečnou ztrátou jasu způsobenou průchodem světla touch screenem. Popis způsobu snímání polohy na touch screenu je popsán v níže uvedeném odstavci 3.8.2 Touch screen.



obr. 3.8.1 Blokové schéma displeje

Blokové schéma displeje a způsob připojení k procesoru zobrazuje obrázek 3.8.1. Displej je připojen osmi bitovou sběrnicí pro přenos dat do displeje a řídicích příkazů uložených v řadiči displeje. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3.3 Úprava napěťových úrovní 5V - 3,3V, bylo třeba přizpůsobit napěťové úrovně logických hodnot. Pěti voltová úroveň zde musí být zachována ne z důvodu řadiče, ale kvůli provozu displeje, který



obr. 3.8.2 Průběh řízení displeje

vyžaduje pro správnou funkci kontrastní napětí při teplotě 25 °C mezi 20,2V a 20,8V, které vytváří násobič integrovaný na displeji, tedy proto jsou logické úrovně podmíněné pěti voltové hodnotě. Z fyzických rozměrů uvedu viditelnou plochu displeje a to je 78,78 mm x 59,58 mm s velikostí bodů 0,22 mm x 0,22 mm a jejich roztečí 0,24 mm x 0,24

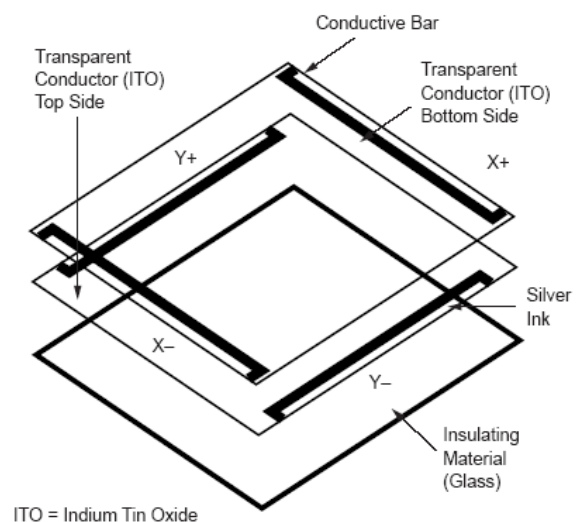
mm. Spotřeba displeje se pohybuje kolem 20 mA a lze ho provozovat při teplotách od -10 °C do +60 °C. Časový diagram zápisu dat a příkazů do displeje ukazuje obrázek 3.8.2 jež se shoduje s běžným ovládním podobných displejů.

Nyní bych uvedl několik zajímavostí o řadiči Epson S1D13305, který tento displej využívá ke komunikaci s mikrokontrolérem. Tento řadič je určen k ovládní textových a grafických LCD displejů. Umí vrstveně zobrazovat text nebo data, plynulé scroolování celého nebo jen částí displeje a to i do různých směrů. Řadič obsahuje generátor 160 znaků o velikosti 5 x 7 pixelů uložených v interní paměti ROM.

