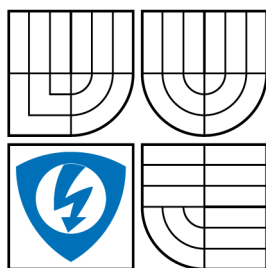


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

NÁVRH A IDENTIFIKACE ROZŠÍŘENÉHO MODELU MEMS GYROSKOPU

AN EXTENDED MODEL OF A MEMS GYROSCOPE: DESIGN AND
IDENTIFICATION

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE
SHORT VERSION OF PHD THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MARTIN VÁGNER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.

BRNO 2015

KLÍČOVÁ SLOVA

MEMS, gyroskop, teplotní snímač, metodika měření, kalibrace, nejistota, model, posun nuly, převodní konstanta, širokopásmový šum, ARW, závislost na teplotě, závislost na napájecím napětí, rotační stůl, teplotní komora

KEYWORDS

MEMS, gyroscope, temperature sensor, measurement, calibration, uncertainty, model, bias, scale factor, angle random walk, ARW, temperature, supply voltage, drift, rate table, thermal chamber

OBSAH

1	Úvod	5
2	Stávající stav	6
2.1	Systémový model snímače	6
2.2	Fyzikální model	7
2.3	Model okolních vlivů	7
2.4	Model stochastických vlastností	9
2.5	Testování gyroskopů	10
3	Cíle	11
4	Testování MEMS gyroskopů	12
4.1	Metodika měření	12
4.2	Zdroje nejistot	12
5	Model MEMS gyroskopu	13
5.1	Teplotní snímač v MEMS gyroskopu	13
5.2	Statická převodní charakteristika	15
5.3	Dynamické vlastnosti	19
5.4	Stochastické vlastnosti	21
5.5	Architektura modelu	22
6	Závěr	26
	Literatura	27
	Životopis autora	29
	Abstrakt	30

1 ÚVOD

K měření úhlové rychlosti se stále více prosazují snímače vyrobené technologií MEMS. Většina konstrukcí dnes vychází z návrhu, který byl vyvinut v Draper Laboratory [7, 6]. Principem je měření účinků Coriolisovy síly na vibrující hmotu. Z těchto prací vyšla celá řada modifikovaných návrhů založených na stejném principu. Hlavním cílem je potlačení parazitních vlivů, snížení šumu a nestability.

V oblasti inerciální navigace v současné době dominují optické gyroskopy, jejichž základní typy jsou RLG (Ring Laser Gyroscope), RFOG (Resonance Fiber Optic Gyroscope) a IFOG (Interferometric Fiber Optic Gyroscope). Optické gyroskopy vynikají vysokou stabilitou a nízkým šumem. Hlavními nevýhodami jsou vysoká cena, náročná výroba a omezená možnost miniaturizace.

Naproti tomu MEMS gyroskopy se vyznačují miniaturními rozměry, malou hmotností, nízkou spotřebou energie, snadnou výrobou ve velkých sériích a tak i příznivou cenou. Tyto vlastnosti je činí ideálními pro oblast inerciální navigace, ale v současné době jejich parametry nedosahují kvalit optických gyroskopů. Jedním z klíčových faktorů jsou výrobní tolerance MEMS technologií, které nedovolují vytvořit ideální mechanickou strukturu. Většina návrhů využívá symetrických topologií, které potlačují citlivost na parazitní vlivy jako jsou teplota, vibrace a mechanické napětí. Z důvodu výrobních nepřesností dochází k porušení symetrie a tak k citlivosti na tyto vlivy. MEMS technologie dále klade extrémní nároky na elektroniku, protože musí dokázat vyhodnotit mechanický pohyb v řádu 10^{-10} m, který v případě kapacitních snímačů v MEMS gyroskopech odpovídá změně v řádu 10^{-16} F [5]. Výrobní tolerance způsobují rozptyl klíčových parametrů jako například převodní konstanta snímače.

K dosažení nejlepších výsledků je pro uživatele nutné implementovat dodatečné kompenzační a filtrační metody. Pro jejich úspěšné nasazení je nezbytný co nejpřesnější model snímače a jeho parametry, které se získají během procesu kalibrace. Problémem zůstává nedostatek informací ze strany výrobce, případně jejich velká nejistota. Katalogové listy obvykle uvádějí pouze základní parametry s tolerancí řádově $\pm 10\%$. Dalším problémem je, že metodika pro měření a charakterizace MEMS gyroskopů není v současné době dostatečně sjednocena. V důsledku toho jsou vlastnosti snímačů v dokumentaci různých výrobců uváděny za rozdílných podmínek a metodika jejich měření není ve většině případů zveřejněna.

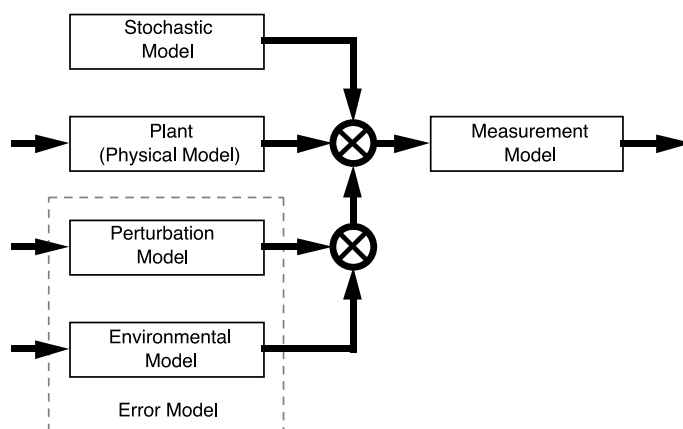
2 STÁVAJÍCÍ STAV

Problematikou chyb a modelování inerciálních snímačů se zabývá celá řada prací, ale většinou se jedná o úzce zaměřený přístup a chybí jednotná metodika. Nejucelenější přístup lze nalézt ve standardech IEEE. Přímo oblastí MEMS gyroskopů s vibrující hmotou se zabývá pouze standard IEEE std 1431 [3], jehož převážná část vychází ze standardů pro laserové gyroskopy [1, 2], která byla doplněna o stručný popis MEMS gyroskopů. Tyto normy obsahují především seznamy parametrů, které lze u snímačů definovat, a jsou vodítkem pro sestavování měřicích procedur. Na evropské půdě se o standardizaci pokouší Evropská kosmická agentura standardem ECSS-E-ST-60-21C, který však dosud nebyl vydán. Z obecných pramenů, které obsahují definice chyb inerciálních snímačů a principy inerciální navigace, lze doporučit knihy [10, 11, 12].

2.1 Systémový model snímače

Z pohledu přenosu vstupní veličiny na výstupní je u všech snímačů požadována nejlépe lineární závislost bez dynamiky a dále by měly být parametry v čase neměnné a nezávislé na jiných vlivech. Reálný snímač má mimo statické převodní charakteristiky také dynamické vlastnosti, a proto by na něj mělo být nahlíženo jako na dynamický systém. Všechny parametry jsou více či méně postiženy náhodnými jevy a z fyzikální podstaty obsahují snímače i zdroje šumu, a proto musí být brány také jako stochastické systémy. V neposlední řadě dochází i k citlivosti na jiné fyzikální veličiny, které nejsou předmětem měření.

Tuto koncepci zachycuje blokový diagram na obr. 2.1. Fyzikální podstatu



Obr. 2.1: Systémový model snímače [2]

snímače popisuje blok „Plant“, náhodné jevy blok „Stochastic Model“, vliv dalších veličin „Environmental Model“ a citlivost na změnu parametrů fyzikálního modelu udává „Perturbation Model“. Výstup snímače je nakonec definován jako lineární kombinace vnitřních stavů předchozích částí blokem „Measurement Model“. Toto dělení není v praxi příliš striktně dodržováno a modely často sdružují několik částí dohromady.

2.2 Fyzikální model

Podrobnější modely vnitřní struktury popisují například disertační práce [28, 27], které jsou zaměřeny na návrh MEMS elementů a související elektroniky. Nejčastěji používaným modelem MEMS gyroskopu je lineární funkce [10, 13, 11, 14, 16, 15], která má pro tříosý gyroskop maticový tvar:

$$\bar{\Omega} = \mathbf{K}\Omega + \mathbf{b} \quad (2.1)$$

$$\bar{\Omega} = \begin{bmatrix} \bar{\Omega}_x \\ \bar{\Omega}_y \\ \bar{\Omega}_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}, \quad \Omega = \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix}$$

kde $\bar{\Omega}$ je výstup indikovaný gyroskopem a Ω vstupní úhlová rychlost (pravá hodnota). Konstanty $\mathbf{K}$ a $\mathbf{b}$ definují přenos vstupní veličiny na výstup. Ideální jednoosý gyroskop by měl být citlivý pouze na rotaci kolem své vstupní osy a trojice gyroskopů by měla být orientována přesně ortogonálně.

2.2.1 *Nelinearita*

Nelinearitu gyroskopů diskutují např. prameny [10, 11]. Zmíněny jsou chyby převodní charakteristiky jako mrtvé pásmo, práh, asymetrie, hystereze či obecná nelinearita. Pro oblast MEMS gyroskopů není problematika linearity v literatuře explicitně řešena.

2.3 Model okolních vlivů

2.3.1 *Teplota*

Teplota patří mezi nejvýznamnější vlivy, které působí na vlastnosti gyroskopů. Z pohledu výstupu snímače teplota způsobuje především posun nulové hodnoty, změnu převodní konstanty [11, 17, 12] a ovlivňuje i šum snímače [18]. Pro inerciální navigaci je nejkritičtější posun nuly, protože integrací konstantní

chyby v úhlové rychlosti dochází k lineárnímu nárůstu chyby natočení. Změna převodní konstanty má až sekundární význam, protože výsledná chyba je úměrná úhlové rychlosti. Závislost na teplotě bývá nejčastěji popsána pomocí:

- Po částech lineární funkce [20, 19]
- Polynomu [21, 22, 24]
- Neuronové sítě [23, 25, 26]

Některé typy nelinearit nelze polynomem aproximovat, a proto se používají např. neuronové sítě. Vzhledem ke stochastickým vlastnostem gyroskopu může v obou případech snadno dojít k chybnému proložení teplotní závislosti. Kritickým bodem je tedy volba řádu modelu a případně trénovacích množiny. Tyto aspekty nebývají zohledněny.

