

**Abstrakt :**

Tenhle semestrální projekt je zaměřen na navigaci v letecké dopravě pomocí kompasů. Některé typy kompasů jsou zde uvedeny a je vysvětlena jejich funkce. Protože přístroje nejsou vždy přesné, musí se provádět jejich kompenzace. Automatická kompenzace se může provádět různými metodami, které jsou také v tomhle projektu uvedeny.

This bachelor's project is rating to navigation in air transport by means of compass. Some types of compass are described in this project with explanation of their function. Because apparatuses aren't always precision, compensation is necessary. Automatic compensation can be perform by various methods, which are described in this project too.

Klíčová slova (Key words):

elektrotechnika – letecká doprava – navigace – kompas – senzory – KMZ 51 – kompenzace

electrotechnic – air transport – navigation – compass – sensors – KMZ 51 – compensation

BLAHÁK, P. *Algoritmus automatické kompenzace leteckého elektronického magnetického kompasu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Viera Biolková.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Algoritmus automatické kompenzace leteckého elektronického magnetického kompasu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 6. června 2008

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu práce paní Ing. Vieře Biolkové za vstřícný přístup a pomoc při potížích s bakalářskou prací. Také děkuji konzultantovi panu Ing. Janu Čižmárovi, Csc za cenné rady, informace a metodické vedení, které mi poskytl v průběhu zpracování bakalářské práce. Děkuji také své sestře Veronice, která mi vydatně pomohla při překladu anglických textů.

V Brně dne 6. června 2008

.....  
podpis autora

## Obsah

1. Úvod.....	9
1.1 Cíle práce: .....	9
2. Zemský magnetismus.....	10
2.1 Magnetická deklinace.....	10
2.2 Magnetická inklinace .....	11
1. 3. Letecké magnetické kompasy .....	12
3.1 Gyromagnetické kompasy.....	12
3.2 Indukční magnetické kompasy.....	13
3.3 Letecký digitální magnetický kompas.....	16
4. Magnetorezistivní kompasy .....	16
4.1 Magnetorezistivní účinek .....	16
4.2 Návrh struktury magnetorezistivního kompasu .....	18
4.2.1 Senzory magnetického pole KMZ-51 .....	19
Tab. 4.1. Vlastnosti senzorů KMZ-51 .....	20
4.2.2 SCU – Signal Conditioning Unit.....	20
4.2.3 Akcelerometr .....	21
4.2.4 DDU – Direction determination unit.....	21
4.2.5 Display .....	27
5. Chyby magnetorezistivních kompasů .....	27
5.1 Chyba vzniklá nesprávným uložením .....	27
5.2 Chyba vznikající vlivem deviace .....	27
5.3 Celková chyba kompasu.....	28
6. Kompenzování kompasu .....	28
6.1 Metody řešení pro kompenzaci magnetorezistivního kompasu .....	31
6.2 Algoritmus kompenzace magnetorezistivního kompasu.....	32
7. Závěr .....	34
8. Seznam použité literatury.....	35
8.1 Knižní publikace .....	35
8.2 Internetové prameny.....	35
9. Seznam příloh.....	36
10. Seznam zkratk .....	36

# *1. Úvod*

V dnešní době, kdy létání je zcela běžnou rutinou, má navigace pomocí magnetických kompasů velký význam. Můžeme diskutovat nad tím, že družicová navigace GPS je nejpřesnější a na určování polohy nejjednodušší, ale družice vždy někomu patří a v době např. válečného konfliktu lze družice vypnout, což by jistě vedlo ke katastrofálním důsledkům. Proto magnetické kompasy nebo integrované magnetometry se stále v letecké dopravě používají, protože magnetické pole vypnout nelze.

Mým úkolem v bakalářské práci je prostudovat funkci leteckých magnetických kompasů a navrhnout magnetorezistivní kompas používající integrované magnetometry. U těchto přístrojů vznikají nepřesnosti (chyby), které mám popsat a prostudovat jejich metody kompenzace nebo navrhnout nové řešení a pomocí některého programu na PC korekci nasimulovat.

## *1.1 Cíle práce:*

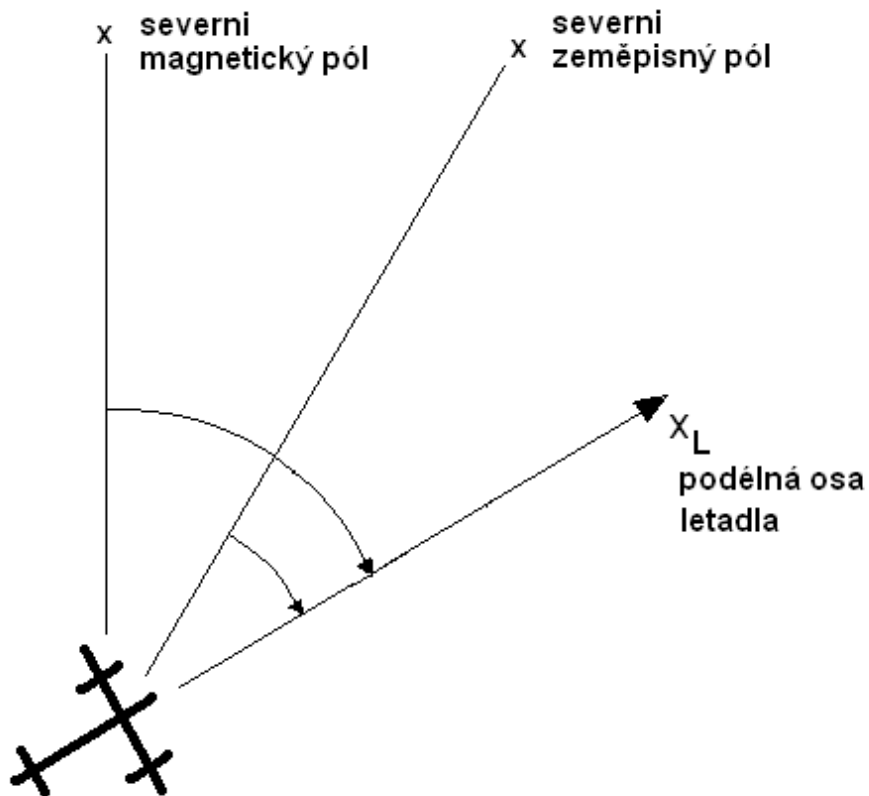
- 1) Zavést do problematiky zemský magnetismus.
- 2) Pomocí dokumentace o přístrojích a skript vydaných na UNOB podat celkový přehled o dostupných gyromagnetických a indukčních magnetických kompasech.
- 3) Navrhnout strukturu magnetorezistivního kompasu. Popsat jednotlivé bloky a vysvětlit jejich funkci.
- 4) Popsat vliv chyb vzniklých nepřesným uložením kompasu v pravoúhlém tříosém měřícím systému letadla a chybu vzniklou magnetickou deviací.
- 5) Provést rozbor známého řešení výše zmíněných chyb.
- 6) Návrh vlastního řešení a názorně ho předvést pomocí programu Microsoft Excel.

## 2. Zemský magnetismus

### 2.1 Magnetická deklinace

Magnetická navigace využívá přirozený zemský magnetismus, který se pokusím lehce přiblížit.

Zeměkoule má ve své okolí silné magnetické pole, protože v důsledku zemské rotace se indukuje v zemském kovovém žhavotekutém jádře (tvořené z prvků niklu a železa) velmi silný elektrický proud. Zemské magnetické pole země můžeme realizovat pomocí imaginárního permanentního tyčového magnetu globálních rozměrů, jehož podélná osa svírá úhel se zemskou rotační osou přibližně  $11,5^\circ$  (z roku 1994). Z toho je vidět, že magnetické póly Země nejsou shodné se zeměpisnými póly Země. Mezi zeměpisným a magnetickým pólem je rozdíl který nazýváme **magnetická deklinace** (viz. obr. 2.1).



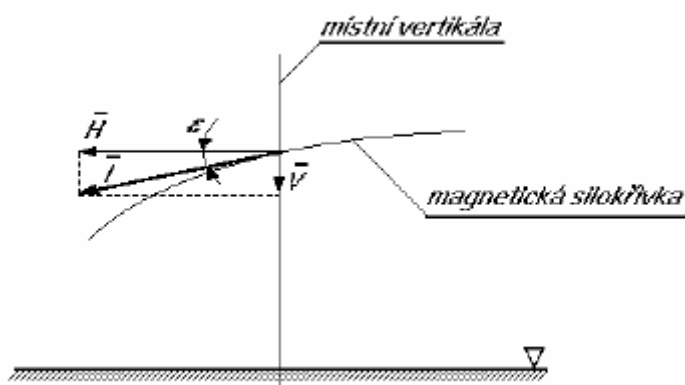
$$\Delta = \psi_m - \psi$$

Obr. 2.1: Magnetická deklinace (zdroj: [1] str.126)

Magnetická deklinace je závislá na místě měření, proto spolu s řadou dalších parametrů je pravidelně měřena, tabelována a výsledky jsou zpracovávány do standardního geomagnetického pole. Pokud tedy používáme magnetickou navigaci na určení kursu, je nutné znát přibližné souřadnice místa měření, v tabulkách potom nalézt příslušnou hodnotu deklinace.

## 2.2 Magnetická inklinace

Dále zavedu pojem *magnetická inklinace*. „Magnetická inklinace je úhel, který svírá místní vektor intenzity zemského magnetického pole s místní vodorovnou rovinou“ (viz. [1]).



