

## ZÁKLADNÍ PRVKY KONSTRUKCE ELEKTRONICKÉHO KOMPASU

Ing. David Skula

Ústav automatizace a měřicí techniky

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně

Kolejní 2960/4, 612 00 Brno

Email: xskula00@stud.feec.vutbr.cz

Článek shrnuje základní prvky konstrukce elektronického kompasu na základě snímání magnetického pole Země. Uvedeny jsou zejména vhodné senzory a základní způsoby kompenzace jejich parazitních vlivů. Součástí je i teorie, která je nezbytná k pochopení popsáných měření a kompenzací.

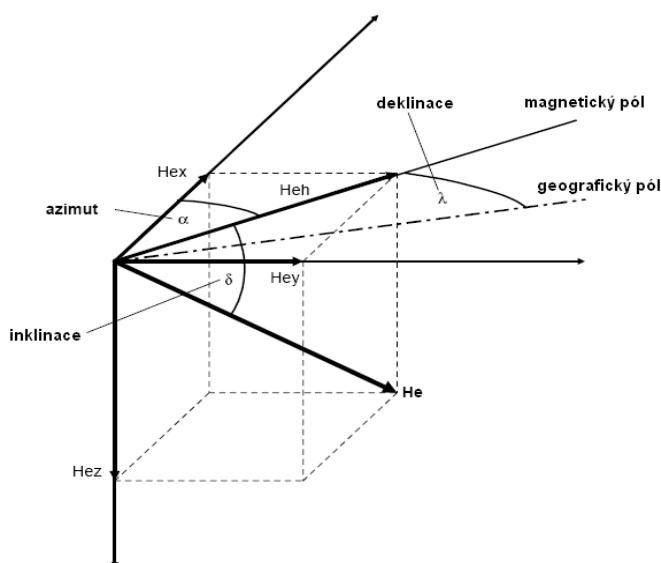
## 1. ÚVOD

Magnetické pole Země patří mezi základní přírodní síly. Působí v definovaném směru (od jihu k severu) a je relativně snadno měřitelné. Z těchto a mnoha dalších důvodů jsou snímače magnetického pole hojně používány v mobilní robotice a obecně v navigaci pro určení úhlu odklonu od severu, tedy azimutu. Naproti tomu je měření zatíženo množstvím parazitních vlivů, které ztěžují přesné určení azimutu.

Dále popsaná konstrukce elektronického kompasu je k dispozici u mnoha výrobců (např. Honeywell), ale cena těchto modulů je natolik vysoká, že je mnohdy lepší kompas zkonstruovat. Navíc komerční moduly obvykle neobsahují všechny základní druhy kompenzace, levnější varianty dokonce kompenzace neobsahují vůbec.

## 2. MAGNETOMETRY

Zařízení pro měření magnetického pole se nazývá magnetometr. Obecně je schopen měřit jakékoli magnetické pole velikostí spadající do rozsahu použité součástky. Zde je magnetometru využito pro měření magnetického pole Země. Z těchto údajů je posléze vypočten úhel odklonu od severu, tedy azimut.



Obr. 1: Vektor magnetického pole Země [1]

Na Obr. 1 je zobrazena 3D reprezentace vektoru magnetického pole  $H_e$  v libovolném bodě na Zemi.  $H_{ex}$  a  $H_{ey}$  jsou rovnoběžné s povrchem a  $H_{ez}$  směřuje do středu Země.