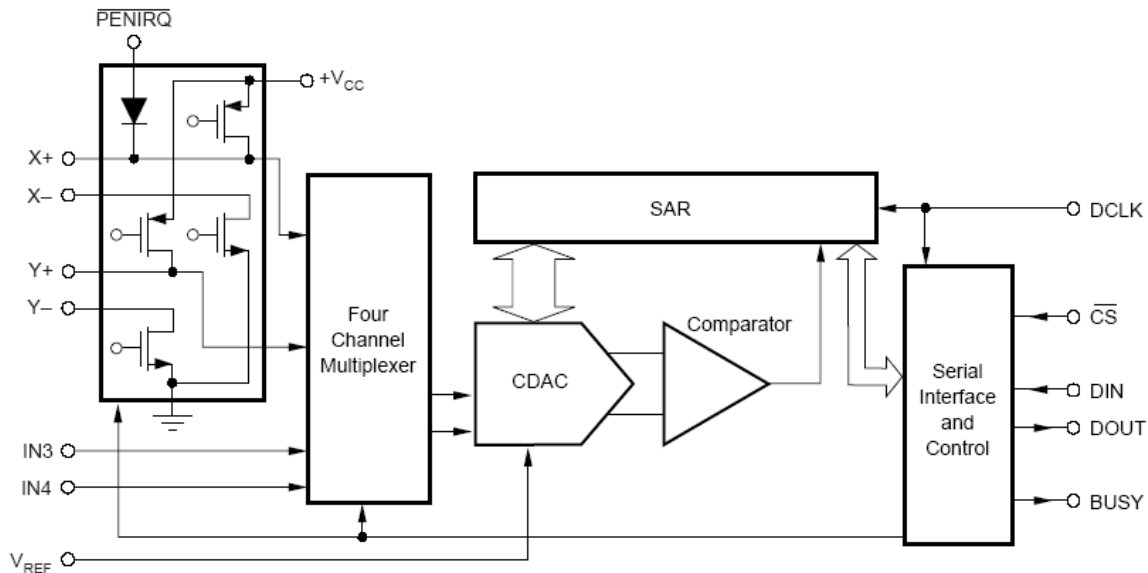
### 3.8.2 Touch screen

#### 3.8.2.1 Princip snímání polohy

Analogový touch screen se chová jako dva proměnlivé odpory v ose X a Y (4 vývody), hodnota odporů se mění podle místa stlačení. Strukturu analogového touch screenu zobrazuje obrázek 3.8.3. Bod stlačení se vyhodnotí jako průsečík hodnot obou odporů. Odečet hodnot odporů lze provést např. přes A/D převodník. Další možností je odečet velikosti odporů přes integrovaný obvod ADS 7843 (výrobce TI), do kterého se přímo bez dalších součástek připojí výstupy touch screenu a hodnoty jsou dostupné na sériovém výstupu obvodu. Konstrukčně je touch screen vyroben konzistentně ze dvou transparentních rezistivních vrstev.



obr. 3.8.3 Struktura analog. touch screenu



obr. 3.8.4. Blokové schéma obvodu ADS7843

### 3.8.2.2 Touch screen controller ADS7843

Pro zpracování informace o stisknutém místě na displeji využívám obvodu od firmy Texas Instruments ADS7843, který je pro čtyř vodičové analogové touch screeny určen. Obvod obsahuje 12-bitový A/D převodník se synchronním sériovým výstupem. Typický příkon obvodu je  $750\mu\text{W}$  při frekvenci zpracování 125 kHz a napájení 2,7V. Referenční hodnota převodníku může být měněna mezi +1V až napájecím napětím. Obvod obsahuje úsporný mód, který omezuje příkon až na  $0,5\mu\text{W}$ , proto je vhodný i pro zařízení pracující s bateriovým zdrojem. Blokové schéma obvodu je na obrázku 3.8.4

### 3.8.3 Klávesnice

K modulu s procesorem je možné připojit jakoukoli maticovou klávesnici s maximálně 16 tlačítky. Díky struktuře zapojení maticové klávesnice stačí pouze osm vodičů, princip indikace stisknutých kláves je jednoduchý. Na mikrokontroléru jsou nastaveny vodiče jdoucí na sloupce jako výstupní a řádky klávesnice jako vstupní, následovně pak ve „scan“ cyklu postupně na jednotlivé výstupní piny sloupců nastavuje hodnotu do stavu „high“ a na vstupním registrů řádků čte indikované



obr. 3.8.5

hodnoty. Výsledek „scanu“ je uložen do 16 bit proměnné, ve které jednotlivé bity značí dané tlačítko. Tímto způsobem je možno indikovat i více násobné stisknutí tlačítek najednou. Pro testovací provoz je připojena klávesnice zobrazená na obrázku 3.8.5

