

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ ZMĚN PARAMETRŮ MEMS GYROSKOPŮ

MEASUREMENT OF MEMS GYROSCOPE PARAMETER CHANGES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Raichl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Kunz

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Petr Raichl

ID: 182993

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Měření změn parametrů MEMS gyroskopů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je změřit vybrané parametry MEMS gyroskopů před a po životnostních zkouškách a tyto změny vyhodnotit. Zadáání lze shrnout do následujících bodů:

1. Zpracujte přehled parametrů gyroskopů.
2. Nastudujte problematiku měření parametrů gyroskopů.
3. Navrhněte vhodný měřicí řetězec s využitím měřicích karet NI.
4. Seznamte se s programovacím prostředím LabVIEW a navrhněte program, který bude umět minimálně:
 - Zpracování analogových i digitálních výstupů MEMS gyroskopů.
 - Měřit veličiny ovlivňující parametry MEMS gyroskopů (teplota, napájecí napětí,...) a zpracovat je.
 - S využitím dodaných knihoven vypočítat vybrané parametry MEMS gyroskopů.
 - Ukládání naměřených a zpracovaných dat v .tdms formátu včetně metadat.
5. Vyhodnotit změny parametrů MEMS gyroskopů před a po životnostních zkouškách.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] AGGARWAL, Priyanka. MEMS-based integrated navigation. Boston: Artech House, c2010. GNSS technology and applications series. ISBN 978-160-8070-435.

[2] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. Začínáme s LabVIEW. Ilustroval Viktorie VLACHOVÁ. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Jan Kunz

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá určováním parametrů MEMS gyroskopů pomocí Allanovy odchylky. V úvodu je popsán princip gyroskopů. V první části jsou popsány deterministické a stochastické parametry. Také jsou popsány metody určování těchto parametrů. Praktická část popisuje měření stochastických parametrů s využitím Allanovy odchylky. Dále se práce zabývá určením změn stochastických parametrů po vibračních a rázových zkouškách.

KLÍČOVÁ SLOVA

MEMS, gyroskop, Allanova odchylka, LabView, stochastické parametry, deterministické parametry, run-to-run, změny stochastických parametrů

ABSTRACT

The thesis is aimed on determination of parameters of MEMS gyroscopes with Allan variance. In the introduction, there is principle of gyroscopes described. The first part describes deterministic and stochastic parameters. Methods for determining these parameters are also described. In the practical part, stochastic parameters of two gyroscopes are determined with Allan variance. In the next part, thesis describes determination of changes of stochastic parameters after vibrations and shocks.

KEYWORDS

MEMS, gyroscope, Allan variance, LabView, stochastic errors, deterministic errors, run-to-run, changes of stochastic parameters

RAICHL, Petr. *Měření změn parametrů MEMS gyroskopů*. Brno, Rok, 65 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. Jan Kunz

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Měření změn parametrů MEMS gyroskopů“ 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Kunzovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	11
1 Teoretická část	12
1.1 Gyroskopy	12
1.1.1 Mechanické gyroskopy	12
1.1.2 Optické gyroskopy	12
1.1.3 MEMS gyroskopy	14
1.2 Deterministické parametry	16
1.2.1 Bias	16
1.2.2 Citlivost	17
1.2.3 Nonorthgonality	18
1.2.4 Run-To-Run	19
1.2.5 In-Run stability	19
1.3 Metody popisu stochastických parametrů	19
1.3.1 Autokorelační funkce	19
1.3.2 Výkonová spektrální hustota	20
1.3.3 Allanova odchylka	20
2 Praktická část	27
2.1 LabVIEW	27
2.2 Měřicí řetězec	27
2.2.1 Požadavky na program	27
2.2.2 Použitý hardware	29
2.2.3 Realizace v LabVIEW	33
2.2.4 Uživatelské rozhraní	34
2.3 Měření parametrů pomocí Allanovy odchylky	34
2.3.1 Schéma měření	35
2.3.2 Kontrola softwaru a hardwaru	35
2.3.3 První měření	38
2.3.4 Vibrační zkoušky	42
2.3.5 Měření po vibračních zkouškách 10g	42
2.3.6 Měření po vibračních zkouškách 20g	45
2.3.7 Měření - rázy	52
2.4 Měření parametru run-to-run	57
2.4.1 Schéma měření	57
2.4.2 Run-to-Run pro snímače ADXRS610, ADXRS613	57
2.4.3 Zhodnocení	59