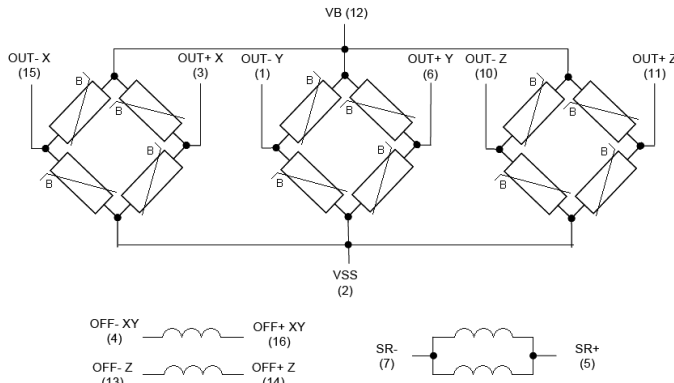
Velikost pole se mění v závislosti na místě měření. Siločáry vycházejí z jižního magnetického pólu a vcházejí do severního magnetického pólu. Označení „magnetický pól“ je použito záměrně. Tyto póly se totiž neshodují s geografickými póly a úhel mezi přímkami spojujícími příslušné póly (deklinace  $\lambda$ ) je v ČR asi  $11,5^\circ$  (celosvětově se pohybuje v rozmezí  $\pm 25^\circ$ ). Inklinace  $\delta$  je úhel mezi vektorem magnetického pole  $H_e$  a jeho složkou  $H_{ez}$ , směřující do středu Země. Jeho velikost je  $0^\circ$  na rovníku a blíží se  $\pm 90^\circ$  blízko pólů. V našich zeměpisných šířkách se inklinace pohybuje kolem  $-65^\circ$ .

Úhel  $\alpha$  vyjadřuje přímo azimut. Je počítán z hlavních složek vektoru magnetického pole podle rovnic (1).

$$\begin{aligned} H_{ex} < 0 \cup H_{ey} > 0 &\rightarrow \alpha = -\arctan \frac{H_{ey}}{H_{ex}} \\ H_{ex} > 0 \cup H_{ey} \neq 0 &\rightarrow \alpha = 180 - \arctan \frac{H_{ey}}{H_{ex}} \\ H_{ex} < 0 \cup H_{ey} < 0 &\rightarrow \alpha = 360 - \arctan \frac{H_{ey}}{H_{ex}} \\ H_{ex} = 0 \cup H_{ey} > 0 &\rightarrow \alpha = 90^\circ \\ H_{ex} = 0 \cup H_{ey} < 0 &\rightarrow \alpha = 270^\circ \\ H_{ex} > 0 \cup H_{ey} = 0 &\rightarrow \alpha = 180^\circ \\ H_{ex} < 0 \cup H_{ey} = 0 &\rightarrow \alpha = 0^\circ \end{aligned} \quad (1)$$

## 2.1. PRINCIP MAGNETOMETRŮ

Princip měření magnetického pole je založen na magnetorezistivním jevu. Tento jev je založen na změně odporu magnetického materiálu při změně působícího magnetického pole.



Obr. 2: Příklad vnitřní struktury magnetometru [2]

Na Obr. 2 je blokově znázorněna vnitřní struktura tříosého magnetometru. Obsahuje tři snímače magnetického pole ve formě Wheatstonových můstků složených z rezistorů z magnetorezistivního materiálu. Každý můstek je orientován ve směru jedné měřící osy (podle Obr. 1 ve směru  $H_{ex}$ ,  $H_{ey}$  a  $H_{ez}$ ). Po připojení napájení je mezi výstupy můstků napětí úměrné směru a velikosti magnetického pole.

Snímač dále obsahuje SET/RESET cívky a OFFSETové cívky. Po přivedení proudového impulsu na SET/RESET cívku se magnetické domény namagnetují ve směru magnetického pole vyvolaným proudem. Po odeznění proudového impulsu se domény opět natočí do směru daného magnetickým polem Země. Tato procedura zabraňuje vlivu parazitních magnetických polí a „rozladění“ magnetometru. OFFSETové cívky jsou určeny pro kompenzaci offsetu magnetometru. Jejich řízení je však složité a většinou se nepoužívají. Pro kompenzaci offsetu se s výhodou používají SET/RESET cívky. Po přivedení proudového impulsu se magnetické domény „nakalibrují“ na jeden směr a po přivedení opačného impulsu na směr opačný. Je-li načten výstup z můstku pro obě polarity pulsu, je možné jejich sečtením a vydělením dvěma vypočítat offset příslušné osy.