Obr. 2. 2: Magnetická inklinace (zdroj: [1] str.128)

Ze siločivek je patrné, že inklinace bude v malých zeměpisných šířkách malá a naopak v okolí magnetických pólů extrémně velká. Rozložíme-li v místě měření vektor intenzity magnetického pole země  $\mathbf{I}$  do horizontální složky  $\mathbf{H}$  a vertikální  $\mathbf{V}$  pak pro inklinanční úhel  $\varepsilon$  můžeme napsat výraz:

$$\varepsilon = \arctan \frac{|\mathbf{V}|}{|\mathbf{H}|} \quad (\text{viz. [1]}) \quad (2.1)$$

Jestliže měříme magnetický kurs můžeme označit horizontální složku  $\mathbf{H}$  za užitečnou, protože ta má informační hodnotu. Složka vertikální  $\mathbf{V}$  informaci o kursu nenesou, takže se považuje jako složka rušivá.

„Poblíž magnetických pólů (ve velkých zeměpisných šířkách), je inklinace tak velká (složka  $\mathbf{H}$  vektoru intenzity geomagnetického pole je minimální a deklinace se za letu rychle mění v závislosti na rychlých změnách místa měření), že prakticky znemožňuje leteckou magnetickou navigaci používat“ (viz. [1]).

Na území České republiky má inklinace hodnotu přibližně  $63^\circ$ .



**Směrový gyroskop** je přístroj určený k měření **kursu  $\Psi$** , což je úhel, který v daném místě svírá průmět podélné osy letadla do vodorovné roviny místního poledníku. Další veličinou, kterou gyroskop vykazuje je **azimut  $\Psi_a$** , což je úhel, který v daném místě svírá průmět vektoru rychlosti translačního pohybu letadla do vodorovné roviny s místním poledníkem.

Další částí je ukazatel typu UGR-4U, do kterého je veden signál ze statorového vinutí selsynu vysílače snímajícího pohyb vnějšího Cardanova rámu. Ukazatel je tvořený selsynem přijímačem, zesilovačem, servomotorem a kursovou stupnicí. Ukazatel je sledovací servo-mechanismus, který přichází signál zesílí a přes servomotor, který pohání rotor selsynu ukazatele, indikuje měřený kurs oproti pevné trojúhelníkové značce umístěné nahoře v ukazovací části přístroje.

Součástí tohoto přístroje je také magnetický kompas, který je tvořený vysílačem magnetického kursu ID-6 a korekčním mechanismem KM-8. **ID-6** tvoří tři magnetometrické sondy umístěné na základně, která je pomocí Cardanova závěsu zavěšena nad těžištěm kvůli stabilizaci do horizontální roviny. Základna je tlumena tak, že pouzdro indukčního vysílače je naplněno kapalinou.

Další součástí gyromagnetického kompasu je pult řízení **PU-26E**, který je využíván v režimu „gyroskopického polokompasu“. Tento režim činnosti se používá při letech v oblastech s velkými hodnotami zeměpisné šířky. V důsledku inklinace je horizontální složka vektoru intenzity geomagnetického pole minimální, magnetická navigace v těchto místech nepoužitelná a tedy magnetický kompas v přístroji GMK-1 je odpojen. V tomhle režimu lze také manuálně nastavovat kurs podrežimem „zadávání kursu“ pomocí přepínače, kdy je přiváděno napětí na elektromotor v gyroagregátu GA-6, který pak rychle otáčí stator selsynu vysílače. Tak lze rychle nastavit indikační stupnici kursu do libovolného směru.

Doplňkovým zařízením GMK-1 je také vypínač korekce VK-53, který slouží k vypínání magnetické a horizontální korekce při zatáčení letadla, kdy jsou korekční signály nesprávné.

Režimy činnosti GMK-1:

- 1) spouštění,
- 2) magnetická korekce - MK,
- 3) gyroskopický polokompas – GPK (zadávání kursu)

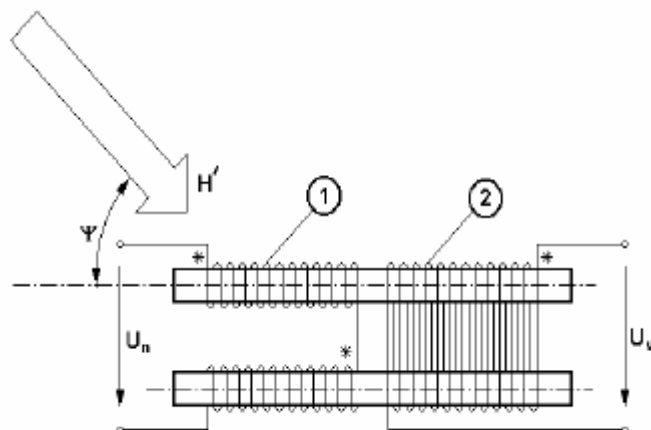
### **3.2 Indukční magnetické kompas**

Protože kompas s otočným magnetickým systémem a jejich chyby nebyly dostatečné pro modernější létání, tak byly v polovině minulého století zkonstruovány tzv. indukční kompas.

Indukční kompas se vyrábějí dnes jako dálkové nebo ve spojení se směrovými gyroskopy jako gyroindukční kompas, nebo jako součást kursových systémů.

Indukční kompas se skládá z několika hlavních částí:

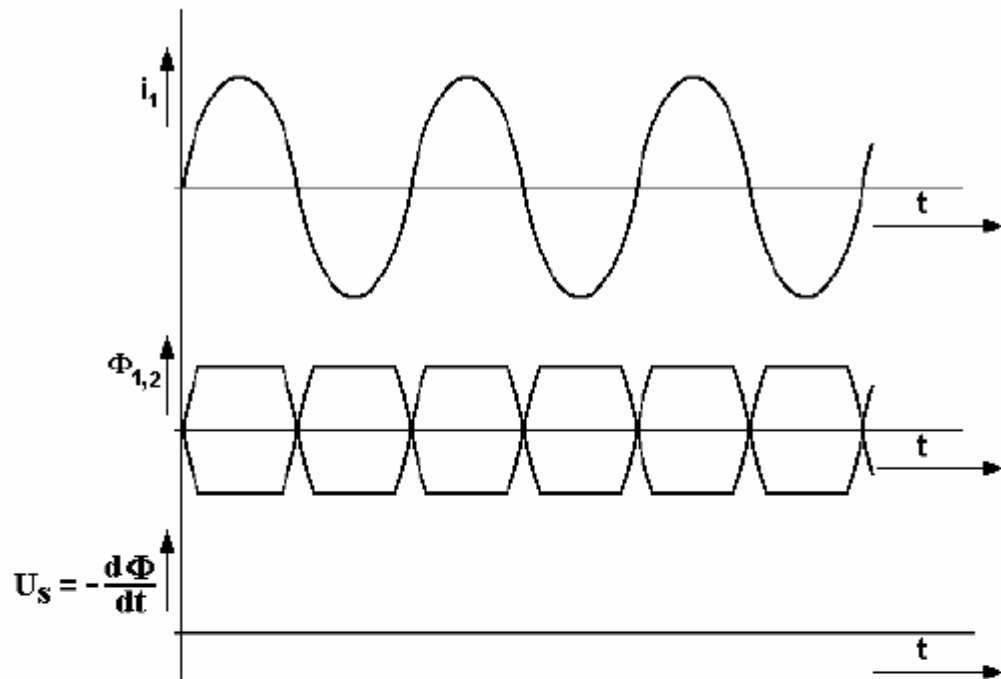
- magnetometr (indukční sonda), což je magneticky měkký materiál např. permalloy
- elektronické (analogové nebo digitální) obvody pro zpracování signálů
- napájení



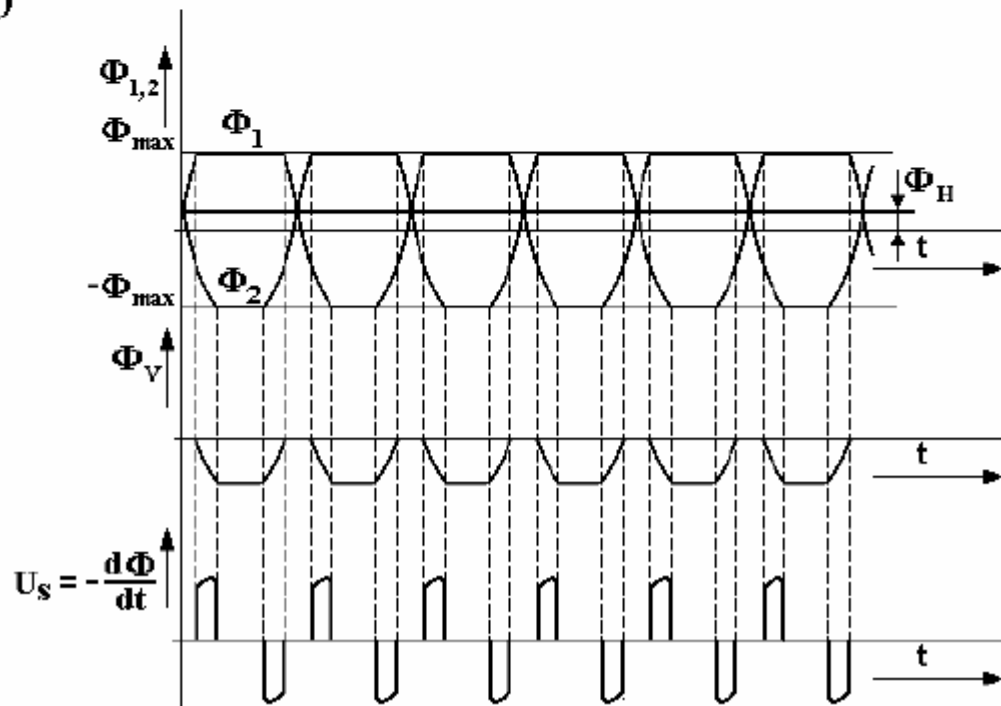
**Obr. 3.2: Indukční magnetometr** (zdroj: [1] str.138)