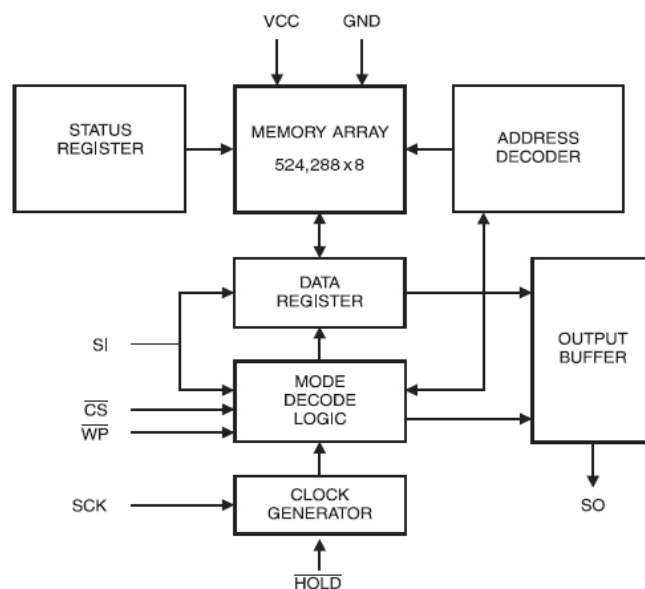
### 3.8.4 Sériové rozhraní

Pro následné zpracování naměřených dat z navigačního modulu s PC bylo zařízení vybaveno sériovým rozhraním RS232. Využití tohoto rozhraní není omezeno jen na přenos naměřených dat, ale je ho možné například využít k nahrání bodů trasy, či třeba jednoduché mapy daného okolí, kde se bude navigační přístroj provozován. Záleží jen na programovém vybavení přístroje, kterým bude vybaveno. Pro jednoduchou demonstraci tohoto rozhraní jsem napsal aplikaci v jazyce C# ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2005, která vznikla jako semestrální práce během předmětu programování pro řízení. Pomocí zvoleného jednoduchého protokolu jsou aktuálně naměřená data, která procesor zpracuje, čtena ze sériové linky a zobrazována na monitoru PC. Aplikaci naleznete na přiloženém CD a screen shot v příloze B.4.

Pro úpravu signálu vysílaných nebo přijímaných se sériového rozhraní jsem použil obvod od firmy Texas Instruments MAX3221, který převádí signály na požadované hodnoty standardem pro sériový přenos po lince RS232.

### 3.8.5 Sériová flash paměť

Jelikož datová flash paměť, kterou obsahuje mikroprocesor, není dostatečně velká pro ukládání naměřených dat, bylo třeba vybavit zařízení přídatnou paměť, která bude dostatečně vyhovovat požadavků pro ukládání dat, které budou během měření získána a zpracována procesorem. Pro tento účel byla vybrána flash paměť se sériovým přístupem k datům, s rozhraním SPI, kterého využívá i



obr.3.8.6 Blokové schéma paměti



několik dalších periferních zařízení u tohoto navigačního modulu. Na tuto paměť nebyl požadavek na vysokou rychlost přenosu dat. Jelikož budou data vždy ukládána do bufferu v procesoru a následně po blocích přenášena do paměti, tato paměť disponuje dobou zápisu 30 $\mu$ s/ Byte. Blokové schéma paměti je zobrazeno na obrázku 3.8.6 .

# Kapitola 4

## Popis softwaru

### 4.1 Základní informace

Procesor MSP430 podporuje programování kromě assembleru také možnost psaní softwaru v jazyce C, který je pro psaní softwaru pohodlnější a přístupnější. Proto i já v mé práci jsem psal všechny funkce a knihovny určené pro navržený hardware v jazyce C. Můj cíl práce nebyl implementovat algoritmus pro samotné navigování, ale jen oživit jednotlivé funkční bloky a odzkoušet jejich funkčnost. Jelikož jde o procesor se kterým nemá mnoho lidí z katedry zkušenosti, bylo třeba ze začátku prokousat některými problémy, které programování přinášelo. Jak již je zmíněno výše pro přenesení napsaného kódu využívám paralelní programátor a balíček MSPGCC. Informace pro další průkopníky práce s tímto procesorem, využívající systém Windows: Výše uvedený programátor je možno připojit pouze k paralelnímu portu, který je implementován na základní desce, jelikož ovladač GIVEIO, dokáže pouze zajistit přístup k tomu to portu. S přídatnými PCI kartami bohužel komunikovat nebude. Druhý problém, který nastal při zprovoznění programování, byla absence SP2 ve WinXP bez kterého též nebylo možné procesor naprogramovat.

### 4.2 Implementované části

V době odevzdání této práce není zcela dokončeno oživení veškerých částí navrženého hardwaru, ale na psaní kódu pro jednotlivé části průběžně pracuji.