2.3.2 Lineární zrychlení

Druhým výrazným rušivým vlivem je lineární zrychlení. Citlivost gyroskopů na lineární zrychlení se obvykle popisuje pomocí dvou parametrů: citlivostí na první a na druhou mocninu zrychlení [10, 11, 19, 29, 30, 31].

Citlivost na první mocninu zrychlení vyjadřuje posun výstupního signálu gyroskopu v závislosti na lineárním zrychlení, které má charakter stejnosměrné složky (gravitační zrychlení Země), nebo nízkofrekvenčního signálu. Závislost na první mocnině zrychlení lze na nízkých frekvencích obvykle kompenzovat. Citlivost na druhou mocninu bývá spojována s vibracemi, které mají charakter šumu s nulovou střední hodnotou. Pramen [31] uvádí, že kompenzace této chyby je obtížná z kvůli fázové charakteristice přenosu mezi gyroskopem a akcelerometrem. Některé prameny [10, 11] definují anizoelasticitu jako třetí parametr. V tomto případě se jedná o posun výstupního signálu gyroskopu v závislosti na součinu lineárního zrychlení ve dvou na sobě kolmých osách. Výrobci MEMS gyroskopů anizoelasticitu obvykle neuvádějí. Zmíněné zdroje používají lineární funkci pro modelování závislosti na první mocnině a anizoelasticity.

2.3.3 Magnetické pole

V souvislosti s inerciálními snímači klasické konstrukce uvádí zdroj [11] magnetické pole jako parazitní vliv, který může způsobit posunutí nuly snímače. Výrobci MEMS gyroskopů tento parametr neuvádí a studie v tomto směru nebyly nalezeny.

2.4 Model stochastických vlastností

Chyby způsobené stochastickými vlastnostmi není možné odstranit kalibrací a jejich kompenzace je možná pouze v určitých případech a v omezené míře. U reálného snímače vykazují veškeré parametry určitou míru nedeterministického chování, ale prakticky se modely zaměřují pouze na dominantní jevy.

Stochastické vlastnosti určují kvalitu snímače a jsou vždy limitujícím faktorem pro integritu řešení v úloze inerciální navigace. Je-li gyroskop nasazen samostatně bez redundance či jiných vstupů, které lze použít k odhadu úhlové rychlosti či natočení, není možné provést korekci stochastických chyb. Naopak integrované navigační systémy, které získávají údaje z více zdrojů, mohou využít modelu stochastických vlastností gyroskopu k odhadu chyb a jejich korekci.

2.4.1 *Opakovatelnost*

Opakovatelnost parametrů bývá u gyroskopů v literatuře diskutována obvykle jen pro nulovou hodnotu a méně již pro převodní konstantu. Jedná o náhodnou složku, která se mění v okamžiku zapnutí snímače (za stejných podmínek) a po dobu jednoho běhu zůstává konstantní. Změny mohou být řádově větší než jevy, ke kterým dochází za běhu snímače [10]. Pramen [12] tvrdí, že tyto chyby jsou důležité pouze pro levné MEMS snímače, nicméně významné hodnoty lze nalézt i u MEMS snímačů vyšší třídy [34].

Opakovatelnost parametrů se modeluje pomocí náhodné konstanty [3, 32, 33]. V okamžiku zapnutí je vygenerováno náhodné číslo s určitým rozdělením pravděpodobnosti, které až do vypnutí zůstává neměnné.

2.4.2 *Širokopásmový šum*

Základní vlastností elektrických i mechanických systémů je šum. Pro gyroskopy bývá uváděn výstupní šum pod označením „Angle Random Walk“ (ARW), „Rate Noise Density“ či „Noise“. Termín ARW vychází z původního významu gyroskopu, kdy je výstupem přímo úhel natočení. ARW vyjadřuje směrodatnou odchylku úhlu jako funkci času. Souvislost ARW s širokopásmovým šumem vyplývá z vlastnosti „Random Walk“ (RW) procesu, který lze získat integrací bílého šumu. Velikost ARW je tedy přímo úměrná širokopásmovému šumu v úhlové rychlosti, jež je výstupem MEMS gyroskopů.

Pro modelování širokopásmového šumu gyroskopů se používá bílý Gaussovský šum [3, 32, 13, 33]. Většina pramenů považuje úroveň širokopásmového šumu jako konstantní. Článek [18] srovnává výsledek navigace na AR modelech, které byly určeny pro rozdílné teploty. Bylo potvrzeno, že nejmenší chybu vykazuje model nejbližší k provozní teplotě.

2.4.3 *Nestabilita nuly*

Jako nestabilita nuly se označují pomalé náhodné změny nulové hodnoty za provozu snímače. V literatuře [1, 2, 8, 35] a katalogových listech bývá uváděn parametr „Bias Instability“ (BI), který určuje kvalitu snímače. Jedná se o šum s $1/f$ výkonovou spektrální hustotou. Druhým parametrem je „Rate Random Walk“ (RRW). Tento náhodný proces má dominantní charakter na ještě nižších frekvencích než BI, protože výkonová spektrální hustota odpovídá $1/f^2$. Katalogové listy tento parametr neuvádí. V souvislosti s pomalými změnami nulové hodnoty bývá dále zmiňován exponenciálně korelovaný šum [1, 2, 32, 33]. K popisu nestability nuly lze použít např.:

- Gauss-Markovovoy procesy [32, 33]
- Random walk proces [1, 2]
- Autoregresní model [32]

2.4.4 *Kvantizační šum*

IEEE standardy uvádí kvantizační šum jako další složku stochastických chyb. Zmiňovaný šum má charakteristický sklon -1 Allanovy odchylky pro *úhlovou rychlost* a odpovídá kvantování *úhlu* (viz. obr. B4 v [1, 2]). Rozšířenou chybou je aplikace tohoto jevu na MEMS gyroskopy s vibrující hmotou. Pro MEMS gyroskopy s analogovým výstupem nemá kvantizační šum žádný význam [3]. Kvantováním úhlové rychlosti na A/D převodníku vzniká bílý šum v úhlové rychlosti, a proto se kvantizační šum převodníku projeví jako zvýšení ARW.

2.5 Testování gyroskopů

Velmi opomíjenou částí je problematika nejistot měření. Prakticky žádné prameny neřeší jaký je vliv měřicího vybavení. Jakou chybu vnáší okolní vlivy a jak se projeví stochastické jevy, které ztěžují určení ostatních parametrů. Z těchto důvodů bývají často opomíjeny podmínky měření a výsledkem je mísení různých jevů.

3 CÍLE

Literární průzkum problematiky MEMS gyroskopů ukazuje, že většina úsilí se soustředí na výzkum a vývoj mechanického elementu či elektroniky zpracovávající výstupní signál. V oblasti mechanické části tvoří velmi významnou větev technologie výroby, jenž definuje technologické limity. Ty zahrnují jednak omezení rozměrů, tvaru a složení materiálů, ale hlavně výrobní tolerance, opakovatelnost či homogenitu. Tyto parametry mají přímý vliv na vlastnosti MEMS gyroskopů, a proto je logickým krokem se zaměřit na podstatu problému. Minoritní část tvoří modelování vstupně-výstupních charakteristik MEMS gyroskopů a související metodika měření parametrů.

Modely vycházejí z popisu používaného u gyroskopů optických či historicky ze systémů se setrvačником. Modely těchto snímačů však zahrnují řadu jevů, které nemohou u MEMS gyroskopů díky odlišnému principu činnosti nastat. Prakticky se model redukuje na popis závislosti posunu nuly a převodní konstanty vlivem teploty a na chybu zarovnání v případě deterministických jevů. Skupinu stochastických vlastností pak zastupuje širokopásmový šum a nestabilita nuly aproximovaná obvykle GM procesem 1. řádu.

Pro metodiku měření parametrů gyroskopů existuje relativně malé množství literárních zdrojů a konkrétně problematice MEMS gyroskopů s vibrující hmotou se věnuje prakticky pouze IEEE standard [3]. Nejméně zdokumentovanou část tvoří oblast nejistot měření, která není pro MEMS gyroskopy zpracována.

Cíle této práce tvoří tyto úzce související oblasti:

1. Identifikace a posouzení hlavních zdrojů nejistot měření při stanovení parametrů MEMS gyroskopů.
2. Upřesnění metodiky měření parametrů MEMS gyroskopů (potlačení nejistot, nároky na vybavení).
3. Proměření vstupně-výstupních charakteristik různých typů levných MEMS gyroskopů s cílem identifikovat reálné vlastnosti a parazitní vlivy. Mezi zcela nezdokumentované či málo známé jevy patří: závislost nelinearity a stochastických jevů na teplotě, závislost parametrů na napájecím napětí, dynamické vlastnosti a charakteristika interního teplotního snímače.
4. Na základě naměřených dat určit vhodný popis a sestavit model, který reflektuje tyto vlastnosti, s ohledem na nejistoty měření.

4 TESTOVÁNÍ MEMS GYROSKOPŮ

4.1 Metodika měření

Kapitola metodiky měření se zaměřuje na stanovení převodní charakteristiky MEMS gyroskopu, parazitních vlivů a stochastických jevů. Na základě praktických zkušeností jsou zdůrazněny klíčové aspekty, které zahrnují měřicí přístroje, přípravky a zpracování dat. V rámci zkrácené verze práce je tato kapitola vypuštěna z důvodu širší problematiky.

4.2 Zdroje nejistot

Vliv byl ve většině případů posouzen pomocí simulací metodou Monte Carlo. V rámci rozboru zdrojů nejistot byly analyzovány následující aspekty:

- Vlastnosti rotačního stolu (přesnost a stabilita otáček, kývání osy)
- Vlastnosti měřicího přístroje
- Teplota
- Uchycení gyroskopu
- Stochastické vlastnosti gyroskopu
- Rotace Země

Výsledky ukazují, že stochastické vlastnosti gyroskopu mají zásadní vliv na nejistotu odhadu převodní konstanty a potvrzují význam střídavé posloupnosti úhlové rychlosti (viz. metodika měření). Důležitou roli hraje i průměrovací čas, který přináší nejlepší odhad převodní konstanty při τ v minimu Allanovy odchylky. V případě nejistoty posunu nuly se jeví jako dominantní složka spíše opakovatelnost než stabilita za běhu snímače.