“Magnetometr je tvořen dvěma stejnými, např. permalloyovými tyčinkami, představující jádra cívek, které jsou mechanicky spojena tak, aby jejich podélné osy byly rovnoběžné. Na jádrech jsou navinuta dvě vinutí - budící a snímací. Stejně budící vinutí je zvlášť navinuto na obou jádrech. Aby jimi protékající elektrický proud budil v jádrech magnetické toky s opačnou polaritou jsou tato vinutí navinuta do série. Společně na obě jádra je pak navinuto vinutí snímací, z něhož pak odebíráme měronosný signál. Napájecí napětí, které je odebíráno přes transformátor z palubní sítě (3x36 V/400 Hz či 1x115 V/400 Hz) je přivedeno na budící vinutí tak, aby střídavý proud, který vinutím protéká, způsobil, že jádra jsou magneticky přesycena. U leteckých analogových aplikací bývá napětí na cívkách budícího vinutí  $U_B = (1,5 \text{ až } 2,5) \text{ V/400 Hz}$ . Obě jádra i vinutí jsou stejná, proto magnetické toky  $\Phi_1$  a  $\Phi_2$  mají stejnou velikost, ale opačnou orientaci –  $U_S = 0$ . Pokud nepůsobí žádné vnější magnetické pole, neindikuje se ve snímacím vinutí žádné napětí. Jestliže ale působí v ose magnetometru složka vektoru intenzity statického vnějšího magnetického pole (např. geomagnetického pole) vybudí se v jádrech stejný magnetický tok  $\Phi_H$ . Tento magnetický tok se v jádrech sčítá s toky  $\Phi_1$  a  $\Phi_2$  vybuděnými budícím proudem  $i_1$ . Oba magnetické toky se tedy posunou o hodnotu  $\Phi_H$  vzhledem k mezím nasycení. Z obrázku 3.3 b) vidíme, že v první půlvlně budícího proudu se v jednom jádře tok  $\Phi_1$  sčítá s tokem  $\Phi_H$ , zatímco ve druhém se tok  $\Phi_2$  od toku  $\Phi_H$  odečítá. V následující půlvlně je situace opačná. Výsledný magnetický tok  $\Phi_V$  je tedy součtem výsledných magnetických toků obou jader. Záporná časová změna tohoto součtového magnetického toku způsobí ve snímacím vinutí vznik indukovaného napětí  $U_S$ . Toto napětí má impulsní charakter a jeho efektivní hodnota závisí na velikosti magnetického toku  $\Phi_H$  vybuděného složkou vektoru intenzity vnějšího statického magnetického pole působící v ose magnetometru“ (viz [1]).

a)



b)

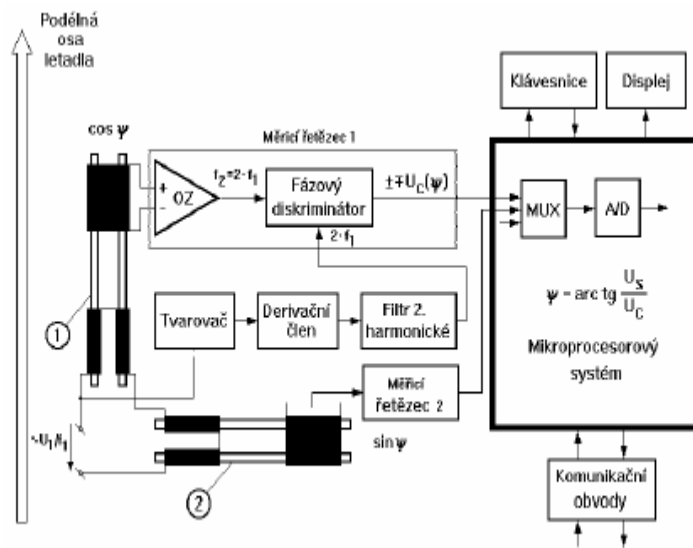


Obr.3.3: Časové průběhy veličin v indukčním magnetometru (zdroj: [1] str.138)

### 3.3 Letecký digitální magnetický kompas

Rychlý rozvoj mikroelektroniky, výpočetní a měřicí techniky způsobil, že se s leteckými digitálními magnetickými kompasy setkáváme již zcela běžně.

„U těchto kompasů pro měření kursu postačí dvě sondy jejichž citlivé osy leží v horizontální rovině a jsou navzájem kolmé. Pokud ztotožníme osy magnetometrických sond s podélnou a příčnou osou letadla, pak sondy měří kosinovou a sinovou složku vektoru intenzity geomagnetického pole, jejichž hodnoty jsou závislé na kursovém úhlu“ (viz. [1]).



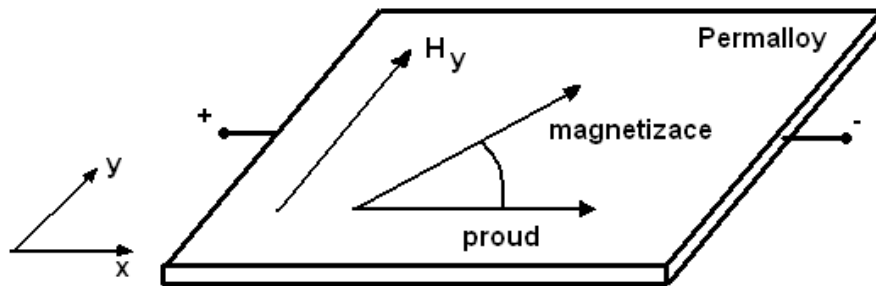
Obr. 3.4: Blokové schéma digitálního indukčního kompasu (zdroj: [1] str.144)

## 4. Magnetorezistivní kompas

Nejnovější magnetometry, které se objevily v poslední době jsou miniaturní magnetometry vyráběné v podobě integrovaných obvodů, které využívají magnetorezistence. Tyto magnetometry vyrábí např. firma Philips (KMZ-51 a KMZ-52).

### 4.1 Magnetorezistivní účinek

MR senzory využívají magnetorezistivního účinku. Proud umožňuje magnetickému materiálu měnit svou rezistivitu v přítomnosti vnějšího magnetického pole. Obrázek (obr 4.1) znázorňuje proužek feromagnetického materiálu, nazývaného permalloy (19% Fe, 81% Ni).



**Obr. 4.1: Proužek feromagnetického materiálu (permalloy)**

Během vložení proužku, je silné magnetické pole aplikováno rovnoběžně k ose proužku. Při tomto konání preferovaný směr magnetizace je definován v souladu s proužkem. V nepřítomnosti jakéhokoliv vnějšího magnetického pole magnetizace vždy ukáže tímto směrem. Na obr.4.1 tedy přijmeme směr  $x$ , který je také směrem tekoucího proudu. MR senzory se nyní střídají na dvou základních účincích:

- odpor proužku  $R$  závisí na úhlu  $\alpha$  mezi směrem proudu a směrem magnetizace.
- směr magnetizace a tedy i úhel  $\alpha$  může být ovlivněn vnějším magnetickým polem  $H_y$ , když  $H_y$  je rovnoběžné s povrchem proužku a kolmé k preferovanému směru.

Když není přítomné žádné vnější magnetické pole, permalloy má vnitřní vektor (průvodič) magnetizace rovnoběžný s preferovaným směrem. V tomto případě proužek má maximální odpor:

$$\alpha = 0^\circ \Rightarrow R_{max} .$$

Jestliže nyní vložíme vnější magnetické pole  $H_y$ , vnitřní vektor magnetizace permalloye se bude otáčet kolem úhlu  $\alpha$ . V silových polích magnetizace má sklon srovnat se rovnoběžně s  $H_y$  a otočit úhel  $\alpha$  přibližně o  $90^\circ$ . V tomto případě odpor dosáhne své minimální hodnoty:

$$\alpha = 90^\circ \Rightarrow R_{min} .$$

Následující rovnice ukazuje funkční závislost mezi odporem  $R$  a úhlem  $\alpha$ , tedy:

$$R = R_0 + \Delta R \cdot \cos^2 \alpha \quad (\text{viz. [4]}) \quad (4.1)$$

, kde  $R_0 = R_{min}$  a  $\Delta R = (R_{max} - R_{min})$ .

Nakonec závislost mezi odporem  $R$  a magnetickým polem  $H_y$  nám ukazuje rovnice 4.2:

$$R = R_0 + \Delta R * \left[ 1 - \left( \frac{H_y}{H_0} \right)^2 \right] \quad (\text{viz. [4]}) \quad (4.2)$$

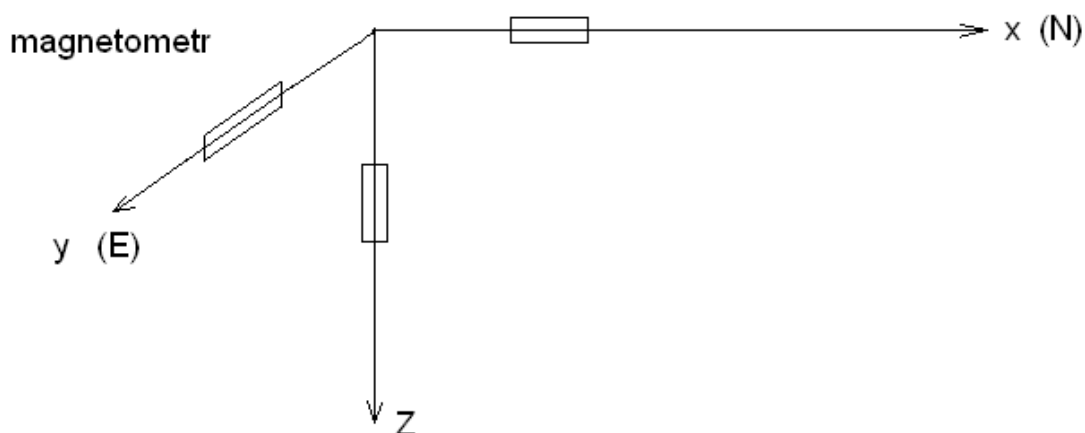
, kde  $H_0$  je parametr, který závisí na materiálu a geometrii proužku.