Samozřejmě v první řadě bylo třeba nastavit všechny základní části procesoru od správné inicializace všech potřebných portů a nastavení hodinového systému procesoru. Jelikož procesor disponuje několika možnými režimy mezi kterými je možné za chodu procesoru přepínat. Po základním oživení procesor pracuje s vnitřním RC oscilátorem, který má frekvenci kolem 800 kHz, která je závislá na teplotě a dále je možné pokud jsou připojeny, využívat dva externí oscilátory, jeden určený pro vysokou frekvenci a druhý pro watch krystal s nízkou frekvencí. Pak je možno využívat k časování jednotlivých částí, tři časové linie: Master Clock pro jádro procesoru, SMCLK a ACLK pro různé periférie.

V dalším kroku ožívování jsem se naprogramoval rutiny pro komunikaci s uživatelským rozhraní a to maticovou klávesnici, která má 16 tlačítek. K zjišťování stavu stisknutí jsem napsal čtyři procedury, které zajišťují indikaci stisku. V první části je třeba inicializovat správně porty na kterých je připojena a pak před každým zavoláním dotazu na stav stisknutých tlačítek je třeba provést scan cyklus stavu tlačítek. Čtvrtá funkce obstarává zapamatování předchozích stisknutí tlačítek.

Asi nejzajímavější částí uživatelského rozhraní je grafický displej 320 x 240 bodů, se kterým zajišťuje komunikaci řadič Epson. Před prvním zobrazením například znaku je třeba displej inicializovat, dle daného postupu. Zajistit napájení displeje, pokud je například v úsporném módu. V druhém kroku posláním příkazu SYSTEM SET se nastaví části ohledně zdroje znaků, počet pixelů na znak, počet řádků na displeji, dále pak příkazem SCROLL se nastaví jednotlivé bloky, které budou využívány k vykreslování. HDOT SCR nastaví horizontální scroolovací pozici, příkazem DIPS ON/OFF zajistíme zapnutí či vypnutí jednotlivých bloků displeje. Následovně je třeba vymazat jednotlivé vrstvy displeje (jsou dvě), nastavit kurzor na první pozici a pak již možno zapisovat jednotlivá data na displej po zapnutí DISP ON/OFF. Samozřejmě displej disponuje velkým množstvím zajímavých funkcí, které doufám, že podaří oživit.

# Kapitola 5

## Závěr

Řešení mé bakalářské práce bylo rozděleno do několik částí. V první části šlo o seznámení s problematikou inerciální navigace, její obor využití a problémů, které jsou třeba při inerciální navigaci řešit. Druhá část, byla velice důležitá, jelikož v této fázi jsem zkoumal a vybíral jednotlivé senzory, součástky, které jsou na trhu dostupné a vhodné pro využití pro inerciální navigaci a v neposlední řadě také procesor, který je hlavní částí pro zpracování údajů, během tohoto zkoumání jsem bohužel narazil na nemožnost sehnání některých komponent v malém množství v ČR. Naopak od firmy Texas Instruments je možné získat většinu procesorů, operačních zesilovačů a obvodů pracujících s procesorem získat zdarma jako ukázkové obvody. Ve třetí části bylo třeba navrhnout plošné spoje jak pro zařízení inerciální navigace, tak i pro paralelní programátor pro MSP430, který nebyl k dispozici. Rozmístění jednotlivých součástek bylo uspořádáno do určitých logických bloků a to jak na desce s procesorem, která obsahuje v první řadě procesor, konektory pro připojení jednotlivých uživatelských rozhraní a veškeré obvody potřebné ke komunikaci s perifériemi. Na desce se senzory jsou bloky s kompasem, akcelerometrem, gyroskopem a inklinometrem. Konektory a tlačítka které budou při vývoji častěji používány byli raději použity trochu robustnější, aby nedošlo při používání ke zničení, jich samotných a také desky. Jelikož jde o první prototypovou desku, nevyhnul jsem se v návrhu některých chyb, které se ukázaly velice rychle po osazení plošného spoje a první práci. Deska s procesorem by uvítala robustnější konektor pro napájení aby při opakovaném připojování nemohlo dojít k ukroucení napájecího kabelu. Konektor pro JTAG programovací rozhraní by bylo vhodné umístit k okraji desky, aby nedošlo k jeho zakrytí displejem při jeho přidělení nad horní desku s procesorem. Při proměřování jednotlivých částí nevykazovali části žádné chyby v návrhu, jen paměť flash měla nadměrný odběr což se projevilo nadměrným zahříváním čipu. Jelikož práce, která měla navazovat na výsledky mé práce nebyla zatím vytvořena, nebylo možné plně odzkoušet funkčnost a přesnost tohoto zařízení, která se měla zabývat algoritmem výpočtu polohy z údajů naměřených pomocí jednotky mnou navržené.