## 2.2. MAGNETOMETR HMC1043

Uvedené uspořádání nabízí například snímač firmy Honeywell HMC1043 [2]. Možnou náhradou je kombinace dvouosého magnetometru HMC1022 a jednoosého HMC1021Z.

Základní parametry snímače HMC1043:

Citlivost	1 mV/V/10 <sup>-4</sup> T
Rozsah měřitelných polí	±6.10 <sup>-4</sup> T
Maximální offset	±1,25 mV/V

Velikost magnetického pole Země je asi 6.10<sup>-5</sup> T. Při napájecím napětí 5 V je citlivost 5 mV/10<sup>-4</sup>T, což odpovídá výstupnímu signálu snímače v rozsahu ±3 mV. Zřejmá je nutnost signál zesílit před jeho zpracováním.

### 2.2.1. OFFSET MAGNETOMETRU

Offset magnetometru je hodnota, úměrná magnetickému poli, na výstupu snímače při nulovém působícím poli. Jde o výrobní nepřesnosti, zde konkrétně o rozdílný odpor magnetorezistorů. Offset je měřen jako rozvážení můstku mezi výstupy OUT+ a OUT-. Jeho velikost je závislá na napájecím napětí. V této práci je použito napájení 5 V, což odpovídá maximálnímu offsetu ±6,25 mV (katalogový údaj magnetometru HMC1043). To je více než dvojnásobek možného měřeného signálu při měření magnetického pole Země (±3 mV).

Je zřejmé, že bez vlivu offsetu by se výstupní signál snímače pohyboval v rozmezí ±3 mV. Reálně je však nutno počítat s offsetem, tudíž rozsah výstupu snímače je ±9,25 mV (3 mV + 6,25 mV). Z toho plyne podstatné snížení přesnosti. Protože dále je signál ze snímače zesilován na rozsah AD převodníku, musí být zesílení takové, aby nebyl rozsah AD převodníku překročen ani při maximálním offsetu. Oproti signálu bez offsetu klesne zesílení asi 3-krát.

Pro kompenzaci offsetu se používají, výše popsané, SET/RESET cívky. Změřený offset je pak odečítán od každé naměřené hodnoty.

### 2.2.2. VLIV MATERIÁLŮ V OKOLÍ

Jako i střelka kompasu neukazuje na sever v blízkosti magnetických materiálů, je i magnetometr citlivý na vše, co deformuje magnetické pole Země. Mezi tyto vlivy patří jak magnetické kovy, tak různé zdroje parazitního magnetického pole. Například transformátory nebo motory.

Nejlépeším způsobem jak tyto chyby eliminovat, je odstranit z blízkosti magnetometru všechny zdroje tohoto rušení. Obzvláště zdroje magnetického pole. Udává se, že předmět deformující magnetické pole, by měl být od magnetometru vzdálen dvojnásobek své velikosti. Ne vždy je to však možné. V případě, kdy je magnetometr umístěn např. na kovovém těle robota, je možné použít následující kompenzační postup k eliminaci vlivu kovu na magnetické pole [3].

Princip spočívá v pomalé rotaci modulu kolem Z-ové osy v celém rozsahu 360 °. Při tom je zjištěna maximální a minimální hodnota výstupu magnetometru X-ové a Y-ové osy ( $X_{max}$ ,  $X_{min}$ ,  $Y_{max}$  a  $Y_{min}$ ). Kalibrační údaje jsou pak vypočteny podle vzorců (2).

$$\begin{aligned}
 X_{sf} &= \frac{Y_{max} - Y_{min}}{X_{max} - X_{min}} \text{ nebo } 1 \iff \text{co je větší} \\
 Y_{sf} &= \frac{X_{max} - X_{min}}{Y_{max} - Y_{min}} \text{ nebo } 1 \iff \text{co je větší} \\
 X_{off} &= \left( \frac{X_{max} - X_{min}}{2} + X_{min} \right) \cdot X_{sf} \\
 Y_{off} &= \left( \frac{Y_{max} - Y_{min}}{2} + Y_{min} \right) \cdot Y_{sf}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