## 4.2 Návrh struktury magnetorezistivního kompasu

Při návrhu magnetorezistivního kompasu jsem postupoval následovně:

1. Jako první část do schématu zapojíme senzory magnetického pole. Nejlépe našemu návrhu budou vyhovovat senzory vyráběné od firmy Philips KMZ – 51. Senzory musíme umístit co nejpřesněji do všech tří os letadla. Nepřesným uložením vzniká chyba popsaná v kapitole 5. Takže s těchto tří senzorů, dostáváme tři údaje o magnetickém poli země, které předáme další jednotce.
2. Úkolem dalšího bloku ve schématu je zpracovat signál přijatý z magnetometrů. Název této jednotky jsem převzal z obecného schématu kompasů v literatuře [4]. Název je SCU (signal conditioning unit), v doslovném překladu SCU znamená „jednotka upravující signál“.
3. Další jednotka v pořadí přijímá zpracovaný signál nejen z předchozí jednotky, ale také z akcelerometrů. Název jednotky, který jsem opět převzal z obecného schématu kompasu, je DDU (Direction determination unit) v překladu „jednotka stanovení směru“. Jak z názvu vyplývá v této jednotce dochází ke všem výpočtům nutných k stanovení azimutu. Tyto výpočty si odvodíme níže, když se této jednotce budeme podrobněji věnovat.
4. Musíme také zapojit výše zmíněné akcelerometry, které nám slouží k zjištění úhlů při rotacích letadla kolem svých os. Tyhle úhly jsou důležité při výpočtech azimutu.
5. Jako poslední zapojíme display, na kterém budeme vypočtený azimut počítat.

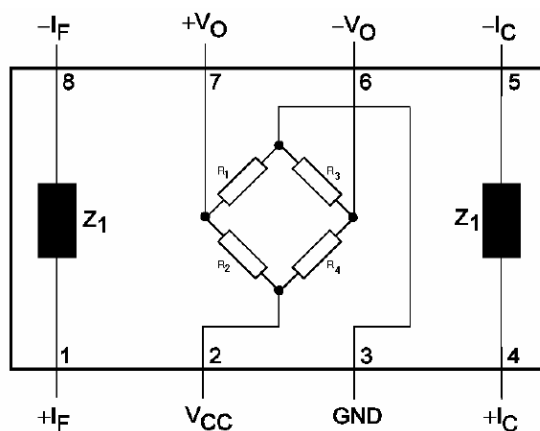
### 4.2.1 Senzory magnetického pole KMZ-51



**Obr. 4.2: Umístění magnetometrů v souřadnicových osách letadla**

KMZ-51 je velmi citlivý magnetometr, založený na magnetorezistivním jevu v tenké vrstvě magnetického materiálu (permalloy). V pouzdře senzoru je umístěn magnetorezistivní Wheatsonův můstek a také kompenzační a nastavovací (set/reset) cívky. Kompenzační cívky umožňují měření magnetického pole v proudové smyčce, u níž se neprojevuje drift citlivosti. 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 resetovací pulsy nastaví senzor na citlivost s opačným znaménkem. Použitím pravidelně se střídajících pulsů a synchronního zesilovače (lock-in amplifier) dosáhneme nezávislosti na vyvážení senzoru a zesilovače. Integrace všech potřebných cívek nutných pro použití v elektronickém kompasu není zcela běžné řešení u magnetometrů a je velkým plusem těchto senzorů.

Vlastnosti senzoru vidíme v tabulce 4.1..



**Obr. 4.3: Principiální schéma integrovaného obvodu KMZ-51 firmy Philips**  
(zdroj: [1] str.146)

**Tab. 4.1. Vlastnosti senzorů KMZ-51**

senzor KMZ 51		jednotky
počet dimenzionálních senzorů	1-dim.	-
pouzdro	SO-8	-
doporučené napájecí napětí V <sub>cc</sub>	5	V
typická citlivost	16	(mV*V)/(kA/m)
offset	-1,5...1,5	mV/V
použitelný rozsah	-0,2...0,2	kA/m
integrované set/reset cívký	ano	-
integrované kompenzační cívký	ano	-

#### 4.2.2 SCU – Signal Conditioning Unit

Jednotku zapojíme jako tři samostatné kanály. Jejich hlavním úkolem je zesílit signály přicházející ze senzorů magnetického pole. Tohle zesílení je velmi důležité, protože uvážíme-li minimum silového pole země na senzoru přibližně 15A/m a citlivost senzoru 80mV/(kA/m) (jestliže je napájecí napětí V<sub>CC</sub> = 5V, tak magnetorezistivní sensor bude předávat amplitudu přibližně 1,2 mV, když rotuje v tomto poli. Proto je tedy zesílení velmi potřebné, aby zajistilo přiměřené elektrické napětí pro následující stanovení azimutu.

V závislosti na požadované přesnosti systému musí SCU vyplnit ještě další požadavky:

1. Vyrovnání elektrického napětí  $u_{ox}$ ,  $u_{oy}$  a  $u_{oz}$ 
  - jednotka musí vyrovnat odchylky způsobené rychlostí proudění teploty na čtyřech magnetorezistivních částech, které jsou uspořádány jako Wheaststoneův můstek. Tzn. že pokud není vloženo žádné magnetické pole, tak senzory už nějaké napětí vykazují i když by neměly. Takže proto jsou v senzorech zapojeny vyrovnávací a nulovací cívký. Pokud je nějaká odchylka zjištěna, tak cívkou způsobíme vznik stejného pole s opačným znaménkem a uvedeme sensor do výchozího stavu.
2. Vyrovnání citlivosti jednotlivých kanálů ( $\Delta S$ )
  - během otáčení kompasu dochází k výkyvům výstupních napětí jednotlivých kanálů. Tyhle výkyvy napětí můžeme seřadit rozdílným zesílením kanálů tak aby poměry výstupních napětí se rovnali poměru citlivostí, tedy např.:

$$\frac{u_y}{u_x} = \frac{S_y}{S_x}, kde$$

$$\frac{S_y}{S_x} = \frac{(S + \Delta S)}{S}. (viz [4]) \quad (4.3)$$

Takže např.  $u_y$  můžeme upravit následovně:

$$u_{y,opravené} = u_{y,měřené} \cdot \frac{u_x}{u_y}. (viz[4]) \quad (4.4)$$

### 4.2.3 Akcelerometr

Akcelerometr je senzor sloužící k měření (pohybového) zrychlení. Měření bývá založeno na principu úměrnosti zrychlení a setrvačných sil. V blokovém schématu v PŘÍLOZE 1 jsou zapojeny akcelerometry dva pro měření dvou horizontálních, navzájem kolmých složek zrychlení, protože pro výpočet azimutu je třetí (neměřená) složka neúčinná.

### 4.2.4 DDU – Direction determination unit

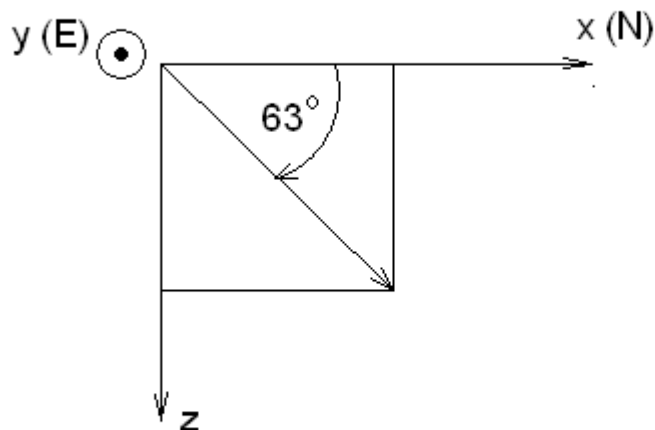
Tahle jednotka je pro náš kompas nejdůležitější, neboť v ní se provádí všechny výpočty ze kterých nám vzejdou hodnoty pro nás důležité. Součástí této jednotky jsou A/D převodníky, protože analogový signál přivedený s jednotky SCU musí být převeden na číslicový, aby mikrokontroler, který také tato jednotka obsahuje, mohl provádět potřebné operace. Takže pomocí mikrokontroleru provedeme výpočet azimutu. Teď si tedy odvodíme postup výpočtu azimutu.

Nejprve potřebujeme znát vektor intenzity magnetického pole v zemské souřadnicové soustavě (ZSS) a vektor intenzity magnetického pole země ve vodorovné rovině.

Vektor intenzity magnetického pole v ZSS můžeme vyjádřit:

$$I_{ZSS} = (I \cdot \cos 63^\circ, 0, I \cdot \sin 63^\circ), \quad (4.3)$$

kde úhel  $63^\circ$  je hodnota magnetické inklinace. Na obr.4.4 vidíme, jak lze tento vektor odvodit.



Obr.4.4: Vektor magnetické intenzity v ZSS

Odvození vektoru intenzity magnetického pole ve vodorovné rovině je o něco složitější, protože musíme počítat s magnetickou inklinací. Na obr.4.5 vidíme souřadnicovou soustavu z pohledu shora, kde  $x_L$  a  $y_L$  jsou osy letadla a  $x, y$  jsou zeměpisné zemské osy. Úhel  $\psi$  je ten úhel, který potřebujeme zjistit, tedy azimut.