Při dalším vývoji tohoto zařízení bych viděl zajímavou možnost přidání GPS modulu, který by přebíral navigaci v případě dostupnosti signálu. Též by mohla část s inerciální navigací nastavit svůj výchozí bod podle poslední známé pozice, kterou GPS přijímač obdržel, před ztrátou dostupnosti signálu. Rozhraní RS232, by mohlo být nahrazeno novější a menším rozhraním USB. Případně nahradit nebo doplnit pevnou pamětí flash, pamětí výměnou, na kterou by bylo možno nahrát třeba mapy prostředí.

# Literatura

1. Herout, P. Učebnice jazyka C, České Budějovice: Kopp 2003
2. Záhlava, V. Orcad 10, Praha: GRADA 2004
3. Punčochář, J. Operační zesilovače v elektronice, Praha: BEN 2002
4. Záhlava, V. Metodika návrhu plošných spojů, Praha: ČVUT 2002
5. Stork, S. Electronic Compass Design using KMZ51 and KMZ52  
[http://www.semiconductors.philips.com/acrobat\\_download/applicationnotes/AN00022\\_COMPASS.pdf](http://www.semiconductors.philips.com/acrobat_download/applicationnotes/AN00022_COMPASS.pdf) (online)
6. Philips Data Sheet KMZ51  
[http://www.semiconductors.philips.com/acrobat\\_download/datasheets/KMZ51\\_3.pdf](http://www.semiconductors.philips.com/acrobat_download/datasheets/KMZ51_3.pdf) (online)
7. HIPlanarTechnik Zweiachsige Sensor NS25/E2 [http://cms.hlplanar.de/data-live-planar/docs/pdf/Datasheets\\_ger/NS-25E2ger.pdf](http://cms.hlplanar.de/data-live-planar/docs/pdf/Datasheets_ger/NS-25E2ger.pdf) (online)
8. Analog Data Sheet ADXRS300  
[http://www.analog.com/UploadedFiles/Data\\_Sheets/732884779ADXRS300\\_b.pdf](http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/732884779ADXRS300_b.pdf) (online)
9. ST Data Sheet LIS3LV02DQ  
<http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/11115.pdf> (online)
10. Epson Data Sheet S1D13305 [http://www.displaytech-us.com/pdf/application/Graphic\\_Module/Epson/S1D13305.pdf](http://www.displaytech-us.com/pdf/application/Graphic_Module/Epson/S1D13305.pdf) (online)
11. TI Data Sheet ADS7843 <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ads7843.pdf> (online)
12. TI Data Sheet MSP430F169  
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f169.pdf> (online)
13. TI MSP430 User Guide <http://focus.ti.com/lit/ug/slau049f/slau049f.pdf> (online)
14. Atmel Data Sheet AT25FS040  
[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc5107.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc5107.pdf) (online)
15. TI Data Sheet INA326 <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ina326.pdf> (online)
16. TI Data Sheet OPA735 <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa735.pdf> (online)
17. TI Data Sheet OPA2703 <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa703.pdf> (online)

18. TI Data Sheet MAX3221 <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/max3221.pdf>  
(online)
19. TI Data Sheet sn74hc244 <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hc244-ep.pdf>  
(online)
20. PowerTip Data Sheet PG320240WRF-HE4-HS3  
<http://www.hw.cz/pdf/PG320240WRF-HE4HS3.pdf> (online)
21. MSPGCC <http://mspgcc.sourceforge.net/> (online)
22. OrCAD Version 10.0