V případě gyroskopů s analogovým výstupem je druhou významnou složkou vliv měřicího přístroje, který má dopad především na odhad nuly gyroskopu. Důležitou roli hraje měřicí přístroj i v případě stanovení nestability nuly gyroskopu v oblasti dlouhých časů, kde může nestabilita přístroje dominovat nad vlastnostmi gyroskopu.

Pro měření nestability nuly je klíčový i vliv teploty. Změny teploty v průběhu měření propagují na výstup gyroskopu díky citlivosti na teplotu a tím způsobují špatný odhad stochastických vlastností.

Ostatní jevy lze ve většině případů zanedbat, protože stochastické vlastnosti MEMS gyroskopů způsobují dominantní nejistotu měření.

5 MODEL MEMS GYROSKOPU

V rámci práce byly změřeny parametry vybraných MEMS gyroskopů. Pozornost byla soustředěna na jevy ovlivňující posun nuly snímače a převodní konstantu. Mezi hlavní faktory patří teplota a dále napájecí napětí, které bývá často opomíjeno. V souvislosti s teplotou byly analyzovány vlastnosti vestavěných teplotních snímačů, které jsou určené pro teplotní kompenzaci gyroskopu. Nakonec byl proveden rozbor vlivu teploty na stochastické vlastnosti.

5.1 Teplotní snímač v MEMS gyroskopu

Teplota je hlavním faktorem ovlivňující parametry MEMS gyroskopů. U většiny MEMS gyroskopů bývá teplotní snímač integrován na čipu spolu s elektronikou. Interní teplotní snímač nebývá kalibrován a chyba při použití typické hodnoty z katalogového listu může být až v řádu jednotek stupňů Celsia.

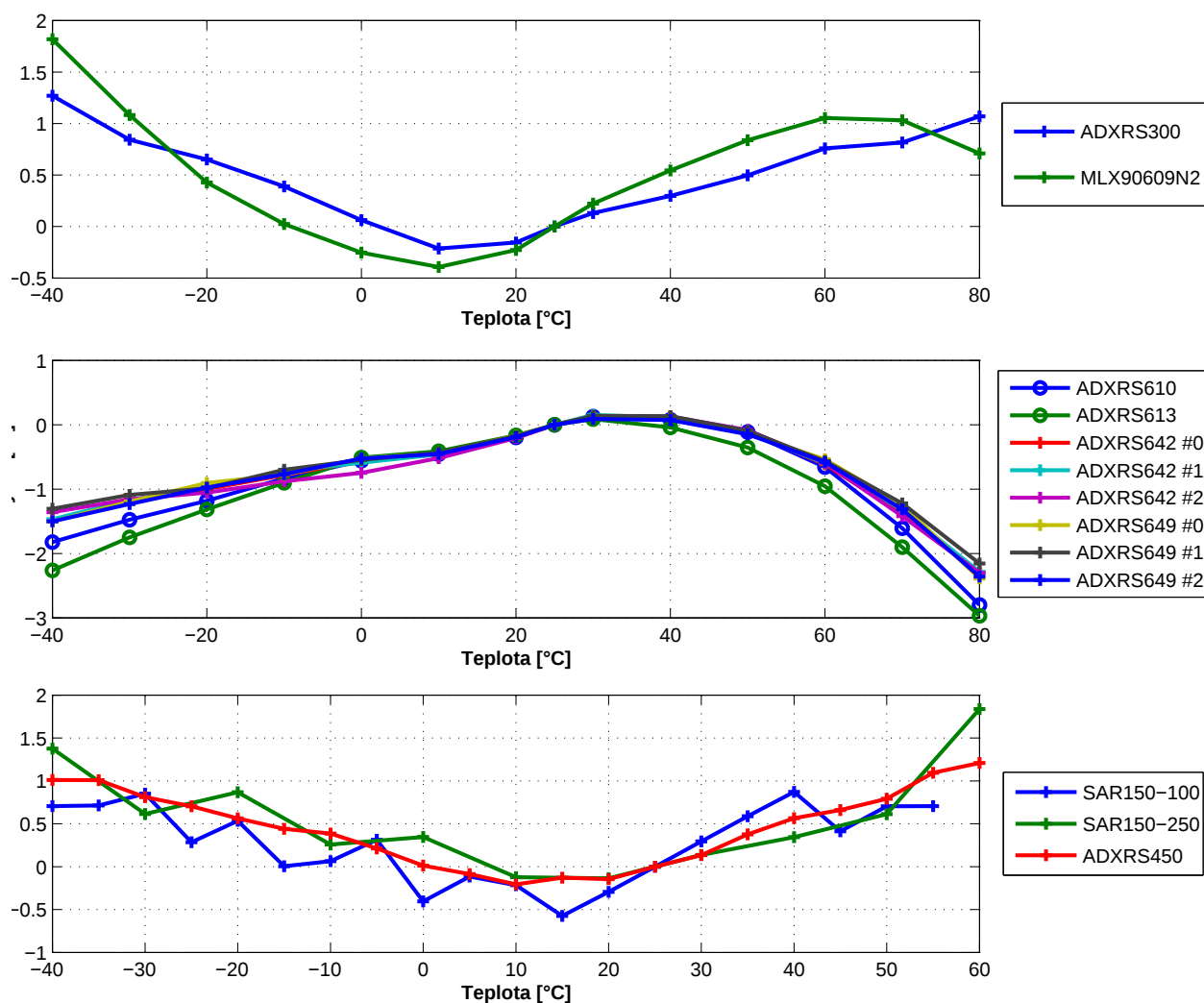
5.1.1 *Převodní charakteristika*

V rámci této práce byla proměřena charakteristika teplotních snímačů u gyroskopů řady ADXRS, MLX90609 a SAR150. Naměřené hodnoty potvrzují značné odchylky od katalogových hodnot u převodní konstanty, kde se chyba pohybuje v rozsahu 2 až 9%, a rozptyl posunu nuly mezi různými vzorky jednoho typu gyroskopu. Grafy na obr. 5.1 zobrazují nelinearitu teplotních snímačů.

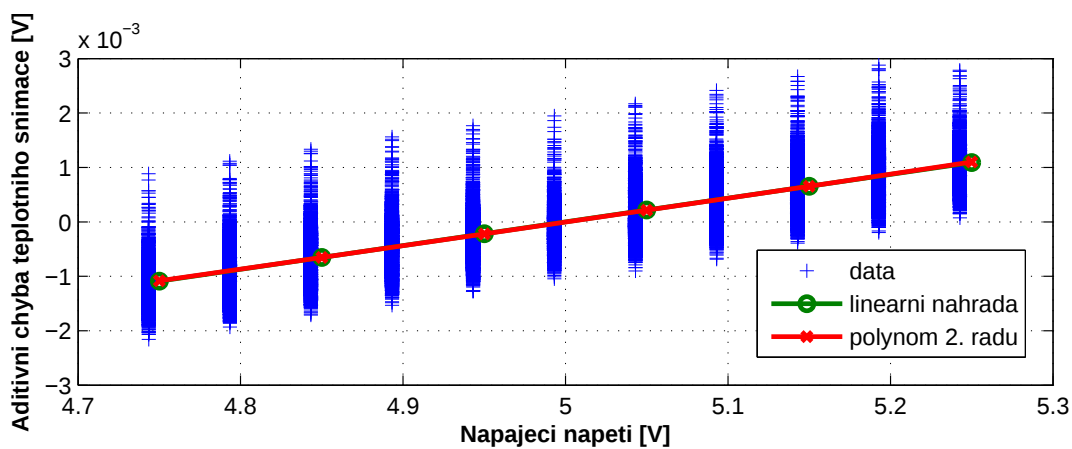
V grafech jsou z důvodu přehlednosti naměřené hodnoty spojeny přímkami, nicméně měření je zatíženo šumem, který způsobuje viditelné nespojitosti. Především u gyroskopů řady SAR150, které mají rozlišení teplotního snímače 1°C , se naměřené hodnoty pohybují pod touto hranicí, a proto nemá cenu uvažovat o modelu nelinearity.

5.1.2 *Závislost na napájecím napětí*

Řada prací se snaží dosáhnout co nejvěrnější aproximace teplotní závislosti MEMS gyroskopu složitými modely, například pomocí neuronové sítě [23, 25, 26], ale přínos těchto technik může být znehodnocen změnou vlastností teplotního snímače. Parametrem, který může mít potenciálně vliv na úspěšnost teplotní kompenzace, je schopnost teplotního snímače potlačit změny napájecího napětí.



Obr. 5.1: Nelinearita snímače teploty v MEMS gyroskopech



Obr. 5.2: Citlivost teplotního snímače na změnu napájecího napětí

Závislost aditivní chyby byla změřena pro sadu vzorků. Typický průběh pro gyroskop ADXRS613 zobrazuje graf na obr. 5.2. U tohoto vzorku byla stanovena citlivost $0.52^\circ\text{C}/\text{V}$. Měření je zatíženo značným šumem a případnou nelinearitu nelze rozlišit.

5.2 Statická převodní charakteristika

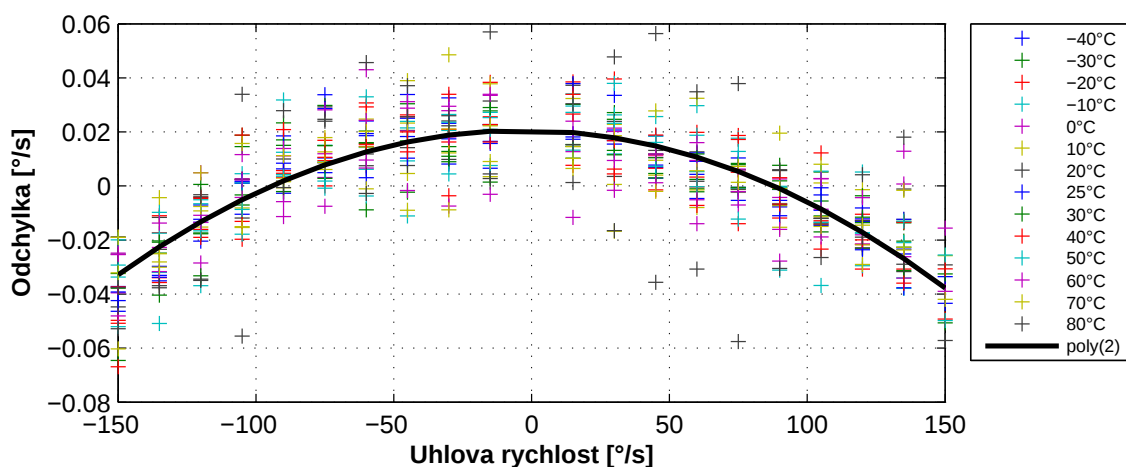
U jednotlivých vzorků byla změřena statická převodní charakteristika v teplotním rozsahu -40 až $+80^\circ\text{C}$. Posun nuly od nominální katalogové hodnoty se pohybuje v řádu do $90^\circ/\text{s}$ a odchylky převodní konstanty do 3%.