Vektor intenzity mag.pole ve vodorovné rovině můžeme vyjádřit jako:

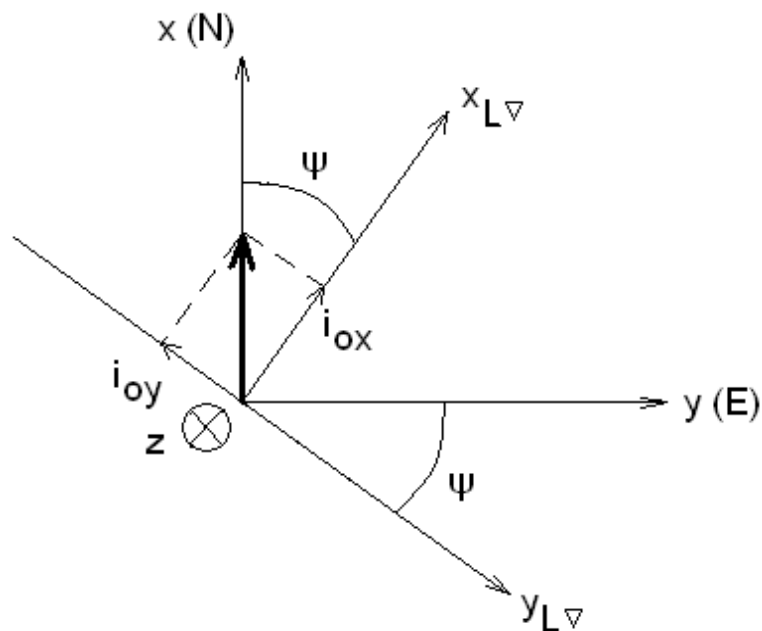
$$I_{\nabla} = (i_{0x}, i_{0y}, i_{0z}) \quad (4.4)$$

$$I_{\nabla} = (I \cdot \cos 63^\circ \cdot \sin \psi, I \cdot \cos 63^\circ \cdot \cos \psi, I \cdot \sin 63^\circ) \quad (4.5)$$

Pouze první dvě složky vektoru jsou důležité pro výpočet azimutu, takže píšeme:

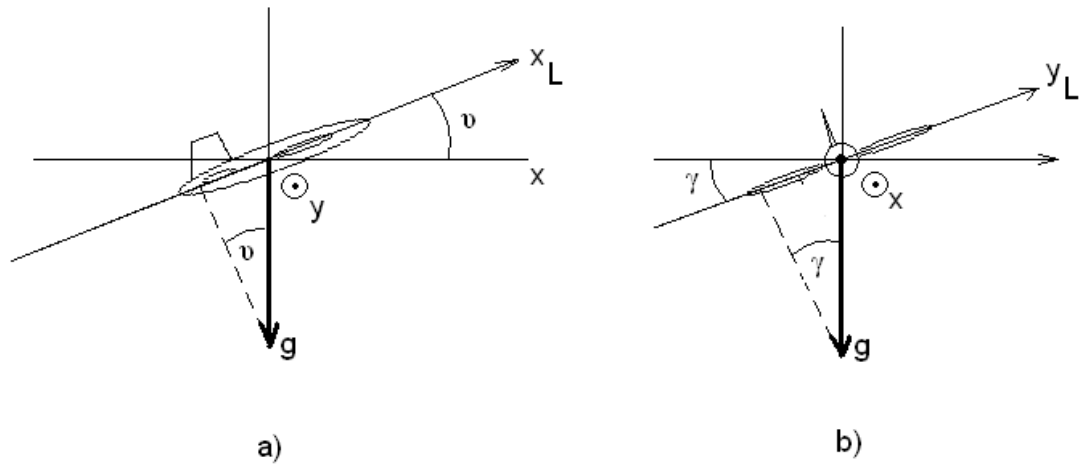
$$\operatorname{tg} \psi = \frac{i_{0x}}{i_{0y}} \quad (4.6)$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{i_{0x}}{i_{0y}} \quad (4.7)$$



**Obr.4.5: Vektor magnetické intenzity ve vodorovné rovině**

Podle tohoto postupu, který je naznačen výše, lze počítat azimut jedině v případě, když letadlo letí přesně vodorovně s povrchem Země. Takže pokud by letadlo stoupalo nebo by bylo v jakékoli zatáčce, měření by bylo nepřesné. Proto jsou v navrhovaném schématu zapojeny akcelerometry, které dodávají jednotce DDU informace o zrychlení, a pomocí nich odvodíme úhly, které vznikají rotacemi okolo os letadla. Na obr.4.6 jsou znázorněny dvě rotace, kolem osy  $x$  a osy  $y$ , které jsou pro naše měření důležité.



**Obr.4.6: Důležité rotace letadla**

Pokud nastane rotace podle obr. 4.6 a), můžeme zrychlení zapsat jako rovnici

$$a_x = -g \cdot \sin \vartheta \quad (4.8)$$

a můžeme odvodit, že

$$\vartheta = -\arcsin \frac{a_x}{g} \quad (4.9)$$

Pokud letadlo rotuje podle obr.4.6 b), tak zrychlení zapisujeme jako

$$a_y = -g \cdot \operatorname{tg} \gamma \quad (4.10)$$

a odvozujeme,

$$\gamma = -\operatorname{arctg} \frac{a_y}{g} \quad (4.11)$$

Pro úplnost můžeme odvodit celkový vztah pro obě rotace, můžeme psát např. pro zrychlení  $a_y$  :

$$a_y = g \cdot \sin \gamma \cdot \cos \vartheta \quad (4.12)$$

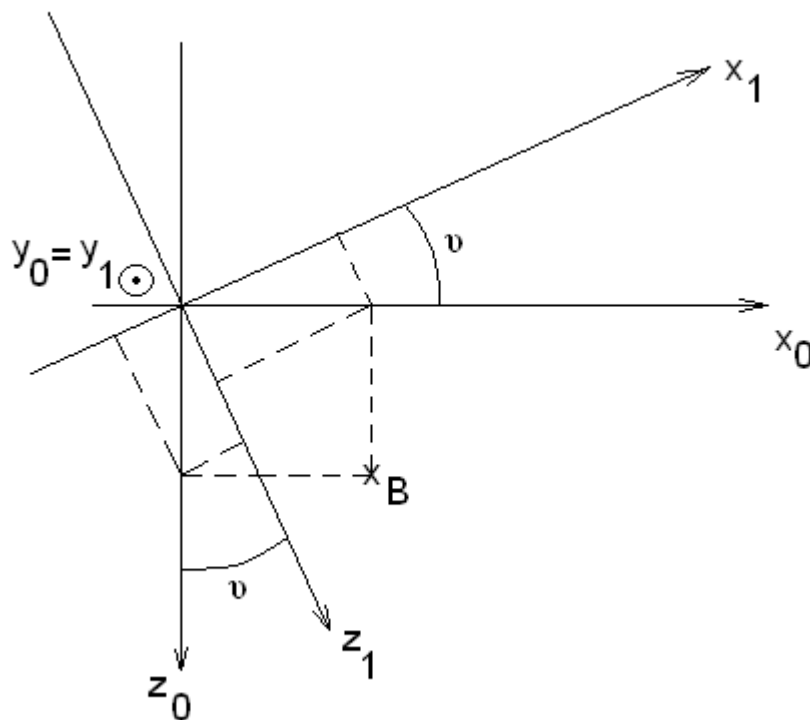
a odvodíme,

$$\begin{aligned} \gamma &= \arcsin \frac{a_y}{g \cdot \cos \vartheta} = \\ &= \arcsin \frac{a_y}{g \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \vartheta}} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \arcsin \frac{a_y}{g \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{a_x}{g}\right)^2}} = \\
 &= \arcsin \frac{a_y}{\sqrt{g^2 - a_x^2}} \quad (4.13)
 \end{aligned}$$

Jestliže máme úhly odvozeny, můžeme pokračovat ve výpočtu podle tzv. **Eulerovy metody**. „Tahle metoda je založená na tom, že pokud máme dvě souřadnicové soustavy, z nichž jedna je pevná a druhá je pohyblivá, pak lze každé vzájemné úhlové natočení chápat jako dvě postupná natočení kolem os pevné souřadnicové soustavy“ (viz [1]). V našem případě tedy za malý časový interval došlo k natočení pohyblivé souřadnicové soustavy kolem osy  $y$  o úhel  $\nu$  a v následujícím časovém intervalu došlo k pootočení kolem osy  $x$  o úhel  $\gamma$ .

Ted' se budeme věnovat opět první rotaci, tedy rotaci kolem osy  $y$  viz. obr.4.7.



**Obr. 4.7: Rotace pohyblivé souřadnicové soustavy kolem osy  $y_0$  vzhledem k pevné souřadnicové soustavě**

Souřadnice bodu B můžeme po první rotaci zapsat jako:

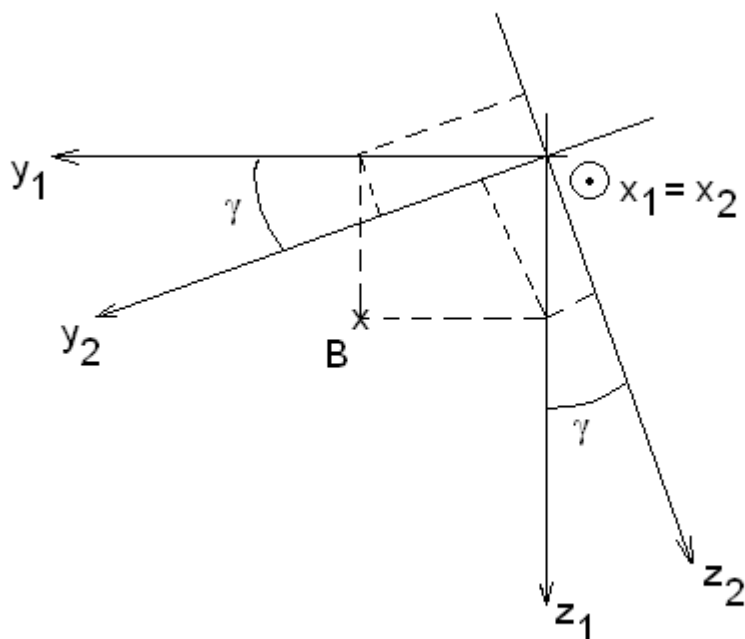
$$\begin{aligned}x_1 &= x_0 \cdot \cos\vartheta - z_0 \cdot \sin\vartheta \\z_1 &= x_0 \cdot \sin\vartheta + z_0 \cdot \cos\vartheta\end{aligned}\quad (4.14)$$

nebo maticovým zápisem:

$$b_1 = A^\vartheta \cdot b_0, \text{ tedy:}$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta & 0 & -\sin\vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\vartheta & 0 & \cos\vartheta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}.$$
 (4.15)

Podobně popíšeme druhé elementární otočení vůči pevné souřadnicové soustavě, které nastalo kolem osy  $x_1$  o úhel  $\gamma$  viz. obr.4.8.