# Dodatek A

## Obsah přiloženého CD

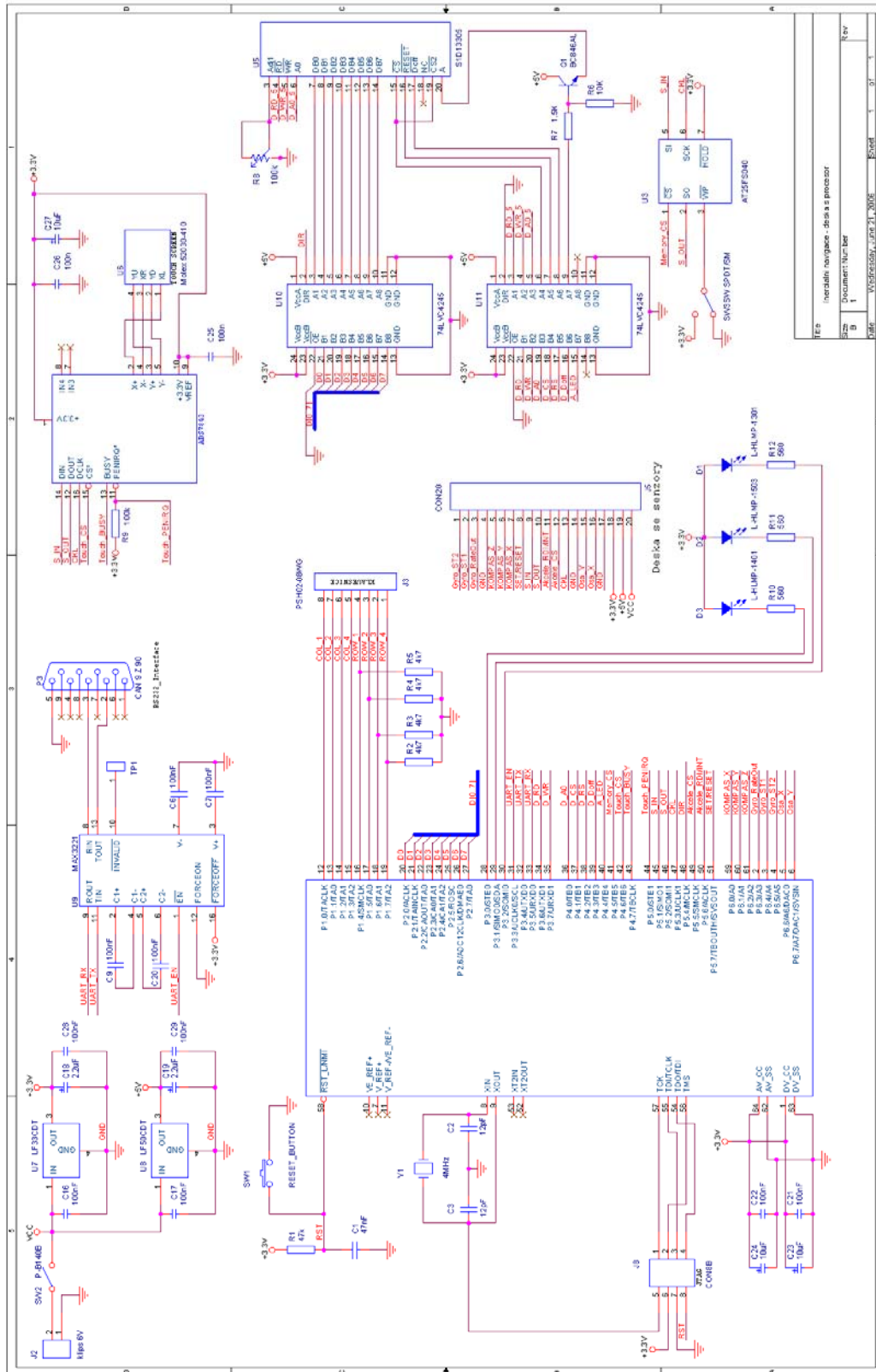
- /aplikace                      Aplikace ke komunikace po lince RS232 s navigačním přístrojem v C# (Microsoft Visual Studio 2005)
- /data\_sheet                    Jednotlivé data sheety k použitým součástkám
- /mspgcc                        Balíček používaný k programování procesoru
- /orcad                         Navržené schémata a plošné spoje desky se senzory, procesorem a paralelního programátoru
- /bakalarska\_prace            Dokument ve formě pdf