5.2.1 Chyba linearity

Typický průběh ukazuje obr. 5.3. Z naměřených hodnot je patrné, že měření je značně zatíženo stochastickými chybami gyroskopu a nepřesností akviziční karty. Vliv teploty na chybu linearity nebyl prokázán. U většiny snímačů s analogovým výstupem má nelinearita obdobný charakter blížící se parabole s vrcholem v bodě definovaném nulovou úhlovou rychlostí.

Významné nelineární prvky MEMS rezonátoru jsou pružiny a snímací elektrody. Nelinearita pružin způsobuje především změnu rezonanční frekvence, což má v případě gyroskopů pracujících mimo rezonanci výstupního rezonátoru zanedbatelný vliv na přenos úhlové rychlosti.

Většina návrhů využívá ke snímání pohybu výstupního rezonátoru principu deskových kondenzátorů s proměnnou vzdáleností v diferenciálním zapojení.



Obr. 5.3: Chyba linearity (ADXRS613)

Kapacity kondenzátorů jsou:

$$C_{S1} = \varepsilon S \frac{1}{x_0 - x}, \quad C_{S2} = \varepsilon S \frac{1}{x_0 + x} \quad (5.1)$$

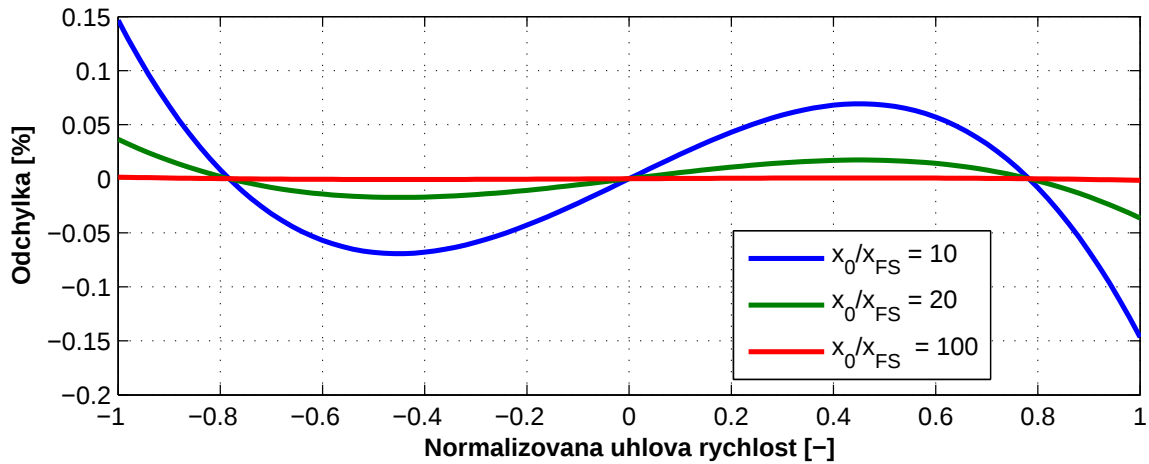
kde ε [F/m] je permitivita, S [m²] plocha elektrod, x_0 [m] mezera mezi elektrodami při nulovém vychýlení a x [m] snímaná výchylka. V diferenciálním zapojení platí pro proud:

$$i_C = \frac{dC_{S1}}{dt}U_1 - \frac{dC_{S2}}{dt}U_2 \quad (5.2)$$

kde U_1 a U_2 jsou stejnosměrná předpětí elektrod. Z rovnice vyplývá, že chyba linearity bude záviset na poměru mezi x_0 a x_{FS} [m], což je výchylka pro maximální úhlovou rychlost.

Graf na obr. 5.4 ukazuje simulovanou odchylku od lineární náhrady pro různé poměry mezery a max. výchylky deskového kondenzátoru. Otočení podle osy X závisí na fázovém posunu o 180° referenčního a vstupního signálu demodulátoru. Parazitní pohyb bude způsobovat posun charakteristiky v ose X, takže teoreticky lze dosáhnout průběhu, který odpovídá naměřeným hodnotám. Ovšem dle článku [5] se max. výchylky pohybují v řádu 10⁻¹⁰ m a při dané technologii výroby lze předpokládat mezeru přibližně 1 μm, což odpovídá poměru 10⁴, a proto by měla být chyba zanedbatelná.

Nelinearitu zbylé části měřicího řetězce nelze bez znalosti konkrétní struktury posoudit. Vzhledem k symetrii nelinearity dle osy Y lze předpokládat vnik nelinearity spíše v části za demodulátorem, protože zde již není směr otáčení rozlišen fází signálu.



Obr. 5.4: Nelinearita způsobená snímacím kondenzátorem

Chyba linearity se u testovaných vzorků pohybuje v rozsahu do 0.05%. U gyroskopů řady SAR150 je chyba na úrovni rozlišení interního A/D převodníku, a proto další korekce nemá praktický význam. U všech analogových snímačů lze charakteristiky aproximovat pomocí polynomu 2. řádu. Vyšší řád polynomu případně složitější struktura modelu nemá v tomto případě význam, protože hodnoty jsou zatíženy šumem a snížení odchylky je zanedbatelné.

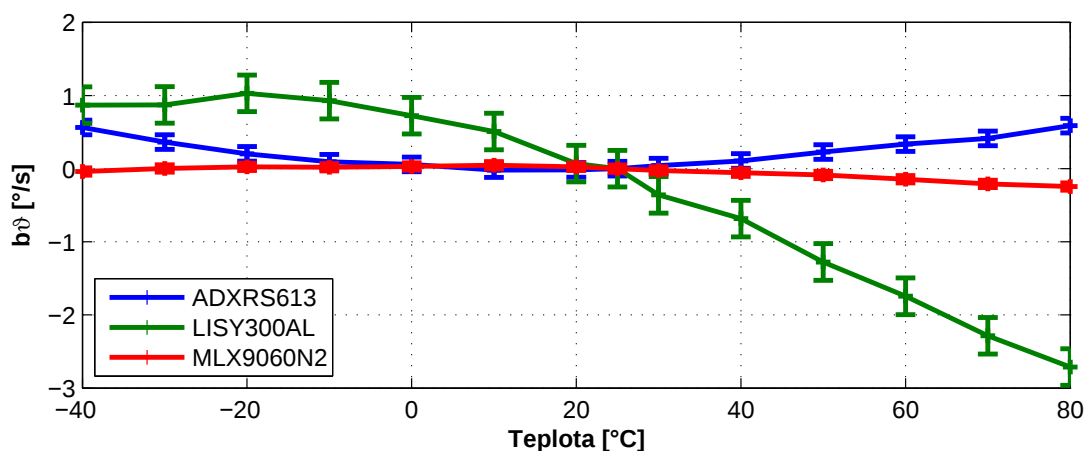
5.2.2 Závislost na teplotě

Klíčovou vlastností MEMS gyroskopů je citlivost parametrů na teplotu. Mezi hlavní parametry patří posun nuly a změna převodní konstanty.

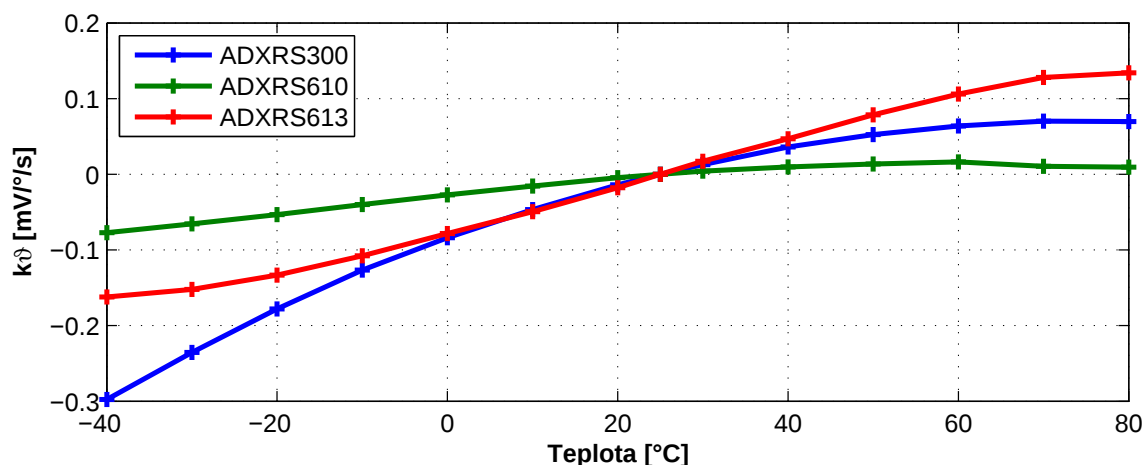
Jelikož je problematika teplotní kompenzace řešena při návrhu gyroskopu jak na úrovni mechanického elementu, tak na úrovni elektroniky a často se provádí i kalibrace každého kusu při výrobě, nemá smysl uvažovat o vnitřním popisu pouze na základě vstupně-výstupního pozorování bez detailní znalosti mechanické struktury a zapojení elektroniky. Jedná se tedy o výběr vhodné aproximace teplotní závislosti s ohledem na nejistotu měření.

Typické závislosti posunu nuly na teplotě ukazuje graf 5.5 a změnu převodní konstanty graf 5.6. Hlavní překážkou pro stanovení přesného modelu teplotní závislosti MEMS gyroskopu je nízká dlouhodobá opakovatelnost parametrů v celém teplotním rozsahu. Opakovatelnost posunu nuly a převodní konstanty se u gyroskopu ADXRS610 pohybuje na úrovni $\pm 0.25^\circ/s$ a $\pm 0.08\%$ (1σ).