**Obr. 4.8: Rotace pohyblivé souřadnicové soustavy kolem osy  $\underline{x}_1$  vzhledem k pevné souřadnicové soustavě**

Souřadnice bodu B můžeme zapsat jako:

$$\begin{aligned} y_2 &= y_1 \cdot \cos\gamma + z_1 \cdot \sin\gamma \\ z_2 &= -y_1 \cdot \sin\gamma + z_1 \cdot \cos\gamma \end{aligned} \quad (4.16)$$

nebo maticovým zápisem:

$$b_2 = A^\gamma \cdot b_1, \text{ tedy:}$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}. \quad (4.17)$$

Pro celkovou rotaci můžeme napsat vztah:

$$b_2 = A^\gamma \cdot b_1 = A^\gamma \cdot A^\vartheta \cdot b_0 = A \cdot b_0,$$

kde matice  $A = A^\gamma \cdot A^\vartheta$  je maticí transformace souřadnic vektoru z nepohyblivé do pohyblivé souřadnicové soustavy, což můžeme aplikovat jako transformaci azimutu ze zemské do letadlové souřadnicové soustavy. Matici postupně vypočteme takto:

$$\begin{aligned} A^\gamma \cdot A^\vartheta &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\vartheta & 0 & -\sin\vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\vartheta & 0 & \cos\vartheta \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos\vartheta & 0 & -\sin\vartheta \\ \sin\gamma \cdot \sin\vartheta & \cos\gamma & \sin\gamma \cdot \cos\vartheta \\ \sin\vartheta \cdot \cos\gamma & -\sin\gamma & \cos\gamma \cdot \cos\vartheta \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.18)$$

Výsledná matice je symetrická, takže platí, že matice transponovaná je zároveň i maticí invertovanou:

$$C = A^T = A^{-1}.$$

Pro transformaci z letové souřadnicové soustavy do zemské souřadnicové soustavy máme matici C danou vztahem:

$$C = A^T = \begin{bmatrix} \cos\gamma \cdot \cos\vartheta & -\sin\gamma & \sin\vartheta \cdot \cos\gamma \\ \sin\gamma \cdot \cos\vartheta & \cos\gamma & \sin\gamma \cdot \sin\vartheta \\ -\sin\vartheta & 0 & \cos\vartheta \end{bmatrix}. \quad (4.19)$$

Jednotka DDU pracuje tedy tak, že z jednotky SCU obdrží zesílené a opravené signály ze všech tří magnetometrů, převede je na číslicové signály a pomocí matice C, kterou pomocí akcelerometrů spočítá, provede transformaci do zemské souřadnicové soustavy a ve výsledné části jednotky se provede výpočet azimutu pomocí rovnice 4.6.

Další důležitou částí této jednotky je počítat s deklinací. Jak již bylo poukázáno v kapitole (2.1), existuje odchylka mezi směrem magnetického severu (měřeného kompasem)

a pravého neboli zeměpisného severu. Vzhledem k nahrazení skutečného severu, úhel deklinace v aktuální poloze musí být přičítán nebo odčítán od azimutu čteného z kompasu. Přiměřená účinnost závisí na tom zda-li je deklinace na východ nebo na západ. Praktický způsob pro vyrovnání deklinace v určité oblasti nebo prostoru by mohl udržet kompas ve směru skutečného severu (tj. podél cesty, která přesně směřuje k severu). Čtení azimutu tak nyní poskytuje hodnotu deklinace, která může být nadále použitelná k vyrovnání.

Protože vlivem jiných magnetických polí a nepřesným uložením citlivých os magnetometrů v tříosém měřicím systému vznikají chyby, který ovlivňují měření, provádí se tzv. kompenzace, které se budu věnovat později. Kompenzací se zjistí odchylky kompasu od správných kurzů a tyto odchylka se musí v konečné fázi přičítat nebo odečítat od výsledného azimutu.

#### 4.2.5 Display

Nakonec musí být měřený azimut předán pomocí mikrokontroleru na display, a nebo jinému elektronickému systému.

## 5. Chyby magnetorezistivních kompasů

Při měření kurzu kompasem vzniká mnoho chyb. Ukážu a přiblížím zde hlavní z nich.

### 5.1 Chyba vzniklá nesprávným uložením

Tahle chyba vzniká tehdy, pokud senzor magnetického pole (např. KMZ-52), není uložen přesně do osy letadla. Protože součástky jsou dnes velmi malé, tak se musí docílit co nejpřesnějšího uložení. Tahle chyba se nazývá **senzor housing** a my si ji označíme jako chybu A.

### 5.2 Chyba vznikající vlivem deviace

Protože letadlo je vyrobeno z různých feromagnetických materiálů a obsahuje různé přístroje vytvářející své magnetické pole, tak zemské magnetické pole v letadle je těmito materiály a přístroji ovlivňováno a působí na citlivé senzory kompasu tak, že pomyslná „ručka“ kompasu je od skutečného severu odchýlena o úhel, který nazýváme **deviací**.

Je-li „ručka“ kompasu vychýlena na východ od skutečného severu, tak to uvažujeme kladnou deviací. Pokud je vychýlena na západ tak uvažujeme zápornou deviací.

Kovy v letadle můžeme rozdělit na magneticky „tvrdé“ a magneticky „měkké“ materiály.

„Tvrdé“ materiály (většinou železné) mají vysokou koercitivní sílu. Pokud jsou zmagnetovány, stávají se permanentními magnety a jejich magnetické pole se nemění proti letadlu. Tyto materiály zatěžují kompas chybou:

$$\delta_t = B \sin\psi + C \cos\psi. \quad (\text{viz [2]}) \quad (5.1)$$

„Měkké“ materiály mají malou koercitivní sílu (blíží se k 0). Pokud letadlo mění kurz, tak magnetické pole těchto materiálů se také mění. Kurz je tedy zatížen další chybou:

$$\delta_m = D \sin 2\psi + E \cos 2\psi. \quad (\text{viz [2]}) \quad (5.2)$$

Pokud leží některé magnetické pole (např. mag pole některého z jiných přístrojů) velmi blízko sensorů kompasu, tak vzniká další chyba:

$$\delta_n = F \sin 3\psi + G \cos 3\psi, \quad (\text{viz [2]}) \quad (5.3)$$

výsledná deviační chyba je dána součtem všech chyb.

### **5.3 Celková chyba kompasu**

Pokud chceme dostat celkovou chybu, kterou je kompas zatížen, přičteme ještě chybu **A** způsobenou nesprávným uložením. Pak tedy dostáváme rovnici:

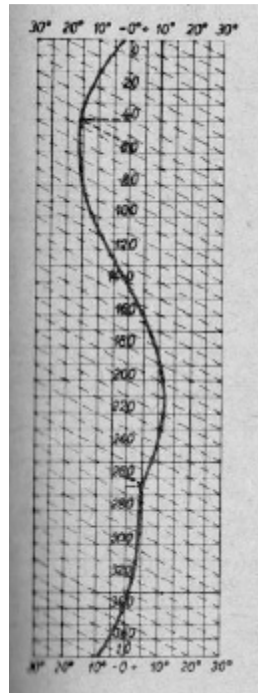
$$\delta = A + B \sin\psi + C \cos\psi + D \sin 2\psi + E \cos 2\psi + F \sin 3\psi + G \cos 3\psi \dots \quad (\text{viz [2]}) \quad (5.4)$$

V praxi se používají pouze první 3 členy rovnice, která je platná pouze pro chyby menší než  $10^\circ$ .

## **6. Kompenzování kompasu**

Vlastní kompenzace se provádí tak, že letadlo se postaví na tzv. kompenzační kruh a otáčí se do jednotlivých kurzů, a protože je kompenzační kruh vybaven přesnou stupnicí, zjistí se odchylka kompasu v jednotlivých kurzech.

Výsledkem takového měření je tzv. deviační křivka (obr.6.1), na který jsou vidět chyby v různých kurzech letadla.

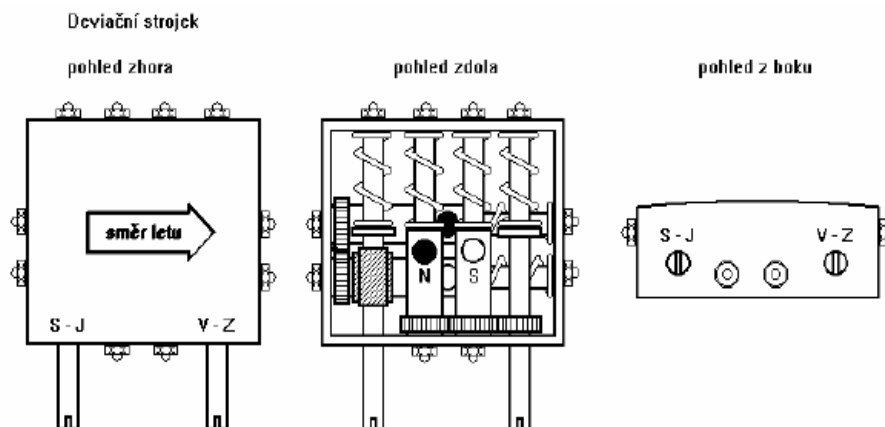


**Obr. 6.1: Deviační křivka kompasu** (zdroj: [2] str.291)

Tahle kompenzace (u AČR) se provádí 2-krát ročně, při tzv. přechodu na „zimní“ a „letní“ provoz.