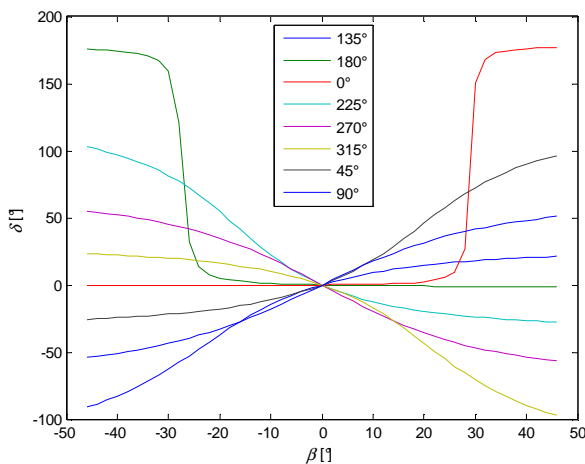
Každé další měřené hodnoty jsou upraveny podle vzorců (3).

$$\begin{aligned} H'_{ex} &= H_{ex} \cdot X_{sf} - X_{off} \\ H'_{ey} &= H_{ey} \cdot Y_{sf} - Y_{off} \end{aligned} \quad (3)$$

### 2.2.3. VLIV NÁKLONU

Vliv náklonu na měřený azimut je zřejmý z 3D reprezentace vektoru magnetického pole (Obr. 1). Při nulovém náklonu v obou horizontálních osách měří zařízení skutečné složky magnetického pole  $H_{ex}$  a  $H_{ey}$ . Je-li však zařízení nakloněno v některé z horizontálních os (nebo obou), měřené složky  $H_{ex}$  a  $H_{ey}$  nejsou již původní složky vektoru magnetického pole, ale jsou náklonem ovlivněny. Proto je nutné náklon měřit a chybu kompenzovat. Na Obr. 3 je příklad závislosti chyby měřeného azimutu na náklonu podél osy X použitého magnetometru.

Z grafu je patrná silná závislost chyby azimutu na náklonu. Chyba dosahuje při maximálním nastaveném náklonu i 180°. Zjevná je také závislost chyby azimutu při náklonu na nastaveném azimutu. Například při nastaveném azimutu na 0° (sever) v celém rozsahu téměř nulová, až do zhruba 25° náklonu. Poté chyba strmě, téměř skokově, roste na chybu 180°. Vektor magnetického pole směřuje na sever, chyba při nastaveném azimutu na sever by měla být nulová v celém rozsahu náklonu podél X, protože X-ová složka magnetického pole měřená modulem bude vždy nulová, a tedy i azimut je stále 0°. Azimut by se změnil pouze ve chvíli, kdy bude modul přetočen o více jak 90°. V tom případě je již modul nastaven nikoli na sever, ale na jih (180°). To, že k přetočení na jih nedojde při 90° náklonu, ale již při 25°, je způsobeno tím, že vektor magnetického pole nesměruje na sever rovnoběžně se Zemí, ale v oblasti měření (ČR) klesá k Zemi pod úhlem asi -65° (inklinace). Ostatní křivky chyby azimutu představují přechody mezi extrémny – sever (0°) a jih (180°).



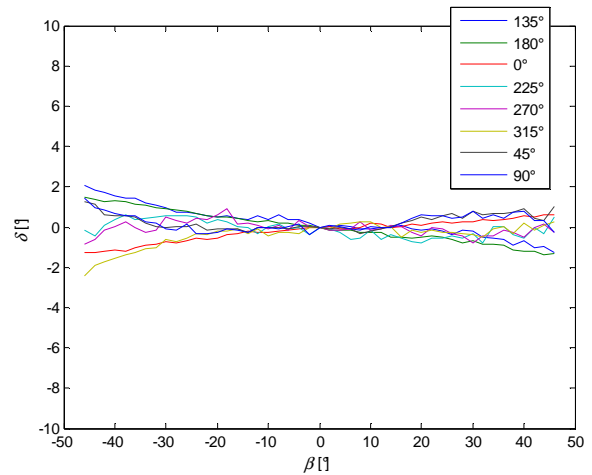
Obr. 3: Chyba magnetometru při náklonu podél X