Vzhledem k nízké opakovatelnosti naměřených hodnot posunu nuly je ve většině případů dostačující polynom 2. řádu, protože maximální odchylka klesne pod hodnotu $0.5^\circ/s$. Podobné výsledky platí pro převodní konstantu. Nicméně



Obr. 5.5: Teplota: posun nuly (ADXRS613, LISY300AL, MLX90609N2)



Obr. 5.6: Teplota: převodní konstanta (ADXRS300, ADXRS610, ADXRS613)

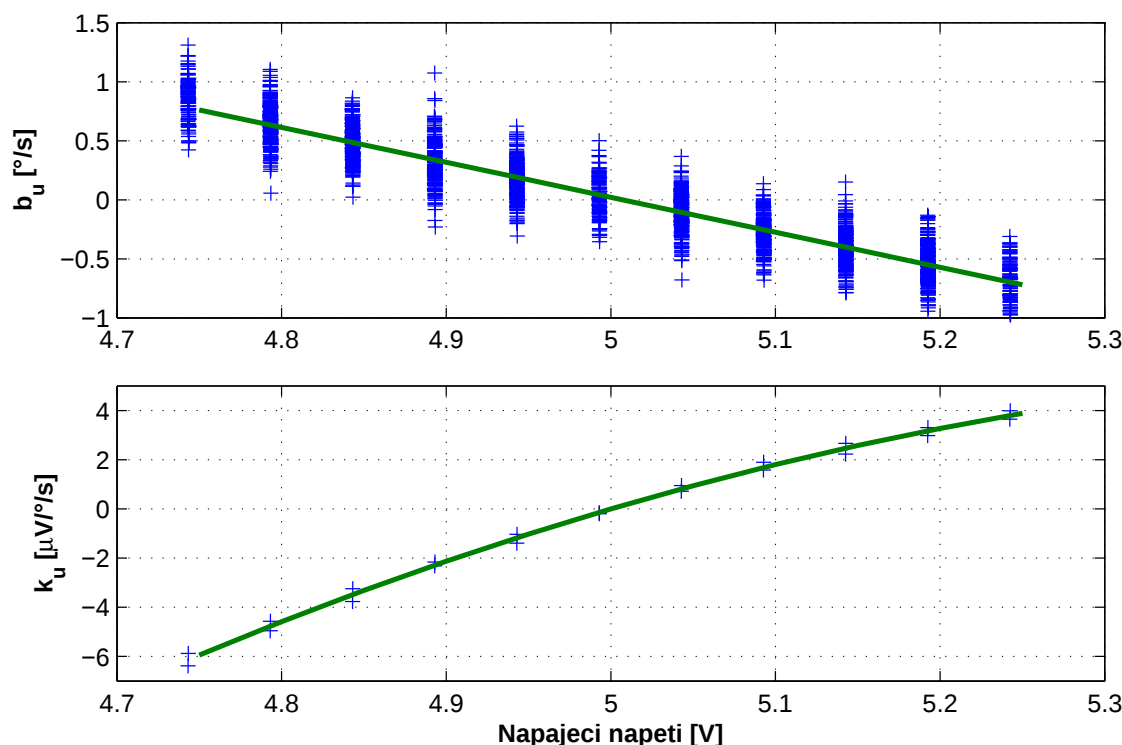
vzhledem k lepší opakovatelnosti výsledků lze uvažovat o aproximaci polynomm 2. až 3. řádu. Odchylka od nominální hodnoty pak ve většině případů klesne pod hodnotu 0.1%.

Mimo typy uvedené v tabulce byly testovány i gyroskopy Inven Sense IDG500 a IDG1215. U těchto vzorků byla zjištěna silná hystereze teplotních charakteristik. Vzhledem k problematickému modelování hysterezních charakteristik je lepší takovým snímačům vyhnout, protože existuje dostatek alternativních produktů s lepšími vlastnostmi.

5.2.3 Závislost na napájecím napětí

Dalším z parazitních vlivů je napájecí napětí. Výstupní signál při nulové úhlové rychlosti i převodní poměr je v ideálním případě konstantní. Prakticky však tyto parametry vykazují parazitní závislost na napájecím napětí. Tato citlivost vzniká díky nedokonalostem analogové části MEMS gyroskopu, která budí a snímá pohyb mechanického rezonátoru. Mezi zdroje patří především malé potlačení změn napájecího napětí u interních napěťových referencí a zesilovačů.

Typický průběh ukazuje obr. 5.7. Odhad posunu nuly je opět zatížen značným šumem, který způsobují stochastické vlastnosti gyroskopu. Ve všech případech charakteristiky dostatečně aproximuje lineární závislost. U převodní konstanty přináší lepší výsledky aproximace pomocí polynomu 2. řádu, ale odchylky jsou ve většině případů velmi malé a při reálném použití lze očekávat změny napájecího napětí v malém rozsahu kolem nominální hodnoty, a proto můžeme použít lineární náhradu.



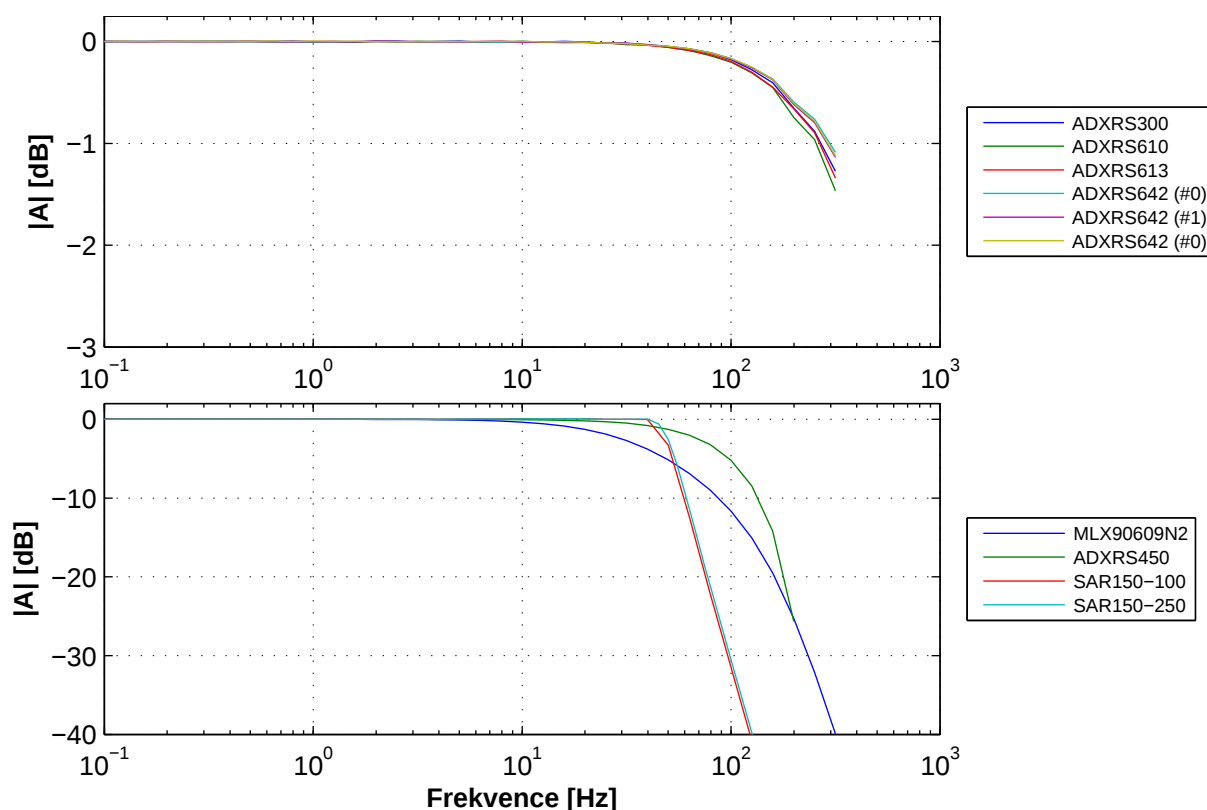
Obr. 5.7: Citlivost na napájecí napětí (ADXRS300)

Nejlepší výsledek dosahuje gyroskop ADXRS450 s digitálním výstupem, kde byl posun pod hranici rozlišení měření. U snímačů s analogovým výstupem se posun nuly pohybuje v řádu jednotek $^{\circ}/s/V$, což může způsobit významnou chybu. V případě převodní konstanty se citlivost pohybuje na úrovni $1\%/V$. Změny vlivem napájecího napětí mohou být srovnatelné s chybou linearity.

5.3 Dynamické vlastnosti

U MEMS gyroskopů pracujících v otevřené smyčce mimo rezonanční kmitočet výstupního rezonátoru určují dynamické parametry primárně vlastnosti mechanického elementu. Klíčovým parametrem je rozdíl rezonančních frekvencí vstupního a výstupního rezonátoru a dále jakost výstupního rezonátoru. Celkový přenos dále definují parametry elektronických obvodů, které zpracovávají výstupní signál z mechanického elementu. Jejich vliv je však obvykle malý v porovnání s vlastnostmi rezonátoru. Součástí synchronního demodulátoru musí být vždy filtr typu dolní propust, který zamezuje pronikání nežádoucích produktů směšování na výstup snímače.

Reálné vlastnosti vybraných gyroskopů shrnují grafy na obr. 5.8. Gyroskopy řady ADXRS s analogovým výstupem mají dle očekávání extrémně velkou



Obr. 5.8: Frekvenční charakteristika

šířku pásma, protože rezonátor pracuje při atmosferickém tlaku. V tomto případě šířku pásma omezuje analogový výstupní filtr. U gyroskopů s digitálním výstupem ADXRS450 a SAR150 je dolnofrekvenční filtr realizován číslicově. U všech testovaných gyroskopů charakteristiky nevykazují známky zvlnění či rezonančních přechmitů a dá se předpokládat, že dynamické vlastnosti přenosu úhlové rychlosti určuje především výstupní filtr.