3 Závěr	60
Literatura	62
Seznam příloh	64
A Obsah přiloženého CD	65
A.1 allan_odchylka	65
A.2 runtorun	65
A.3 zpracovani_labview	65
A.4 zpracovani_matlab	65

Seznam obrázků

1.1	Mechanický gyroskop	12
1.2	Optický gyroskop - fog	13
1.3	Optický gyroskop - rlg	14
1.4	Struktura MEMS gyroskopu	14
1.5	Příklad funkce MEMS gyroskopu	15
1.6	Tuning Fork Struktura MEMS gyroskopu	15
1.7	Bias akcelerometru	16
1.8	Statické char. s různými konstantami lineárních funkcí	17
1.9	Nonorthgonalita způsobena výrobní nedokonalostí	18
1.10	Gyro Run-To-Run	19
1.11	Gyro Bias Stability	20
1.12	Příklad PSD křivky	21
1.13	Allanova odchylka - varianta bez překryvu	21
1.14	Allanova odchylka - varianta s úplným překryvem	22
1.15	Allanova odchylka - varianta s částečným překryvem	22
1.16	Vliv překryvu skupin	22
1.17	Ukázka Allanovy křivky s určenými parametry	23
1.18	Určení kvantizačního šumu	24
1.19	Určení ARW	24
1.20	Určení Rate Random Walk	25
1.21	Určení Rate Ramp	26
2.1	Struktura tdms souboru	28
2.2	Ukázka struktury tdms souboru	30
2.3	Měřicí karta NI-9234	31
2.4	Pt100 ve čtyřvodičovém zapojení	32
2.5	Dělič napětí	33
2.6	Stavový diagram	34
2.7	Ukázka uživatelského rozhraní	35
2.8	Schéma měření	35
2.9	Kontrolní měření	36
2.10	Napětí při měření na stole	37
2.11	Vývoj teploty při měření na stole	37
2.12	Měření šumu měřicí karty	38
2.13	Allanova odchylka pro ADXRS610	39
2.14	Allanova odchylka pro ADXRS613	39
2.15	Srovnání měření v teplotní komoře a mimo komoru	40
2.16	Napětí při měření v teplotní komoře	41

2.17	Korelace Allanovy odchylky s napájecím napětím	41
2.18	Allanova odchylka po vibračních zkouškách pro ADXRS610	42
2.19	Allanova odchylka po vibračních zkouškách pro ADXRS613	43
2.20	Napětí při měření v teplotní komoře - 10g	44
2.21	Allanovy odchylky napětí - 10g	44
2.22	Allanova odchylka po vibračních zkouškách 20g pro ADXRS610 . . .	45
2.23	Allanova odchylka po vibračních zkouškách 20g pro ADXRS613 . . .	46
2.24	Vývoj teploty v teplotní komoře - 20g	46
2.25	Napětí při měření v teplotní komoře - 20g	47
2.26	Allanovy odchylky napětí - 20g	47
2.27	Korelace Allanovy odchylky snímačů s napětím - 20g	48
2.28	Allanova odchylka se zdrojem Agilent E3615 pro ADXRS610	49
2.29	Allanova odchylka se zdrojem Agilent E3615 pro ADXRS613	49
2.30	Napětí při měření v teplotní komoře	50
2.31	Vývoj teploty v teplotní komoře - 20g 2. zdroj	51
2.32	Allanova odchylka zdrojů při jednotlivých měřeních	51
2.33	Vývoj napětí na výstupu stabilizátoru Lm 2936.	52
2.34	Vývoj napětí zdroje v Pxi 4130	53
2.35	Allanova odchylka zdrojů při jednotlivých měřeních	53
2.36	Vývoj teploty v teplotní komoře po rázových zkouškách	54
2.37	Vývoj teploty mimo teplotní komoru	55
2.38	Allanova odchylka pro jednotlivé měření snímače ADXRS610	55
2.39	Časový průběh napětí na výstupu snímače ADXRS610	56
2.40	Allanova odchylka pro jednotlivé měření snímače ADXRS613	56
2.41	Schéma měření	57
2.42	Run-to-Run pro snímač ADXRS610	58
2.43	Run-to-Run pro snímač ADXRS613	58