Je-li však znám úhel vychýlení, je možné matematicky dopočítat průmět vektoru magnetického pole v nevychýleném stavu a poté i správnou hodnotu azimutu. Vychýlení z vodorovné polohy je možné v ose X a Y. Pak kompenzace spočívá v převedení potočených naměřených složek magnetického pole zpět do vodorovné roviny. K tomuto účelu dobře poslouží rotační matice [4].  $R_{01X}$  slouží pro transformaci při otočení kolem osy X a  $R_{01Y}$  pro otočení kolem osy Y. Rotaci kolem obou os současně řeší maticový součin  $R_{01X}$  a  $R_{01Y}$ . Výsledný přepočítání je pak podle rovnice (4).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} H_{ex0} \\ H_{ey0} \\ H_{ez0} \end{bmatrix} &= R_{01X} \times R_{01Y} \times \begin{bmatrix} H_{ex1} \\ H_{ey1} \\ H_{ez1} \end{bmatrix} = R_{01XY} \times \begin{bmatrix} H_{ex1} \\ H_{ey1} \\ H_{ez1} \end{bmatrix} \quad (4) \\ R_{01XY} &= \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ \sin \alpha \cdot \sin \beta & \cos \alpha & -\sin \alpha \cdot \cos \beta \\ -\cos \alpha \cdot \sin \beta & \sin \alpha & \cos \alpha \cdot \cos \beta \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Kde úhel  $\alpha$  je náklon kolem osy X a  $\beta$  kolem osy Y.

Na Obr. 4 je zobrazená stejná závislost jako na Obr. 3, tentokrát však s použitím kompenzace náklonu.



Obr. 4: Výsledek kompenzace náklonu magnetometru

Na rozsahu náklonů od -45° do 45° se chyba azimutu pohybuje v rozmezí od -2,7° do 2,7°. To je, oproti chybám bez kompenzace, značné zlepšení.

Z předešlého vypívá, že předpokládá-li se nenulový náklon modulu (což je v praxi téměř vždy) je třeba dalšího snímače pro měření náklonu v ose X a Y a následného kompenzačního algoritmu. Nejjednodušší možné řešení je použít k měření náklonu akcelerometr. Použití je rozebráno v následující kapitole.

## 3. AKCELEROMETRY

Akcelerometr je obecně zařízení měřící zrychlení ve své ose citlivosti. Pro účely měření náklonu je stěžejní schopnost akcelerometru měřit také gravitační zrychlení Země. To nabývá hodnot 0 až 1 g. Při nulové naměřené

hodnotě je měřící osa akcelerometru rovnoběžná se povrchem Země, při jednotkovém výstupu je měřící osa kolmá na Zemský povrch.

Při výstupu v rozsahu 0 až 1 g lze náklon zařízení vůči vodorovné ose (rovnoběžná s povrchem Země) vypočítat pomocí  $\arcsin(a)$ , kde  $a$  je měřené zrychlení. Nevýhodou tohoto postupu je nelineární funkce  $\sinus$ . Při náklonech blízcích se 90 ° je funkce  $\sinus$  již natolik plochá, že i šumová změna zrychlení vyvolá několikastupňovou změnu náklonu.

Lepší varianta výpočtu náklonu existuje, je-li k dispozici další akcelerometr s měřící osou kolmou na osu prvního snímače. V tomto případě je výpočet náklonu možný pomocí rovnic (5).

$$\arctan 2(y, x) = \begin{cases} \varphi \cdot \operatorname{sgn}(y) & x > 0 \\ \frac{\pi}{2} \cdot \operatorname{sgn}(y) & x = 0 \\ (\pi - \varphi) \cdot \operatorname{sgn}(y) & x < 0 \end{cases}$$

$$\arctan 2(0, x) = \begin{cases} 0 & x > 0 \\ \text{undef.} & x = 0 \\ \pi & x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