Z pohledu teplotní kompenzace by měla být minimalizována časová konstanta mezi teplotním snímačem, MEMS elementem, a elektronikou aby nedocházelo k významným odchylkám mezi skutečnou a indikovanou hodnotou vlivem přechodových dějů při prudkých změnách teploty. Šíření tepla mezi mechanickým elementem a teplotním snímačem bude záviset na konstrukci gyroskopu. Testované gyroskopy pokrývají skupiny integrující elektroniku i mechanický element, aktivní zapouzdření a vertikální konfiguraci. U vzorků nebyly při max. teplotním gradientu $4^\circ\text{C}/\text{min}$ pozorovány dynamické vlastnosti mezi informací z interního teplotního snímače a posunem nuly gyroskopu. Výsledky naznačují, že u gyroskopů integrujících elektroniku i mechanický element od stejného pouzdra je tento jev zanedbatelný.

5.4 Stochastické vlastnosti

Prakticky se používané modely omezují na popis širokopásmového šumu a nestability nuly, protože tyto jevy způsobují hlavní chyby při inerciální navigaci.

Z důvodu využití modelu v systémech založených na KF se širokopásmový šum aproximuje jako bílý Gaussovský šum, jehož úroveň je neměnná, což ale neodpovídá fyzikální podstatě. Jednou z hlavních složek širokopásmového šumu je teplotní šum, který vzniká jak v mechanické tak i v elektronické části MEMS gyroskopu. Zdrojem mechanického teplotního šumu je tlumení rezonátoru. Propagaci na výstup MEMS gyroskopu popisuje např. článek [9]. Autor uvádí aproximaci závislosti ARW na teplotě a parametrech gyroskopu:

$$\Omega_{rw} \approx \sqrt{\frac{k_B T \omega_y}{A^2 M \omega_x^2 Q_y} \frac{1}{1 + \frac{\omega_d^2}{\gamma^2}}} \times 3437.7 \quad [^\circ/\sqrt{h}] \quad (5.3)$$

kde k_B je Boltzmanova konstanta, T absolutní teplota a ostatní hodnoty udávají parametry rezonátoru. Z rovnice vyplývá, že závislost ARW na teplotě je mocninná funkce s exponentem 1/2. Na úrovni elektronických obvodů způsobují teplotní šum rezistory či obvody se spínanými kapacitami. Výkonová spektrální hustota má obdobný tvar jako u mechanického termálního šumu:

$$S_R(\omega) = 2k_B T R, \quad -\infty < \omega < \infty \quad (5.4)$$

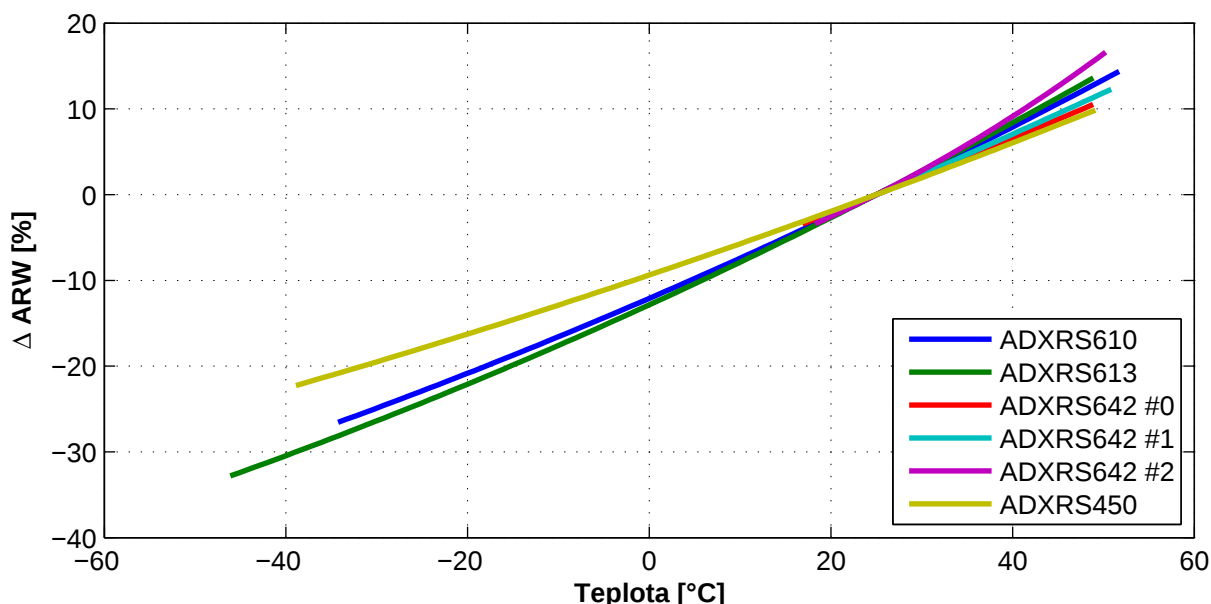
$$S_C(\omega) = 2k_B T / C, \quad -\infty < \omega < \infty \quad (5.5)$$

kde tlumení nahrazuje odpor R [Ω] či převrácená hodnota kapacity C [F].

U vybraných vzorků MEMS gyroskopů byla proměřena závislost širokopásmového šumu (ARW) na teplotě. Gyroskopy řady ADXRS vykazují rostoucí ARW v závislosti na teplotě, přičemž naměřené změny se pohybují v řádu 0.5 %/°C. Relativní změnu ARW ukazuje graf na obr. 5.9. Na charakteristiky byl aplikován model ve tvaru:

$$ARW(T) = a + b \cdot T^c \quad (5.6)$$

kde a představuje konstantní složku šumu nezávislou na teplotě, b míru teplotně závislé části a c je exponent s očekávanou hodnotou 1/2. Koeficient c však u naměřených dat vychází v rozsahu 2 až 6, což ukazuje na odlišné šíření šumu systémem. Z článku [5] vyplývá, že u gyroskopů ADXRS pracujících při atmosferickém tlaku dochází vlivem změny viskozity plynu k poklesu amplitudy kmitů budícího rezonátoru a tím změně převodní konstanty. Tento efekt



Obr. 5.9: Relativní změna ARW v závislosti na teplotě

výrobce kompenzuje teplotně závislým zesilovačem, který je zařazen před synchronním demodulátorem. Výsledná závislost širokopásmového šumu se tedy odchyluje od ideálního stavu, který popisuje rovnice 5.3.

U gyroskopů řady SAR150 je teplotní závislost ARW neprůkazná. Výstup snímače obsahuje rušivé harmonické složky, které mají v některých případech silný fázový šum, přičemž rozložení spektra závisí na teplotě.

5.5 Architektura modelu

V této kapitole bude rozšířen stávající stav o následující jevy, které byly identifikovány na základě měření reálných vlastností MEMS gyroskopů:

1. Posun nuly gyroskopu v závislosti na napájecím napětí.
2. Závislost převodní konstanty gyroskopu na napájecím napětí.
3. Posun nuly teplotního snímače v závislosti na napájecím napětí.
4. Závislost širokopásmového šumu (ARW) na teplotě.

Základní rovnici, která popisuje výstup gyroskopu na základě znalosti úhlové rychlosti, lze rozšířit na tvar:

$$\bar{\Omega}(\Omega) = \bar{K} R \Omega + b \quad (5.7)$$

kde diagonální matice $\bar{\mathbf{K}}$ udává citlivost v jednotlivých osách:

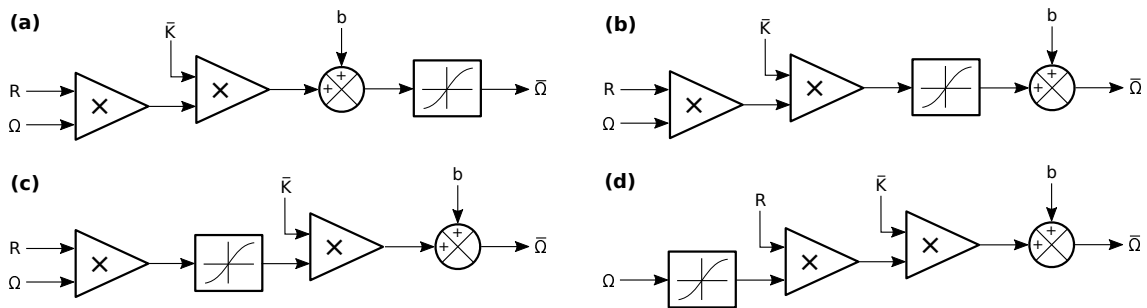
$$\bar{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} \sqrt{k_{xx}^2 + k_{xy}^2 + k_{xz}^2} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{k_{yx}^2 + k_{yy}^2 + k_{yz}^2} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{k_{zx}^2 + k_{zy}^2 + k_{zz}^2} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

a čtvercová matice $\mathbf{R}$ vyjadřuje kombinaci chyb zarovnání a vazeb mezi osami, přičemž platí:

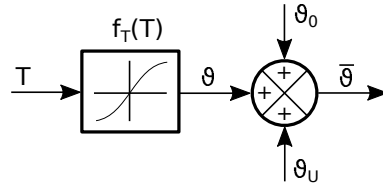
$$\mathbf{R} = \bar{\mathbf{K}}^{-1} \mathbf{K} \quad (5.9)$$

Další částí modelu je chyba linearity úhlové rychlosti. Z kapitoly 5.2.1 vyplývá, že lze použít opět pouze aproximaci. Otázkou zůstává vhodná integrace do vstupně-výstupního modelu dle rovnice (5.7). Prakticky je jisté, že nelinearity vznikají v různých částech řetězce gyroskopu, což bude ovlivňovat jejich přenos na výstup. Separace jednotlivých složek z naměřených dat bez znalosti vnitřní struktury gyroskopu není možná, a proto je nutné se zaměřit na dominantní složku.