Správně by se měla kompenzace provádět tak, že letadlo se musí otáčet ve všech směrech, tzn. jak kolem podélné osy, tak i kolem svislé. To je ovšem v praxi nemožné díky velkým rozměrům letadel a také z toho důvodu, že konstrukce, na které by se otáčení provádělo, by byla vytvořena také z feromagnetických materiálů a měření by pak bylo zatíženo ještě větší chybou.

U starších přístrojů se kompenzace prováděla vkládáním jiných magnetických polí, obvykle se používali permanentní magnety nebo tzv. deviační strojky. Jeden takový deviační strojek máme na obrázku 6.2.



**Obr. 6.2: Deviační strojek magnetického kompasu** (zdroj: [1] str.150)

Přístroj GMK-1 má vlastní kompenzační zařízení, které vidíme na obrázku (obr. 6.3).



## 6.1 Metody řešení pro kompenzaci magnetorezistivního kompasu

Tahle kompenzace je také mým úkolem v bakalářské práci. Zpracoval jsem metodu, která chyby popsané v kapitole 5 kompenzuje.

Celá kompenzace je založena na matematické metodě, která se nazývá „Metoda nejmenších čtverců“ (MNC). Pomocí této metody můžeme aproximovat funkci, kterou získáme měřením a zmenšit její chybu proložením vhodným polynomem.

Metoda nejmenších čtverců je matematická metoda, určená ke statistickému zpracování dat. Pomocí ní můžeme zjistit aproximační funkci zjištěných hodnot, např. z měření. Ovšem tato aproximační funkce musí být lineární kombinací předem známých funkcí a metoda umožní vypočítat jejich koeficienty.

Takže jednoduše řečeno. Metoda nejmenších čtverců slouží k nalezení takového řešení, aby součet druhých mocnin chyb nalezeného řešení byl minimální.

Nejčastěji je pro proložení používána lineární funkce, a proto se můžeme v tomto případě setkat s názvem **lineární regrese**.

V našem případě je cílem proložit  $n$  hodnot  $[x_i, y_i]$  polynomem  $k$ -tého řádu, kde  $k < n$ , protože při  $k > n$  by úloha měla nekonečně mnoho řešení.

Náš polynom, který může vypadat obecně takhle:

$$P_k = p_0 + p_1x + \dots + p_kx^k, \quad (6.1)$$

musí mít takové koeficienty  $(p_0, \dots, p_k)$ , aby součet  $S$  druhých mocnin odchylek  $e_i$  byl co nejmenší:

$$e_i = p_0 + p_1x + \dots + p_kx^k - y_i \quad (6.2)$$

$$S = \sum_{i=1}^n e_i. \quad (6.3)$$

Neznámé koeficienty aproximačního polynomu  $p_k$  vypočteme řešením soustavy lineárních rovnic. Píšeme matici:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^k \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} \\ \sum_{i=1}^n x_i^k & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} & \sum_{i=1}^n x_i^{2k} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^k y_i \end{bmatrix}. \quad (\text{viz [3]}) \quad (6.4)$$

Proložení nemusíme provádět jen polynomem  $k$ -tého řádu. Existují i jiné aproximace, které by byly vhodnější pro náš případ. Ale vzhledem k tomu, že v zadání mám přímo napsané, že mám použít polynom, tak simulaci kompenzace provedu s polynomem 6-tého řádu.

Osobně bych navrhol proložit funkci tzv. Čebyševovou aproximací. Při této aproximaci se snažíme co nejvíce zmenšit maximální chybu v daných bodech obdržených např. z měření. Chybu můžeme definovat:

$$E = \max_{i=0..n} |e_i| = \max_{i=0..n} [p_m(x_i) - f(x_i)] \quad (\text{viz. [5]}) \quad (6.5)$$

V praxi se můžeme setkat s názvem „Minimaxní Čebyševova aproximace“. *Minimax* proto, že se snažíme minimalizovat maximální chybu.

Postup aproximace je takový, že nejdříve použijeme aproximaci Čebyševovými polynomy  $T_n(x)$ . Tato aproximace dobře aproximuje *minimax*, takže ji použijem pro jeho první přiblížení.

Součtem  $n$  Čebyšových polynomů, můžeme definovat Čebyševovu aproximaci:

$$g(x) = \sum_{i=1}^n a_i T_i(x), \quad (\text{viz. [5]}) \quad (6.6)$$

Kde koeficienty  $a_i$  jsou definovány vztahem:

$$a_i = \frac{1}{K_i} \int_{-1}^1 \frac{f(x)T_i(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx \quad K_i = \begin{cases} \pi & i = 0 \\ \pi/2 & i = 1 \end{cases} \quad (\text{viz. [5]}) \quad (6.7)$$

## 6.2 Algoritmus kompenzace magnetorezistivního kompasu

Celou kompenzací můžeme nasimulovat v programu Microsoft Excel (dále jen ME).

Pomocí rovnice 5.4 vytvoříme náhodné chybné hodnoty  $\delta$ , které mohou představovat hodnoty skutečně naměřené na kompenzačním kruhu.

Tyto hodnoty připočteme k hodnotám měřených kurzů  $\psi$  a můžeme je nazvat např.  $K$ . Z hodnot  $\delta$  sestrojíme graf, ze kterého uvidíme odchylky v jednotlivých bodech měření.

Aproximaci funkce zobrazenou v grafu, provedem tak že zobrazíme lineární regresi, ktero ME podporuje. Použijeme aproximaci polynomem 6-tého řádu.

Účelem je zjistit koeficienty polynomu, kterým danou funkci prokládáme. Polynom má tvar:

$$y = a * x^6 + b * x^5 + c * x^4 + d * x^3 + e * x^2 + f * x + g. \quad (6.8)$$

Zobrazíme-li rovnici regrese, ME dokáže koeficienty vypočítat. Do zjištěné rovnice polynomu dosadíme místo neznámých hodnot  $x$  správnou hodnotu kursu ve stupních  $\psi$ .

Dále vypočteme hodnoty  $L$  podle rovnice:

$$L = K - y, \quad (6.9)$$

,které udávají správný kurz zatížený minimální chybou.

Potřebujeme zjistit tuhle minimální chybu, takže od hodnot  $L$  odečteme měřené hodnoty  $\psi$  a zjistíme odchylky (chyby) kompasu  $\delta_k$ :

$$\delta = L - \psi . \quad (6.10)$$

Chyby  $\delta_k$  se uloží do paměti kompasu, která se nachází v jednotce DDU, a mikroprocesor pak odchylky v příslušných kurzech odečítá nebo přičítá.

K tomu potřebujeme zjistit celkovou chybu měření  $\delta_c$ :

$$\delta_c = \frac{1}{N} \sum \delta_k^2 \quad , (viz [1] ) \quad (6.11)$$

, kde N je počet měření.

Kompenzaci jsem provedl pro 24/12/8/4 měřených bodů. S nejmenší chybou pracuje 24 bodová kompenzace, její chyba činí  $\delta_c=0,07097^\circ$ , což je velmi dobré, protože v praxi je povolena odchylka  $2^\circ$ .

Můžeme ještě pro úplnost spočítat účinnost kompenzace pro kterou potřebujeme vypočítat rozptyl, což je suma čtverců chyb  $\delta$ :

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum \delta \quad . (viz [1]) \quad (6.12)$$

Z rozptylu vypočítáme směrodatnou odchylku:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad . (viz [1] ) \quad (6.13)$$

A nakonec účinnost kompenzace je dána rovnicí:

$$\eta = \frac{\sigma}{\delta_c} \quad . (viz [1]) \quad (6.14)$$

Účinnost 24-bodové kompenzace je  $\eta=7,8045\%$ .

V PŘÍLOZE 2 jsou ukázány tabulky výpočtů kompenzace v ME a v PŘÍLOZE 3 je ukázán graf chybné křivky a křivky opravené.

## **7. Závěr**

V bakalářské práci jsem se snažil přiblížit to, jak pracují kompasy letadel. Je vidět, že technika jde rychle dopředu. Kompasů se miniaturizují, přechází se z analogových na digitální a zpřesňují se jejich funkce.

Navrhoval jsem strukturu kompasu, která podle mě obsahuje všechny bloky, které jsou pro kompas potřebné. Snažil jsem se popsat funkci jednotlivých bloků. Navíc jsem ukázal odvození výpočtu azimutu, což nebylo mým úkolem ze zadání.

Mým úkolem bylo také navrhnout jak kompas vykompenzovat. Pomocí programu Microsoft Excel jsem dokázal zjistit odchylky kompasu v jednotlivých azimutech, tak aby se daly uložit do paměti kompasu a při výpočtech azimutu se s nimi mohlo počítat. Rád bych provedl kompenzaci ze skutečnými hodnotami změřené přímo z kompasu letadla, ale to není možné, protože k měření by mi určitě nebyl umožněn přístup.

## ***8. Seznam použité literatury***

### ***8.1 Knižní publikace***

- [1] ČIŽMÁR, J. Letecké přístroje II. Skriptum S1041/2. Brno: VA v Brně, 2003. 225s.
- [2] Duda, T. Letecké přístroje II. Brno: VA v Brně, 1967. 580.
- [3] Fajmon, B.; Růžičková, I. Matematika 3. Brno: VUT FEKT v Brně. 255s.