Seznam tabulek

2.1	Náležitosti části Data Set (File)	29
2.2	Náležitosti části Channel Group(s)	29
2.3	Náležitosti části Channel(s)	29
2.4	Parametry MEMS gyroskopů	30
2.5	Parametry měřicí karty NI 9234	31
2.6	Parametry zdroje Agilent E3631A	32
2.7	Parametry zdroje Agilent E3615	32
2.8	Určené stochastické parametry	38
2.9	Statistika parametru Run-to-Run	57

Úvod

V dnešní době je jedním z hlavních cílů elektrotechniky miniaturizace. Miniaturizaci umožňuje mmj. technologie Micro-Electro-Mechanical Systems, neboli MEMS technologie. MEMS technologie se stále více uplatňuje v mnoha oblastech průmyslu i spotřební elektroniky. Umožňuje vyměnit mnohdy velmi masivní zařízení za zařízení s menšími rozměry, zvýšenou životností a nižší spotřebou energie. Možnost výroby ve velkých sériích má pozitivní vliv na cenu těchto zařízení.

Tato práce se zabývá MEMS gyroskopy, které se používají pro měření úhlové rychlosti. To se týká spotřební elektroniky (mobilní telefony, tablety, ...), ale také průmyslu. V poslední době, především s rozšířením dronů, se MEMS gyroskopy začínají uplatňovat i v oblasti inerciální navigace. Jejich masivnímu uplatnění však brání horší vlastnosti než např. u optických gyroskopů. K těmto vlastnostem patří např. drift parametrů s teplotou a napájecím napětím. V této oblasti je velmi důležité znát parametry snímačů a vědět, jak se tyto parametry mění v průběhu jejich používání. Cílem této práce je popsat parametry MEMS gyroskopů a následně změřit a vyhodnotit vybrané stochastické parametry před a po vibračních a rázových zkouškách. Práce je členěna do tří částí. V první části je popsána teorie, konkrétně princip, parametry MEMS gyroskopů a metody, pomocí kterých se určují stochastické parametry MEMS gyroskopů. V druhé části je popsán program pro sběr dat potřebných pro výpočet Allanovy odchylky a pro měření parametru Run-to-Run. Také je popsáno vlastní měření. V poslední části je vyhodnocení naměřených dat, tedy stanovení stochastických parametrů MEMS gyroskopů.

1 Teoretická část

V této části jsou popsány parametry gyroskopů. Podle těchto parametrů vybírá návrhář snímače pro konkrétní aplikace. Tyto parametry je také možné použít pro kompenzační metody, pomocí kterých lze dosáhnout lepších výsledků.

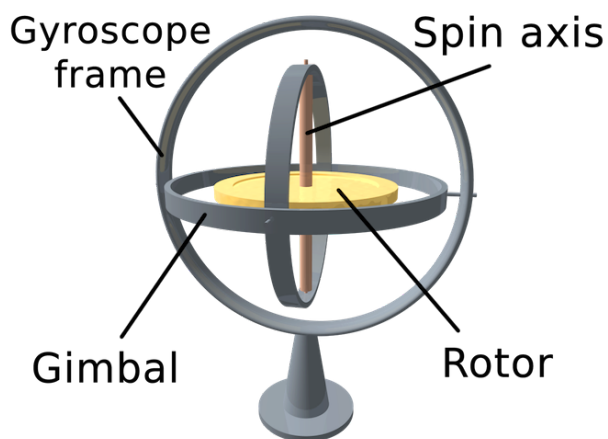
1.1 Gyroskopy

Gyroskopy jsou snímače pro měření úhlové rychlosti a použití v navigaci. Dnes můžeme gyroskopy rozdělit do 3 hlavních kategorií:

- Mechanické gyroskopy
- Optické gyroskopy
- MEMS gyroskopy

1.1.1 Mechanické gyroskopy

Mechanické gyroskopy jsou složeny ze setrvačníku umístěného ve dvouosém kardanově závěsu, tvořeného dvěma osově kolmými otočnými rámy. Pokud je rotor roztočen dostatečně velkou rychlostí, má rotující kolo konstantní globální orientaci i když dochází ke změně úhlu vůči vnějšímu rámcí. Z úhlů se poté určuje orientace [12].



Obr. 1.1: Mechanický gyroskop

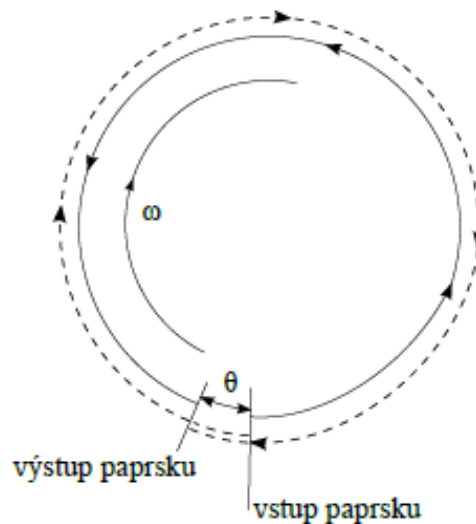
[13]

1.1.2 Optické gyroskopy

Optické gyroskopy tvoří 2 významné skupiny:

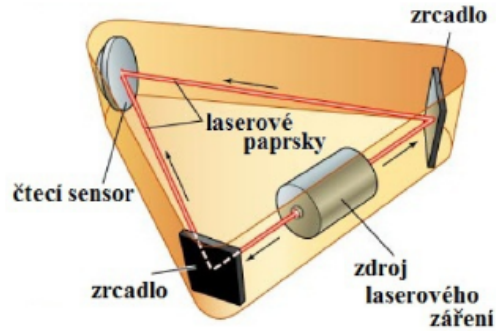
- Optické vláknové gyroskopy
- Kruhové laserové gyroskopy

Optické vláknové gyroskopy (FOG - fibre optic gyroscope) využívají vlnové vlastnosti světla a tzv. Sagnacův jev - při rotaci kruhového vlnovodu, v němž proti sobě obíhají, obr. 1.2, je obvodová rychlost svazku v jednom směru zvyšována a pro opačný směr snižována přibližně o hodnotu $v = \Omega R$. V místě setkání paprsků vzniká fázový posuv a dochází k interferenci paprsků. Intenzita výsledného paprsku je závislá na úhlové rychlosti. Přesnost tohoto typu gyroskopu roste s délkou optického vlákna. S délkou optického vlákna však roste také celková velikost snímače [14]. Druhým typem optického gyroskopu je kruhový laserový gyroskop (RLG - ring laser gyroscope). Princip je stejný, jen se místo cívky s optickým vláknem používá systém zrcadel [14], viz. obr. 1.3.



Obr. 1.2: Optický gyroskop - fog

[14]



Obr. 1.3: Optický gyroskop - rlg

[14]

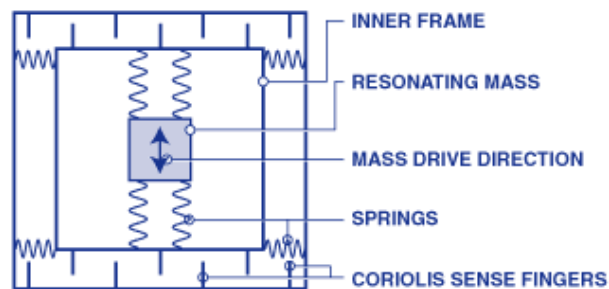
1.1.3 MEMS gyroskopy

Obecně pracují na principu Coriolisovy síly.