Různé varianty naznačuje obr. 5.10. Naměřené průběhy při různých teplotách vylučují zařazení nelinearity na výstup gyroskopu (obr. 5.10a), protože koeficient $\mathbf{b}$ je teplotně závislý, což by způsobilo posun charakteristik v ose X. Další variantu ukazuje obr. 5.10b. Teplotně závislý je i koeficient $\bar{\mathbf{K}}$, což vede v tomto případě změnu měřítka nelinearity v ose Y. Vzhledem nízké teplotní závislosti převodní konstanty a velkému šumu není možné tuto variantu prokázat. Z tohoto důvodu se jeví jako nejvhodnější varianta dle obr. 5.10c, protože zařazení nelinearity před vazbu mezi osami a chybu zarovnání dle obr. 5.10d je sporné. V případě chyby zarovnání nemá toto uspořádání opodstatnění. Vazba mezi osami může mít nelineární průběh, nicméně dominantní složkou bude spíše chyba zarovnání. Upravený tvar rovnice (5.7) reflektující nelinearitu



Obr. 5.10: Varianty integrace chyby linearity do modelu



Obr. 5.11: Model teplotního snímače MEMS gyroskopu

dle obr. 5.10c má tvar:

$$\bar{\Omega} = \bar{\mathbf{K}} f_{\Omega}(\mathbf{R} \Omega) + \mathbf{b} \quad \text{kde} \quad f_{\Omega}(\hat{\Omega}) = \begin{bmatrix} f_{\Omega x}(\hat{\Omega}_x) \\ f_{\Omega y}(\hat{\Omega}_y) \\ f_{\Omega z}(\hat{\Omega}_z) \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

kde $f_{\Omega i}(\hat{\Omega}_i)$ jsou funkce popisující nelinearitu v jednotlivých osách.

Dalším krokem je nahrazení konstantních parametrů $\mathbf{b}$ a $\bar{\mathbf{K}}$ funkcemi popisující parazitní vlivy a případně stochastické procesy. Jak bylo zmíněno v úvodu kapitoly, model bude zahrnovat vliv teploty a napájecího napětí.

Pro parametry gyroskopu je směrodatná interní teplota mechanického elementu a elektroniky, která se může od okolní lišit. Důvodem je vlastní výkonová ztráta elektroniky a klíčovými faktory dále bude tepelná vodivost pouzdra a mechanické upevnění. Teplotu MEMS gyroskopu proto indikuje interní teplotní snímač, ale jeho výstup nebývá kalibrován. Rozbor v kapitole 5.1 ukazuje na nelinearitu a závislost na napájecím napětí. Situaci naznačuje obr. 5.11, kde T je interní teplota gyroskopu, $\bar{\vartheta}$ výstup teplotního snímače, ϑ_0 posun při referenčních podmínkách a ϑ_U posun závislý na napájecím napětí:

$$\vartheta_U = f_{\vartheta}(\bar{U}) \approx \theta_U \bar{U} \quad (5.11)$$

$$\bar{U} = U - U_0 \quad (5.12)$$

kde U značí napájecí napětí a U_0 jeho referenční hodnotu. Obecná funkce f_{ϑ} popisuje závislost na napájecím napětí, přičemž z kapitoly 5.1.2 vychází pro testované snímače jako dostačující lineární aproximace.

Prakticky je určení nelineární funkce f_T obtížné, a proto je výhodnější nelinearitu snímače teploty zahrnout do závislostí jednotlivých parametrů. Jsou-li teplotní charakteristiky pouze aproximací, není absolutní hodnota teploty podstatná, a proto lze zanedbat i převodní konstantu teplotního snímače. V takovém případě mohou být teplotní závislosti gyroskopu navázány na hodnotu ϑ . Pro model v reverzním tvaru pak není nutné znát funkci f_T a její

případné úpravy neovlivní funkci teplotní kompenzace gyroskopu. V případě přímé formy modelu není sice reprezentace správná, nicméně přesná hodnota teploty T stejně není v praxi známá a pro účely simulace jsou podstatné pouze její změny. Obecně lze tedy posun nuly a převodní konstantu gyroskopu vyjádřit jako funkce $\bar{U}$ a ϑ :

$$\bar{\Omega} = \bar{\mathbf{K}}(\bar{U}, \vartheta) \mathbf{f}_{\Omega}(\mathbf{R} \Omega) + \mathbf{b}(\bar{U}, \vartheta) \quad (5.13)$$

Dále je praktické klíčové parametry gyroskopu rozdělit na konstantní složku, která definuje nominální hodnotu při referenčních podmínkách, a na část závislou na parazitních vlivech a stochastických procesech:

$$\mathbf{b}(\bar{U}, \vartheta) = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_{\vartheta}(\vartheta) + \mathbf{b}_U(\bar{U}) + \mathbf{b}_{ARW}(\vartheta) \quad (5.14)$$

$$\bar{\mathbf{K}}(\bar{U}, \vartheta) = \mathbf{k}_0 + \mathbf{k}_{\vartheta}(\vartheta) + \mathbf{k}_U(\bar{U}) \quad (5.15)$$

V případě aproximace závislostí polynomem dostáváme rovnice pro jednotlivé složky:

$$\mathbf{b}_{\vartheta}(\vartheta) = \sum_{j=1}^{n_{b\vartheta}} (\beta_{\vartheta j} \vartheta^j), \quad \mathbf{b}_U(\bar{U}) = \sum_{j=1}^{n_{kU}} (\beta_{Uj} \bar{U}^j) \quad (5.16)$$

$$\mathbf{k}_{\vartheta}(\vartheta) = \sum_{j=1}^{n_{k\vartheta}} (\kappa_{\vartheta j} \vartheta^j), \quad \mathbf{k}_U(\bar{U}) = \sum_{j=1}^{n_{kU}} (\kappa_{Uj} \bar{U}^j) \quad (5.17)$$

kde β a κ jsou vektory koeficientů a n řád příslušného polynomu. Vzhledem k definici proměnných $\bar{U}$ a ϑ jako odchylek od referenčních hodnot, nemají polynomy koeficient s indexem nula. Ze stochastické části obsahuje rovnice (5.14) pouze širokopásmový šum (ARW), který je závislý na teplotě. V případě modelu s diskrétním časem platí:

$$\mathbf{b}_{ARW}(\vartheta) = \mathbf{w} \left(\mathbf{B}_{\vartheta}(\vartheta) \sqrt{f_s} \right) \quad (5.18)$$

kde $\mathbf{w}(\sigma)$ je bílý Gaussovský šum se směrodatnou odchylkou σ , f_s vzorkovací frekvence a $\mathbf{B}(\vartheta)$ funkce popisující závislost ARW na ϑ . Pro aproximaci polynomem s řádem $n_{\alpha\vartheta}$ může být vyjádřena jako:

$$\mathbf{B}_{\vartheta}(\vartheta) = \sum_{j=0}^{n_{\alpha\vartheta}} (\mathbf{B}_{\vartheta j} \vartheta^j) \quad (5.19)$$

kde $\mathbf{B}_{\vartheta j}$ jsou koeficienty polynomu, přičemž $\mathbf{B}_{\vartheta 0}$ odpovídá ARW při referenční teplotě.

Ostatní jevy jako opakovatelnost, nestabilita či náhodný posun nejsou zmíněny z důvodu přehlednosti, protože se od běžně používaných modelů neliší. Jejich reprezentaci uvádí např. [32].

6 ZÁVĚR

Jako hlavní zdroje nejistot měření lze označit stochastické vlastnosti MEMS gyroskopů, teplotu a u snímačů s analogovým výstupem měřicí přístroj.

Výsledky měření naznačují, že u MEMS gyroskopů nelze pozorovat shodné vlastnosti dané MEMS technologií a zobecnění není možné ani na úrovni typové řady, protože mezi jednotlivými kusy snímačů existují podstatné rozdíly. Bez znalosti vnitřní struktury gyroskopu lze na základě vstupně-výstupních charakteristik přistoupit pouze k aproximaci jednotlivých jevů.

Z pohledu teplotních charakteristik jsou podstatné vlastnosti interního teplotního snímače. Měření ukazují závislost na napájecím napětí, což může být limitujícím faktorem volby modelu pro teplotní kompenzaci.

Další významný jev je posun nuly gyroskopu způsobený změnou napájecího napětí. Tento efekt může způsobit chybu srovnatelnou s vlivem teploty či se stochastickými jevy. Klíčovou roli proto hrají parametry napájecího zdroje, jehož stabilita může významně ovlivnit výstup gyroskopu.

Vliv napájecího napětí na převodní konstantu vychází u měřených vzorků jako zanedbatelný stejně jako chyba linearit, protože v obou případech jsou tyto jevy na úrovni nejistoty měření.

V oblasti dynamických vlastností nebyly identifikovány významné jevy, které by ovlivňovaly přenos úhlové rychlosti. Výsledky měření ukazují, že dominantní je v tomto případě charakteristika výstupního filtru.

Ze stochastických jevů byla prokázána závislost širokopásmového šumu (ARW) na teplotě u gyroskopů řady ADXRS. Teoreticky by měla závislost odpovídat mocninné funkci s exponentem $1/2$. Naměřené hodnoty však tomuto předpokladu neodpovídají, protože zmíněné gyroskopy mají integrovaný teplotně závislý zesilovač, který kompenzuje změnu převodní konstanty v závislosti na teplotě. Výsledná závislost ARW je pak dána kombinací těchto charakteristik a lze ji aproximovat polynomem 2. řádu.

Na základě naměřených vlastností byl sestaven rozšířený model MEMS gyroskopu, který zohledňuje změnu parametrů v závislosti na napájecím napětí a změnu ARW v závislosti na teplotě. Tvar modelu umožňuje snadnou parametrizaci převodní konstanty a posunu nuly dalšími jevy. Ve finální podobě jsou jednotlivé závislosti aproximovány pomocí polynomů.