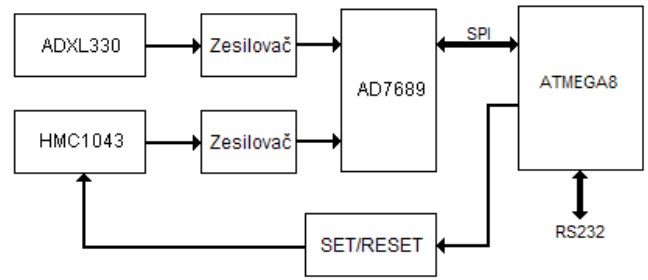
$$\varphi = a \tan\left(\frac{y}{x}\right) \quad \operatorname{sgn}(y) = \begin{cases} -1 & y < 0 \\ 0 & y = 0 \\ 1 & y > 0 \end{cases}$$

Kde  $x$  je zrychlení odpovídající náklonu a  $y$  je zrychlení v ose kolmé na osu náklonu.

Pro kompenzaci náklonu magnetometru je třeba dvou horizontálně umístěných ortogonálních os. Z požadavku funkce  $\arctan 2$  vyplývá potřeba ještě jedné osy umístěné vertikálně. Všechny tyto požadavky je možné splnit použitím tříosého akcelerometru např. ADXL330 [5] od firmy Analog Devices nebo MMA7260QT [6] od firmy Freescale. Oba disponují analogovým výstupem s dobrou citlivostí (300 mV/g v případě ADXL330 a 800 mV/g v případě MMA7260QT).

#### 4. HW ŘEŠENÍ

Oba použité snímače mají analogový výstup. Ten je třeba zesílit tak, aby jeho maximální rozsah odpovídal přibližně rozsahu napájecího napětí. Zesílený signál se převede na digitální v A/D převodníku a data se zpracují (včetně kompenzací) v mikroprocesoru. Výsledná data jsou přístupná přes sériové rozhraní RS232. Na Obr.5 je blokové schéma hardwarového zapojení modulu.

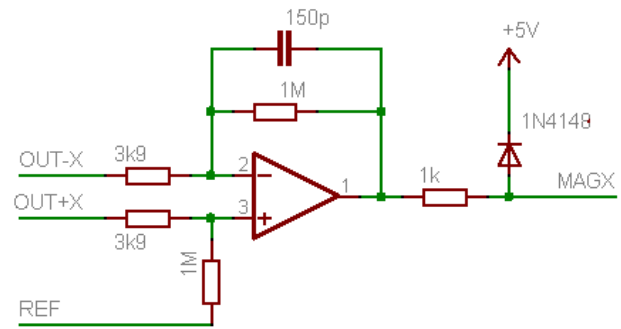


Obr. 5: Blokové schéma zapojení modulu

#### 4.1. ZESILOVAČE

Pro zesílení signálu ze snímačů se dobře hodí operační zesilovače. Nejlépe s nízkým výstupním šumem.

Výstup z magnetometru je ve formě rozdílu dvou napětí. Pro je vhodné použít operační zesilovač v diferenciálním zapojení.



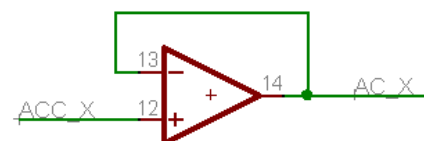
Obr. 6: Zesilovač pro magnetometr

Na Obr. 6 je takové zapojení pro osu X magnetometru. Na vstup REF je přivedeno referenční napětí 2,5 V. Výstupní napětí se počítá podle vzorce (6).

$$\frac{1M}{3k9} \cdot ([OUT + X] - [OUT - X]) + REF \quad (6)$$

Zesílení je nastaveno tak, aby při maximálním výstupu  $\pm 9,25$  mV (viz kapitola 2.2.1.) byl výstup pokud možno v celém rozsahu napájecího napětí (4,87 V  $\div$  0,13 V)

Výstup z akcelerometru je ve formě napětí vztahového k zemi. Nulová hodnota zrychlení je však v polovině výstupního rozsahu (u ADXL330 1,5 V). Je třeba poznamenat, že použitý akcelerometr vyžaduje napájecí napětí kolem 3 V. Zesílení u akcelerometru je možné použít, ale není to podmínkou. Citlivost u ADXL330 je 300 mV/g což je dostatečné pro 16-ti bitový A/D převodník (viz. dále). Stačí tedy zařadit sledovač napětí podle Obr. 7.