$$\vec{F} = -2m(\vec{\omega} \times \vec{v}) \quad (1.1)$$

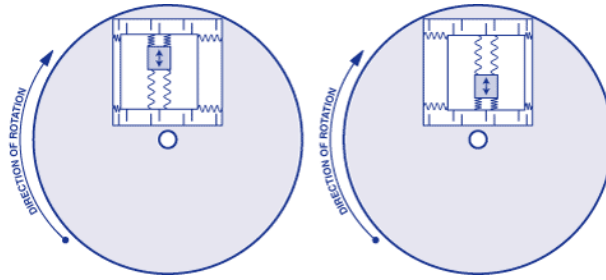
kde m je setrvačná hmotnost, ω je úhlová rychlost a v je rychlost lineárního pohybu.[2]

Základní princip je u všech typů MEMS gyroskopů podobný. Struktura o dané hmotnosti m , upevněná pomocí pružin v rámu kmitá, .obr. 1.4 Směr pohybu je kolmý k ose otáčení. Na hmotnou část snímače působí Coriolisova síla, úměrná úhlové rychlosti otáčení. Následuje stlačení vnějších pružin rámu, viz. obr. 1.5, vzájemný posuv měřících plošek fungujících jako elektrody vzduchových kondenzátorů, tzn. změnu kapacity, která je úměrná rychlosti otáčení [1].



Obr. 1.4: Struktura MEMS gyroskopu

[1]



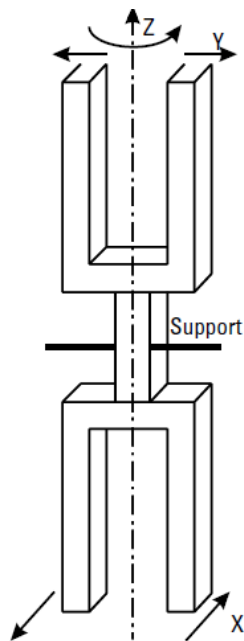
Obr. 1.5: Příklad funkce MEMS gyroskopu

[1]

Nejpoužívanější strukturou MEMS gyroskopu je Tuning Fork gyroskop.

Tuning Fork gyroskop

Typický příklad gyroskopů s vibrující hmotou. Struktura, ukázaná v obr. , je složena z horní a spodní vidlice. Horní vidlice je rozkmitávána. Působením rotace vzniká Coriolisova síla. Následně dochází k rozkmitání spodní vidlice. Amplituda kmitů spodní vidlice je úměrná úhlové rychlosti [2].



Obr. 1.6: Tuning Fork Struktura MEMS gyroskopu

[2]

Dále se používají další struktury MEMS gyroskopů, a to:

- Dual Mass MEMS gyroskop
- Ring gyroskop

1.2 Deterministické parametry

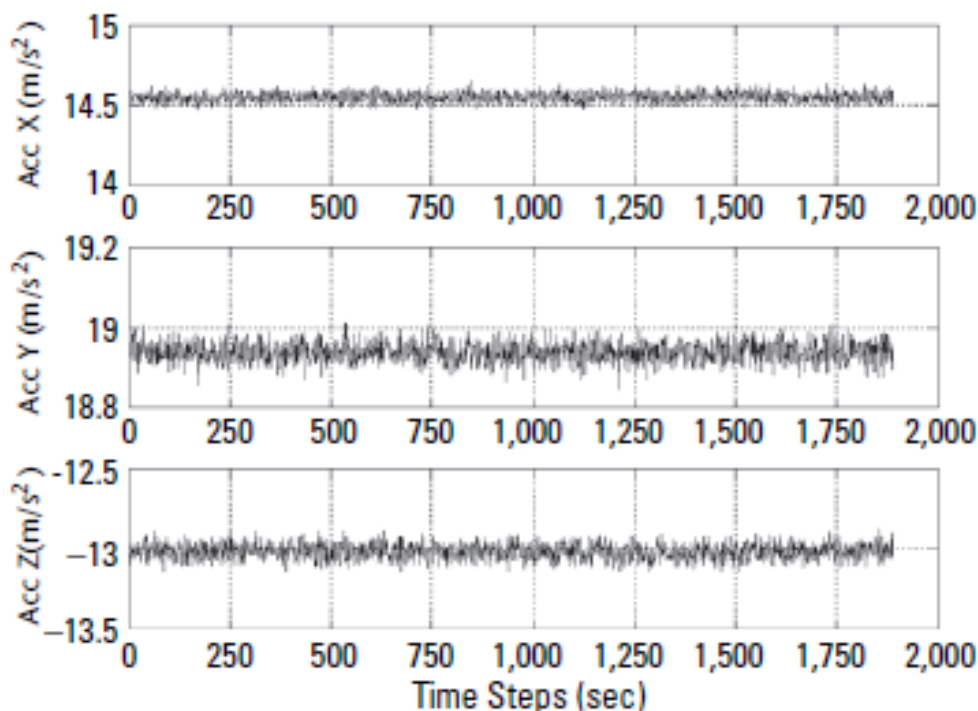
Deterministické parametry jsou parametry popisující vlastnosti a chyby MEMS gyroskopů vznikající při výrobě. Při znalosti těchto parametrů je možné při kalibraci snímače tyto chyby eliminovat.

Oproti tomu stochastické chyby jsou náhodné chyby, které není možné kalibrací eliminovat a kompenzace stochastických chyb není často možná. K jejich popisu se užívá nástrojů statistiky a pravděpodobnosti [6].

V této části jsou popsány deterministické parametry typické pro MEMS gyroskopy.

1.2.1 Bias

V ideálním případě je na výstupu snímače nulová hodnota, pokud je nulová hodnota na vstupu. Pokud se podíváme na obr. 1.7, vidíme nenulovou, pokaždé jinou, hodnotu na výstupu snímače. Střední hodnota na výstupu snímače, při nulovém vstupu, se nazývá bias. Jednotkou pro bias akcelerometru je g nebo m/s^2 . Pro gyroskopy je to $^{\circ}/sec$ nebo $^{\circ}/hod$. [2] Bias se skládá ze dvou částí: Deterministické, nazývané bias



Obr. 1.7: Bias akcelerometru

[2]

offset, a náhodné, zvané bias drift. Bias offset může být určen kalibrací. Bias drift by měl být modelován jako stochastický proces. [3] Je třeba si uvědomit, že hodnota

bias se mění v čase a s teplotou. Proto není možné jednou určit hodnotu bias a následně tuto hodnotu používat pro dlouhodobou korekci. Nekompenzace bias zavede chybu popsanou rovnicí [2]:

$$\delta\theta = \int b_w dt = b_w t \quad (1.2)$$

kde b_w je bias gyroskopu. Jak vyplývá z rovnice, chyba s časem roste.

1.2.2 Citlivost

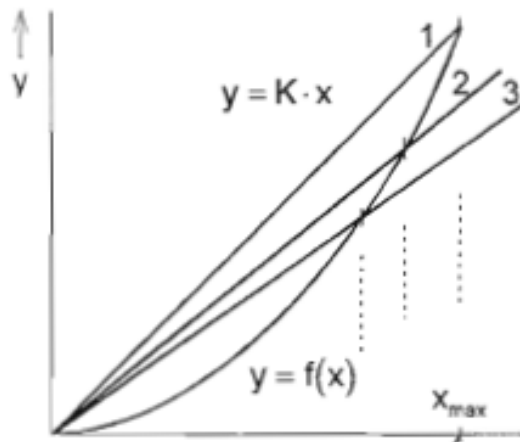
Citlivost (Scale factor) je definována jako změna výstupní hodnoty ku změně hodnoty vstupní:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.3)$$

kde Δy je změna výstupní hodnoty a Δx změna hodnoty vstupní.