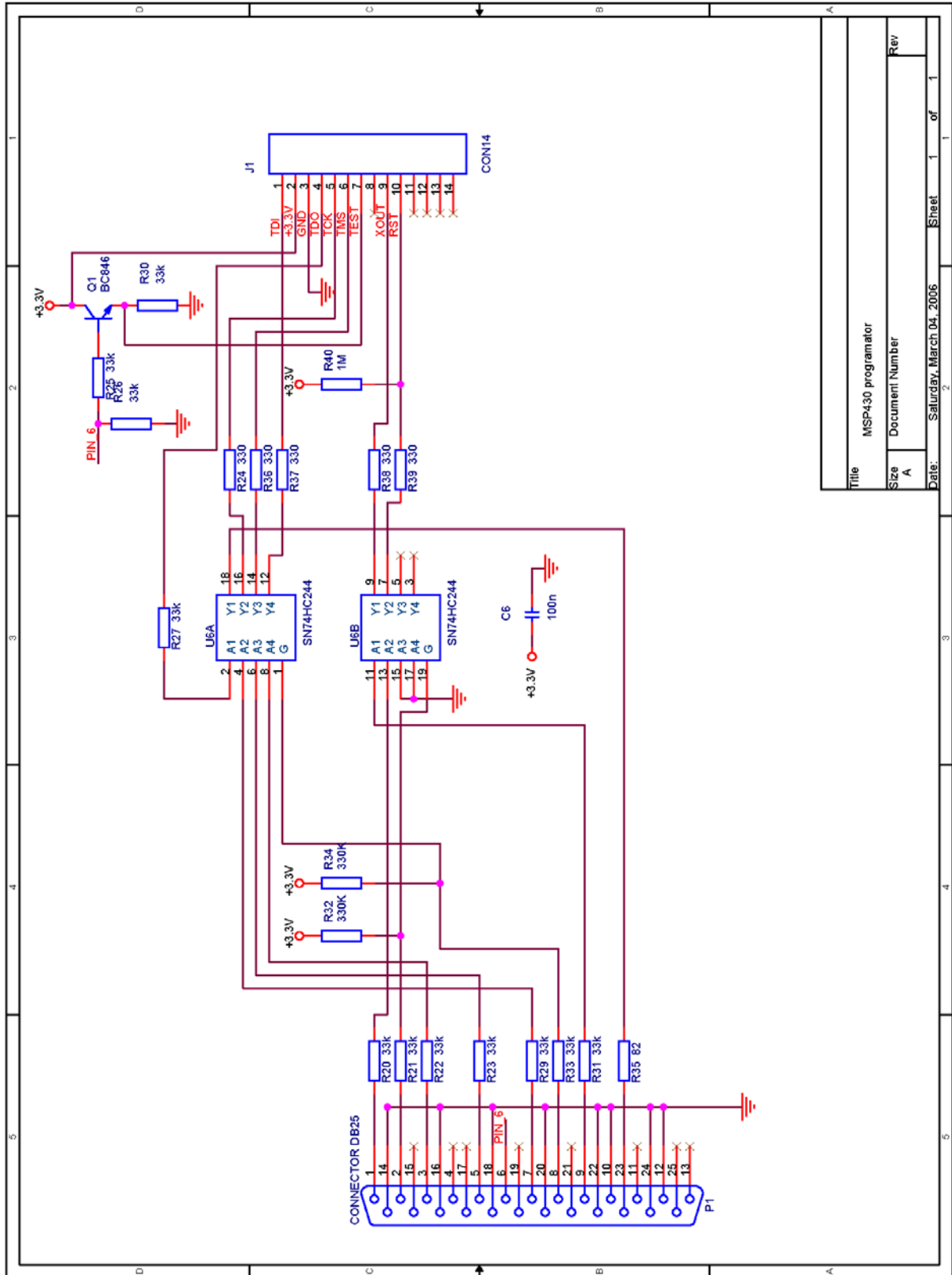
Dodatek B

Obrazová příloha



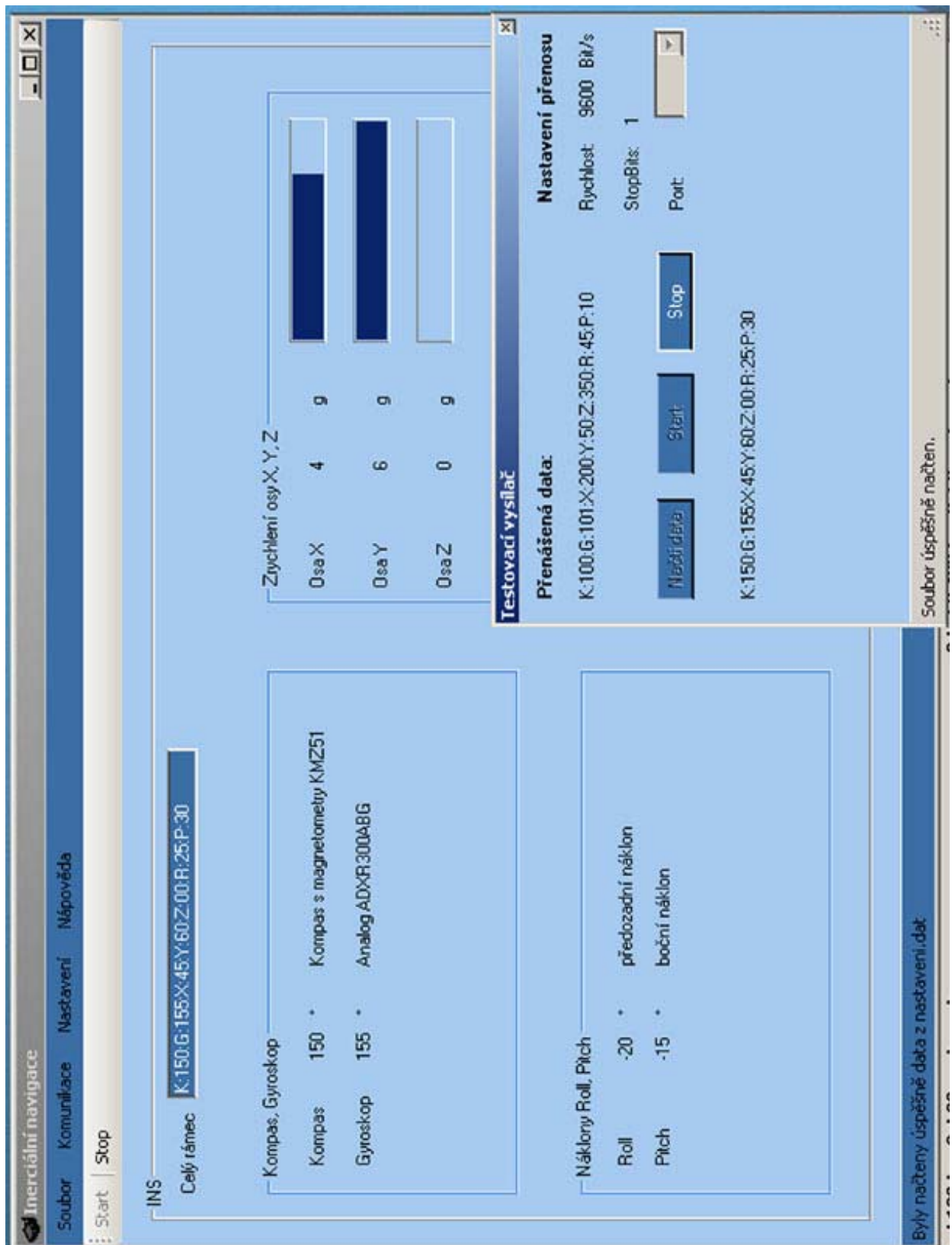


obr. B.2 Schéma zapojení desky s procesorem



Title		MSP430 programmer
Size	Document Number	
A		
Date:	Saturday, March 04, 2006	Sheet 1 of 1
		Rev
		1

obr. B.3 Schéma programátor pro MSP430



obr. B.4 Screen shot aplikace pro komunikaci po RS232 s navigačním modulem