### ***8.2 Internetové prameny***

- [4] Firemní dokumentace výrobců integrovaných obvodů:  
[http://www.semiconductors.philips.com/acrobat\\_download/applicationnotes/AN00022\\_COMPASS.pdf](http://www.semiconductors.philips.com/acrobat_download/applicationnotes/AN00022_COMPASS.pdf)
- [5] Čebyševova aproximace  
[http://alpha.ujep.cz/~mlisal/nm\\_1/jskvor/PDF/AproxCebys.pdf](http://alpha.ujep.cz/~mlisal/nm_1/jskvor/PDF/AproxCebys.pdf)

## ***9. Seznam příloh***

PŘÍLOHA 1: Blokové schéma elektronického kompasu používající magnetometry KMZ-52

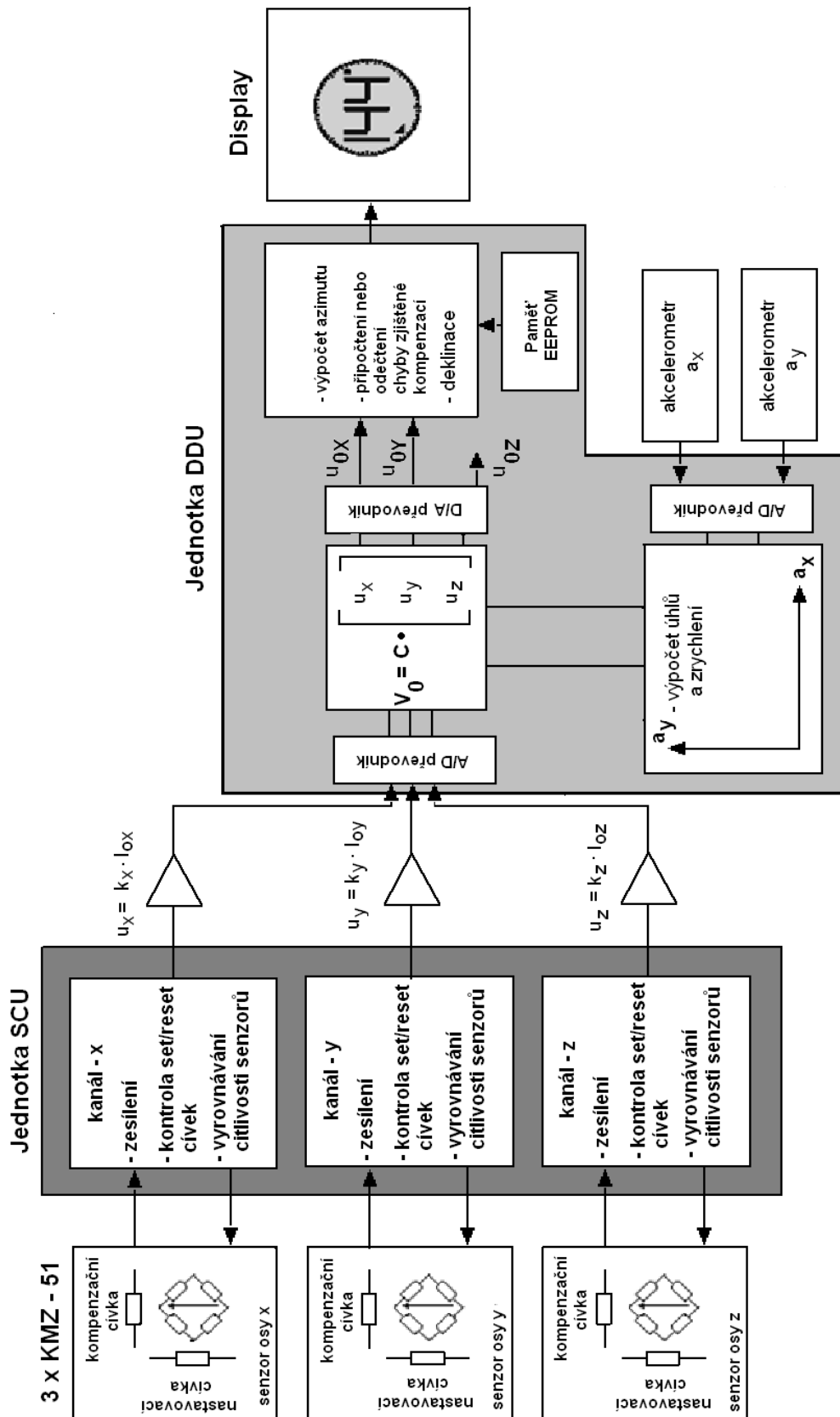
PŘÍLOHA 2: Tabulky naměřených a vypočtených hodnot 24-bodové kompenzace

PŘÍLOHA 3: Graf 24-bodové kompenzace

## ***10. Seznam zkratek***

AČR	Armáda České republiky
DDU	Direction determination unit
fce.	funkce
ME	Microsoft Excel
MNČ	metoda nejmenších čtverců
MR	magnetorezistivita
SCU	Signal Conditioning Unit
UNOB	univerzita obrany

PŘÍLOHA 1: Blokové schéma navrhovaného magnetorezistivního kompasu



PŘÍLOHA 2: Tabulky naměřených a vypočtených hodnot 24-bodové kompenzace

$\psi$ [°]	$\delta$ [°]	K	y	L	$\delta_k$ [°]	$\delta_k^2$ [°]
0	3,500000	3,500000	3,162184	0,337816	0,337816	0,114119
15	2,830006	17,830006	3,268424	14,561582	-0,438418	0,192211
30	1,849225	31,849225	2,188242	29,660984	-0,339016	0,114932
45	0,587874	45,587874	0,556299	45,031574	0,031574	0,000997
60	-0,845104	59,154896	-1,165330	60,320226	0,320226	0,102545
75	-2,275627	72,724373	-2,661000	75,385373	0,385373	0,148512
90	-3,496813	86,503187	-3,737084	90,240272	0,240272	0,057730
105	-4,312373	100,687627	-4,299340	104,986967	-0,013033	0,000170
120	-4,580264	115,419736	-4,332030	119,751765	-0,248235	0,061620
135	-4,245519	130,754481	-3,878803	134,633285	-0,366715	0,134480
150	-3,353818	146,646182	-3,025351	149,671534	-0,328466	0,107890
165	-2,042255	162,957745	-1,883812	164,841557	-0,158443	0,025104
180	-0,509556	179,490444	-0,578948	180,069393	0,069393	0,004815
195	1,026748	196,026748	0,763919	195,262828	0,262828	0,069079
210	2,375423	212,375423	2,029211	210,346212	0,346212	0,119863
225	3,407747	228,407747	3,119624	225,288123	0,288123	0,083015
240	4,076153	244,076153	3,962912	240,113242	0,113242	0,012824
255	4,411385	259,411385	4,516893	254,894492	-0,105508	0,011132
270	4,499994	274,499994	4,772703	269,727291	-0,272709	0,074370
285	4,449173	289,449173	4,756278	284,692895	-0,307105	0,094314
300	4,349143	304,349143	4,528082	299,821061	-0,178939	0,032019
315	4,243794	319,243794	4,181065	315,062729	0,062729	0,003935
330	4,117766	334,117766	3,836865	330,280901	0,280901	0,078905
345	3,903529	348,903529	3,640240	345,263289	0,263289	0,069321
360	3,506350	363,506350	3,751741	359,754610	-0,245390	0,060216

Celková chyba [°]:

0,070964767

rozptyl:

11,65063108

Směrodatná odchylka:

3,413302078

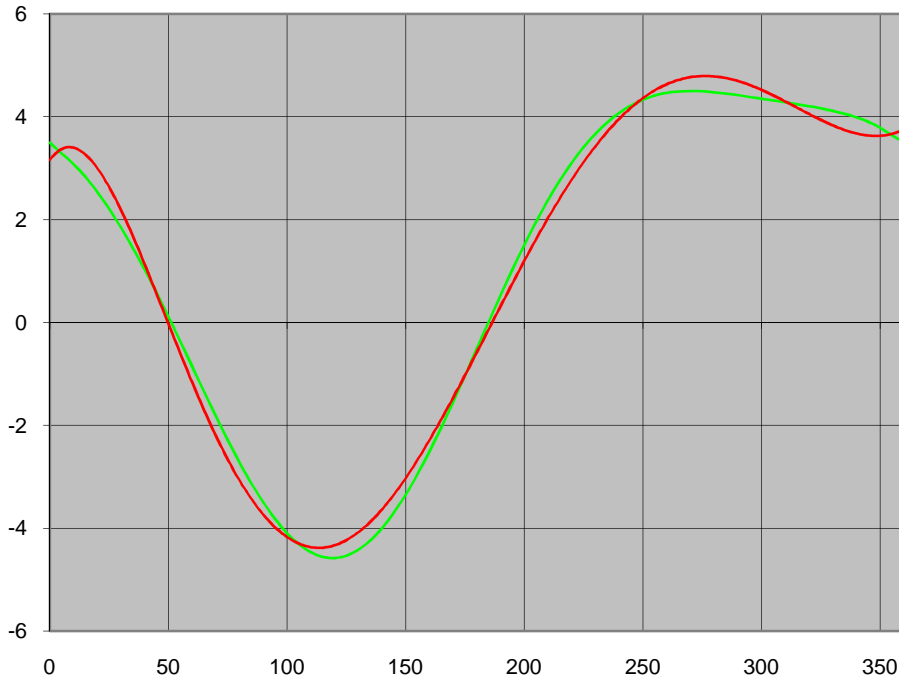
ucinnost kompenzace [%]:

7,804528417

## PŘÍLOHA 3: Graf 24-bodové kompenzace

24 bodová kompenzace

$$y = -2,14941516738147000E-13x^6 + 3,35503049449739000E-10x^5 - 1,89232004302952000E-07x^4 + 4,65503563966978000E-05x^3 - 4,44986828323676000E-03x^2 + 6,39787014598811000E-02x + 3,16218442729446000E+00$$



— křivka hodnot zatížených chybou      — Polyg. (křivka hodnot zatížených chybou)