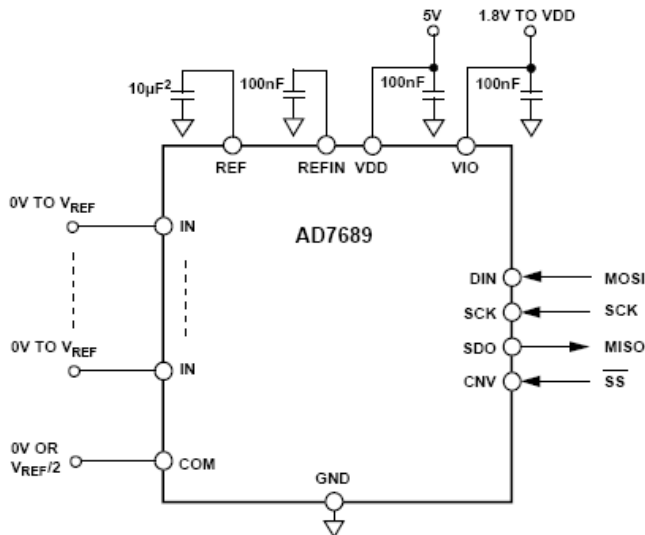


Obr. 7: Sledovač napětí

#### 4.2. A/D PŘEVODNÍK

Do digitální podoby je potřeba převádět šest signálů. Tři signály od magnetometru a tři od akcelerometru, vždy odpovídajícím třem ortogonálním osám.

Jako A/D převodník byl zvolen AD7689 [7] od firmy Analog Devices (pro danou situaci se hodí celá řada převodníků a není podmínkou volit právě tento). Na Obr. 8 je zobrazeno základní zapojení A/D převodníku. Výstup je přes rozhraní SPI.



Obr. 8: Základní zapojení A/D převodníku [7]

#### 4.3. MIKROPROCESOR

Pro zpracování dat z A/D převodníku lze použít libovolný mikroprocesor. Zde je zvolen ATMEGA8 [8] firmy Atmel. Jedná se o 8-bitový mikroprocesor s HW podporou protokolu SPI a RS232.

Přes rozhraní SPI jsou cyklicky načítána data z A/D převodníku. Ty jsou přepočtena na fyzikální jednotky. Následují, dříve popsané, kompenzační postupy a uložení výsledků.

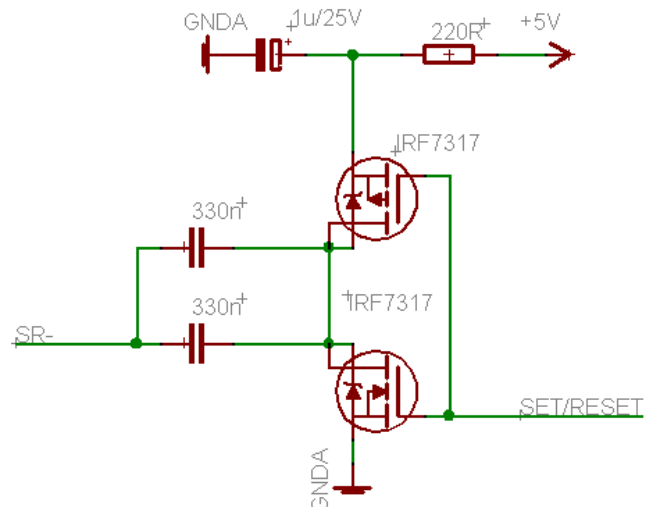
Naměřený azimut je dostupný přes rozhraní RS232. V popsaném zařízení je vyslán v textové podobě (s periodou 0,1s) podle následujícího vzoru (azimut 153,5°) :