Můžeme tedy říci, že citlivost vyjadřuje sklon statické přenosové charakteristiky.[4]. Typické průběhy statických přenosových charakteristik jsou zobrazeny v obr. 1.8. Je určena mechanickou citlivostí MEMS elementu a elektrickým zesílením, které musí zajistit optimální úroveň výstupního signálu gyroskopu.[6] Citlivost gyroskopu je typicky udávána v $mV/^\circ/s$.

Ideální statická charakteristika je dána rovnicí $y = Kx$. [4] Ve skutečnosti křivka



Obr. 1.8: Statické char. s různými konstantami lineárních funkcí

[4]

vykazuje jisté chyby, které se posuzují podle následujících měřítek:

Chyba linearity

Definována jako maximální odchylka od ideální lineární charakteristiky [4]:

$$\delta L = \left(\frac{y_N - y_L}{y_{max} - y_{min}} \right)_{max} \quad (1.4)$$

kde y_N je naměřená hodnota, y_L je hodnota určená z lineární náhrady, y_{max} je maximální hodnota a y_{min} je minimální hodnota.

Chyba symetrie

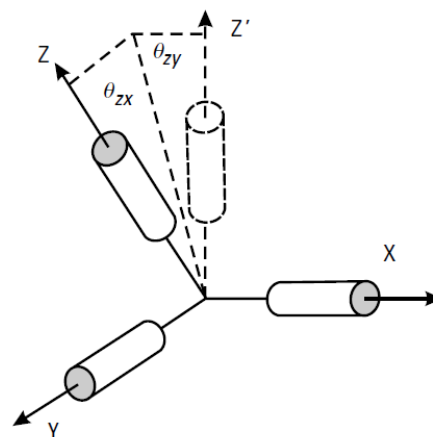
Je rozdíl mezi hodnotou scale factor měřenou s pozitivním vstupem a hodnotou měřenou s negativním vstupem.[5]

Scale factor temperature sensitivity

Mechanická citlivost MEMS elementu je závislá na teplotě. Závislost je vyjádřena v procentech z hodnoty scale factor nebo jako maximální procentuální odchylka z plného rozsahu stupnice.[5]

1.2.3 Nonorthgonality

Nonorthgonalita os je chyba způsobená výrobní nedokonalostí, viz. obr. 1.9. Výsledkem je ovlivnění měření úhlové rychlosti v jedné ose, rotací kolem os zbývajících[2]. Tato chyba může být modelována a následně kompenzována[3].

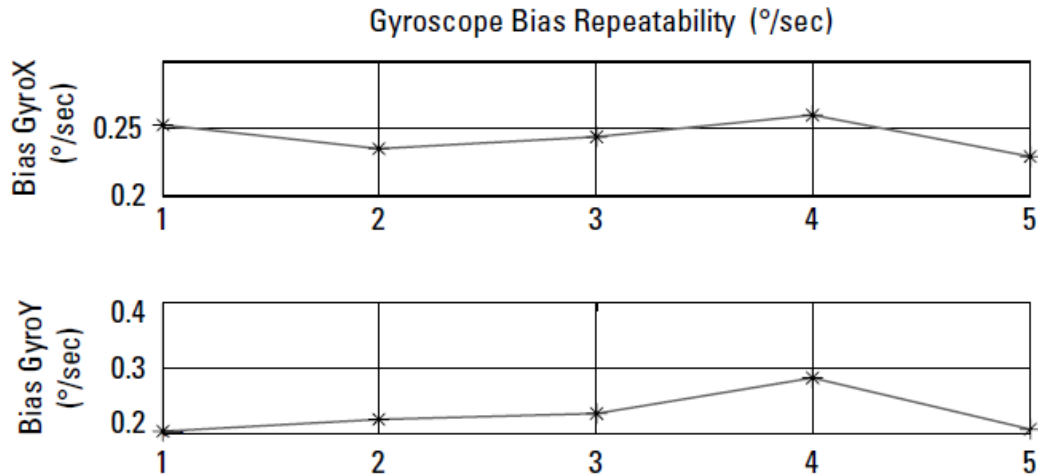


Obr. 1.9: Nonorthgonalita způsobena výrobní nedokonalostí

[2]