LITERATURA

- [1] IEEE Std 647-2006. *IEEE Standard for Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Laser Gyros*. New York, NY, USA: IEEE, 2006.
- [2] IEEE Std 952-1997 (R2008). *IEEE Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros*. New York, NY, USA: IEEE, 2008.
- [3] IEEE Std 1431-2004. *IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros*. New York, NY, USA: IEEE, 2004.
- [4] IEEE Std 1554-2005. *IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis*. New York, NY, USA: IEEE, 2005.
- [5] GEEN, J. A., S. J. SHERMAN, J. F. CHANG a S. R. LEWIS. Single-chip surface-micromachined integrated gyroscope with 50°/hour root allan variance. *2002 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers (Cat. No.02CH37315)*. 2002, Volume: 37, Issue: 12.
- [6] GREIFF, P., B. BOXENHORN, T. KING a L. NILES. Silicon monolithic micromechanical gyroscope. In: *TRANSDUCERS '91: 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers*. San Francisco, CA, USA: IEEE, 1991, s. 966-968. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=149051>
- [7] DUWEL, Amy a Niel BARBOUR. MEMS Development at Draper Laboratory. In: *SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics* [online]. 2003 [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: <http://sem-proceedings.com/03s/sem.org-2003-SEM-Ann-Conf-s17p01-Invited-MEMS-Development-Draper-Laboratory.pdf>
- [8] KEMPE, Volker. *Inertial MEMS: principles and practice*. New York: Cambridge University Press, 2011, xiv, 475 p. ISBN 05-217-6658-3.
- [9] LELAND, Robert P. Mechanical-thermal noise in MEMS gyroscopes. In: *IEEE Sensors Journal*. 2005, s. 1-38. DOI: 10.1007/978-0-387-09536-3_4.
- [10] LAWRENCE, Anthony. *Modern inertial technology: navigation, guidance, and control*. Second Edition. New York: Springer, 1998. Mechanical engineering series. ISBN 978-0-387-98507-7.
- [11] TITTERTON, David a John WESTON. *Strapdown inertial navigation technology*. 2nd ed. Stevenage: Institution of Electrical Engineers, 2004. ISBN 08-634-1358-7.
- [12] AGGARWAL, Priyanka, Zainab SYED, Aboelmagd NOURELDIN a Naser EL-SHEIMY. *MEMS-based Integrated Navigation*. Norwood: Artech House, 2010. GNSS technology and applications series (Artech House). ISBN 978-1-60807-043-5.
- [13] ROGERS, Robert M. *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*. 2nd ed. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003, xvi, 330 p. ISBN 15-634-7656-8.
- [14] OLIVARES, Alberto, Gonzalo OLIVARES, J. M. GORRIZ a J. RAMIREZ. High-efficiency low-cost accelerometer-aided gyroscope calibration. In: *2009 International Conference on Test and Measurement*. 2009, s. 354-360.
- [15] SHEN, C. S., C. J. CHEN a H. J. HUANG. A new calibration method for mems inertial sensor module. In: *Advanced Motion Control: 11th IEEE International Workshop on*. 2010, s. 106-111.
- [16] BEKKENG, J.K. Calibration of a Novel MEMS Inertial Reference Unit. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2009, s. 1967-1974.
- [17] AGGARWAL, P., Z. SYED a N. EL-SHEIMY. Thermal Calibration of Low Cost MEMS Sensors for Land Vehicle Navigation System. In: *IEEE Vehicular Technology Conference: VTC Spring 2008*. 2008, s. 2859-2863.

- [18] EL-DIASTY, M., A. EL-RABBANY a S. PAGIATAKIS. Temperature variation effects on stochastic characteristics for low-cost MEMS-based inertial sensor error. In: *Measurement Science and Technology*. 2007-11-01, s. 3321-3328.
- [19] YUKSEL, Yigiter, Naser EL-SHEIMY a Aboelmagd NOURELDIN. Error modeling and characterization of environmental effects for low cost inertial MEMS units. In: *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*. IEEE, 2010, s. 598-612.
- [20] DACHUAN, Liu, Chi XIAOZHU, Cui JIAN, Lin LONGTAO, Zhao QIANCHENG, Yang ZHENCHUAN a Yan GUIZHEN. Research on temperature dependent characteristics and compensation methods for digital gyroscope. In: *2008 3rd International Conference on Sensing Technology*. IEEE, 2008, s. 273-277.
- [21] AGGARWAL, P., Z. SYED, X. NIU a N. EL-SHEIMY. Cost-effective testing and calibration of low cost mems sensors for integrated positioning, navigation and mapping systems. In: *XXIII FIG Congress: Shaping the Change*. Munich, Germany, 2006.
- [22] HONGWEI, Sun, Fang JIANCHENG a Li JIANLI. Temperature errors modeling for micro inertial measurement unit using multiple regression method. In: *Proceedings of the International Symposium on Intelligent Information Systems and Applications*. Qingdao, China, 2009, s. 411-415.
- [23] ZHANG, Qintuo, Zhenfan TAN a Lidong GUO. Compensation of Temperature Drift of MEMS Gyroscope Using BP Neural Network. In: *2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science*. 2009.
- [24] NIU, Xiaoji, You LI, Hongping ZHANG, Qingjiang WANG a Yalong BAN. Fast Thermal Calibration of Low-Grade Inertial Sensors and Inertial Measurement Units. In: *Sensors*. 2013, s. 12192-12217.
- [25] SHIAU, Jaw Kuen, Der Ming MA, Chen Xuan HUANG a Ming Yu CHANG. MEMS Gyroscope Null Drift and Compensation Based on Neural Network. In: *Advanced Materials Research*. 2011, s. 2077-2081.
- [26] DING, Jicheng, Jian ZHANG, Weiquan HUANG a Shuai CHEN. Laser Gyro Temperature Compensation Using Modified RBFNN. In: *Sensors*. 2014, s. 18711-18727.
- [27] SAUKOSKI, Mikko. *System and Circuit Ddesing for a Capacitive MEMS Gyroscope*. Helsinki, 2008. Disertační práce. Helsinki University of Technology.
- [28] ALPER, Saíd Emre. *MEMS Gyroscopes for Tactical-Grade Inertial Mmeasurement Applications*. 2005. Disertační práce. Middle East Technical University.
- [29] ASLAN, Gökçen a Afşar SARANLI. Characterization and calibration of mems inertial measurement units. In: *16th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2008)*. Lausanne, Switzerland, 2008.
- [30] BANCROFT, Jared B. a Gerard LACHAPELLE. Estimating MEMS gyroscope g-sensitivity errors in foot mounted navigation. In: *2012 Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation, and Location Based Service (UPINLBS)*. Helsinki, 2012.
- [31] WEINBERG, Harvey. ANALOG DEVICES. *Gyro Mechanical Performance: The Most Important Parameter: Technical Article MS-2158*. 2011, 15 s. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/MS-2158.pdf>
- [32] NASSAR, Hameh. *Improving the Inertial Navigation System (INS) Error Model for INS and INS/DGPS Applications*. Calgary, 2003. Disertační práce. University of Calgary.
- [33] SHIN, Eun-Hwan. *Estimation Techniques for Low-Cost Inertial Navigation*. Calgary, 2005. Disertační práce. University of Calgary.
- [34] HONEYWELL. *HG1930 Inertial Mesurement Unit Datasheet*. Rev E713908-2012. 2012. [cit. 4.4.2015]. Dostupné z: http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Missiles-Munitions/HG1930_Datasheet.pdf
- [35] STOCKWELL, Walter. CROSSBOW. *Bias Stability Measurement: Allan Variance*. [cit. 4.4.2015]. Dostupné z: http://www.moog-crossbow.com/Literature/Application_Notes_Papers/Gyro_Bias_Stability_Measurement_using_Allan_Variance.pdf

ŽIVOTOPIS AUTORA

Osobní data	
Jméno	Martin Vágner
Narozen	1985, Šumperk
Adresa	Dolnomlýnská 9, 78701 Šumperk
Kontakt	vagnerm.cz[zavináč]gmail[tečka]com
Vzdělání	
2010 – 2015	Doktorské studium VUT v Brně, FEKT, Ústav automatizace a měřicí techniky Téma: Návrh a kalibrace rozšířeného modelu MEMS gyroskopu
2008 – 2010	Magisterské studium VUT v Brně, FEKT, Ústav automatizace a měřicí techniky Téma: Vzdálená správa jednočipových systémů
2005 – 2008	Bakalářské studium VUT v Brně, FEKT, Ústav automatizace a měřicí techniky Téma: Malý datalogger s flash kartou
Praxe	
od 2014	Honeywell International s.r.o., Advanced Technology Europe, Sensors and Navigation group Pozice: Scientist II
2011 – 2014	VUT v Brně, Centrum výzkumu a vývoje obnovitelných zdrojů energie Pozice: Výzkumný asistent
Výuka	
	Laboratorní cvičení předmětu „Měření fyzikálních veličin“ Laboratorní cvičení předmětu „Senzory neelektrických veličin“ Laboratorní cvičení předmětu „Inteligentní a polovodičové senzory“

ABSTRAKT

Práce se zabývá metodikou měření parametrů MEMS gyroskopů a stanovením vstupně-výstupního modelu. V úvodu je stručně rozebrán stávající přístup k modelování MEMS gyroskopů a určení jejich parametrů. Druhá část se podrobně věnuje metodice měření a identifikaci zdrojů nejistot, které ovlivňují odhad parametrů. V rámci metodiky měření jsou zdůrazněny kritické body a vliv jednotlivých zdrojů nejistot je ukázán na základě naměřených dat či simulací. Vlastnosti MEMS gyroskopů jsou prakticky demonstrovány na skupině různých typů snímačů. Výsledky ukazují významný vliv napájecího napětí na posun nuly gyroskopu a interního teplotního snímače. Tento jev může způsobit chybu srovnatelnou s teplotní závislostí či stochastickými vlastnostmi, ale není v literatuře popsán. Druhým jevem, který není stávajícími modely uvažován, je závislost širokopásmového šumu (ARW) na teplotě. Na základě těchto poznatků je v poslední části rozšířen běžně používaný model MEMS gyroskopu o závislost parametrů na napájecím napětí a závislost širokopásmového šumu na teplotě. Tvar modelu je zvolen s ohledem na jednoduché porovnání základních parametrů a v případě potřeby na snadné rozšíření o další vlivy.

ABSTRACT

The thesis is aimed on measurement and modeling of MEMS gyroscopes based on input-output characteristics. The first part briefs the state of the art. The second part is dedicated to measurement methodology. Critical points and sources of uncertainty are discussed and evaluated using measurements or simulations. The last part shows key characteristics of MEMS gyroscopes based on the survey of a group of different sensor types. The results have revealed significant influence of supply voltage that causes bias drift of the gyroscope and bias drift of the internal temperature sensor. The error can be comparable to temperature drift; however, this effect is not addressed in the literature. The second observed effect is temperature dependency of angle random walk. In the last part, a general model of a MEMS gyroscope is rewritten to reflect observed effects. Moreover, the structure is selected to be easily extendable and the coefficients are expressed to allow a comparison of nominal parameters of different sensors.