153,5<CR><LF>

#### 4.4. SET/RESET

Pro kompenzaci popsanou v kapitole 2 je modul vybaven zapojením pro generování SET a RESET pulsů [9]. Podle výrobce by proudový puls měl trvat asi 2  $\mu$ s a jeho velikost by neměla přesáhnout 8 A. Při napájecím napětí 5 V a odporu SET/RESET cívky v rozpětí 1,5 až 3  $\Omega$ , je maximální možný proud 3,3 A, což nepřesahuje maximální hodnotu danou výrobcem. Délku trvání pulsu lze nastavit jednoduše doplněním cívky o sériově zapojený kondenzátor, čímž vznikne derivační článek. Ten generuje napěťové pulsy o délce trvání  $\tau = R \cdot C$ . Pro odpor SET/RESET cívky v rozsahu 1,5 až 3  $\Omega$  a délce

trvání 2  $\mu$ s vychází kondenzátor o velikosti 660 nF (délka trvání pulsu 0,99 až 1,9  $\mu$ s). Na Obr. 9 je schéma navrženého obvodu.



Obr. 9: Obvod SET/RESET

Derivační článek tvoří odpor cívky a dva paralelně zapojené svitkové kondenzátory 330 nF. Kladný a záporný puls je generován dvěma MOSFETovými tranzistory. Je-li na báze tranzistorů přivedeno kladné napětí, otevře se horní tranzistor a je generován kladný puls, při záporném napětí na bázích je otevřen spodní tranzistor a polarita pulsu je záporná. Elektrolytický kondenzátor zabraňuje průchod proudových špiček do dalších částí zařízení.

#### 5. ZÁVĚR

V článku byla popsána základní konstrukce elektronického kompasu včetně kompenzací největších parazitních vlivů. Dosažitelná přesnost se pohybuje okolo  $\pm 3^\circ$  při náklonech do  $\pm 45^\circ$ .

Popsaná konstrukce je součástí většího zařízení, proto není k dispozici celé schéma zapojení. Článek však poskytuje dostatek informací, aby si případný zájemce elektronický kompas vytvořil

#### 6. ACKNOWLEDGEMENT

This work has been supported in part by Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic (Research Intent MSM0021630529 Intelligent systems in automation), Grant Agency of the Czech Republic (102/09/H081 SYNERGY - Mobile Sensoric Systems and Network) and by Brno University of Technology.

#### LITERATURA

- [1] STORK, Thomas. *Electronic Compass Design using KMZ51 nad KMZ52*. Philips Semiconductors [on-line]. Dostupné na: [http://www.nxp.com/acrobat\\_download/applications/notes/AN00022\\_COMPASS.pdf](http://www.nxp.com/acrobat_download/applications/notes/AN00022_COMPASS.pdf)

- [2] *Datasheet HMC1043*, Rev.C. Honeywell [on-line],  
Dostupné na:  
<<http://www.magneticsensors.com/datasheets/hmc1043.pdf>>
- [3] CARUSO, Michael J. *Applications of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems*. Honeywell [on-line].  
Dostupné na:  
<<http://www.magneticsensors.com/datasheets/sae.pdf>>
- [4] ŠOLC, František, ŽALUD, Luděk. *Robotika*.  
Elektronické skriptum FEKT VUT. Brno. 2002
- [5] *Datasheet ADXL330*, Rev.A. Analog Devices [on-line],  
Dostupné na:  
<[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADXL330.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL330.pdf)>
- [6] *Datasheet MMA7260QT*, Rev.5. Freescale [on-line],  
Dostupné na:  
<[http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data\\_sheet/MMA7260QT.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7260QT.pdf)>
- [7] *Datasheet AD7689*, Rev.A. Analog Devices [on-line],  
Dostupné na:  
<[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD7682\\_7689.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7682_7689.pdf)>
- [8] *Datasheet ATmega8*. Atmel [on-line]. Dostupné na:  
<[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2486.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2486.pdf)>
- [9] *Set/Reset Function for Magnetic Sensors*. Honeywell [on-line]. Dostupné na:  
<<http://www.magneticsensors.com/datasheets/an213.pdf>>