1.2.4 Run-To-Run

Run-To-Run bias je variací bias pro každé zapnutí, viz. obr. 1.10. Při každém zapnutí je na výstupu vždy jiný offset.[2] Tato hodnota je konstantní po dobu běhu snímače. Zdroj [2] uvádí, že chyba je významná především pro levnější snímače. Příčina chyby není dostatečně popsána. Zdroj [6] předpokládá, že pro krátkou dobu hrají roli přechodové děje v průběhu zapnutí napájení. Z dlouhodobého hlediska se může projevit stárnutí součástek, okolní podmínky při skladování.



Obr. 1.10: Gyro Run-To-Run

[2]

1.2.5 In-Run stability

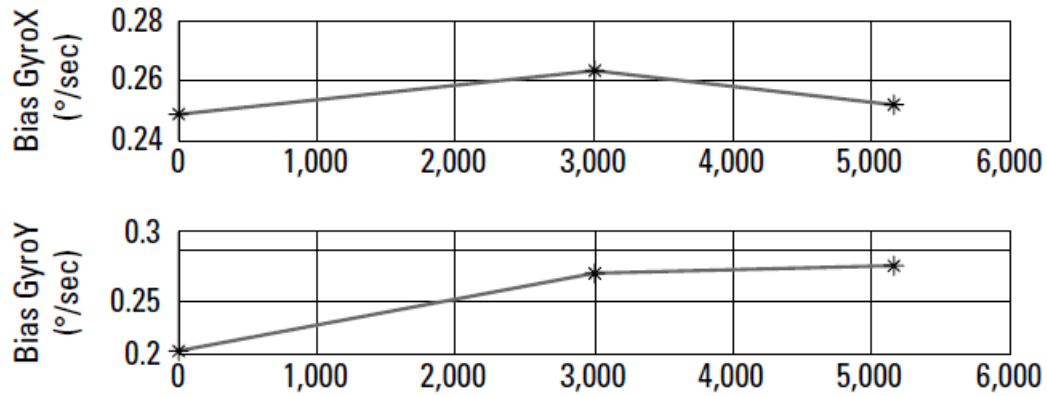
Tato chyba vyjadřuje změnu bias při stávajícím běhu snímače, viz. obr.1.11. Deterministická část této chyby je zapříčiněna změnou pracovních podmínek, např.: teploty a může být modelována.[6]

1.3 Metody popisu stochastických parametrů

Mezi hlavní metody popisu stochastických vlastností patří: Autokorelační funkce, Výkonová spektrální hustota a Allanova odchylka.

1.3.1 Autokorelační funkce

V této metodě se vyhodnotí autokorelační funkce statických dat. Nejprve se statické údaje získávají po dlouhou dobu (Dlouhou dobou je zde myšleno sbírání dat po dobu několika dní). Čím je delší doba sbírání dat, tím je lepší proces identifikace



Obr. 1.11: Gyro Bias Stability

[2]

a následně lepší odhad parametrů.[2] Při současné kombinaci více jevů není možné pomocí autokorelační funkce odlišit jednotlivé složky a určit jejich parametry.[6] A proto se raději volí jiné metody.

1.3.2 Výkonová spektrální hustota

PSD je pravděpodobně nejčastěji používaná metoda pro analýzu dat a stochastické modelování. Je to Fourierova transformace autokorelační funkce signálu. Vlastnosti stochastických procesů se projeví v různých frekvenčních oblastech, a to umožní jednoduchou grafickou interpretaci výsledků a následné odečtení parametrů z grafu.[7] Různé typy šumů jsou v PSD znázorněny přímkami s různými sklony, viz. obr. 1.12:

Výpočet PSD se provádí dle vzorce:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega\tau} K(\tau) d\tau \quad (1.5)$$

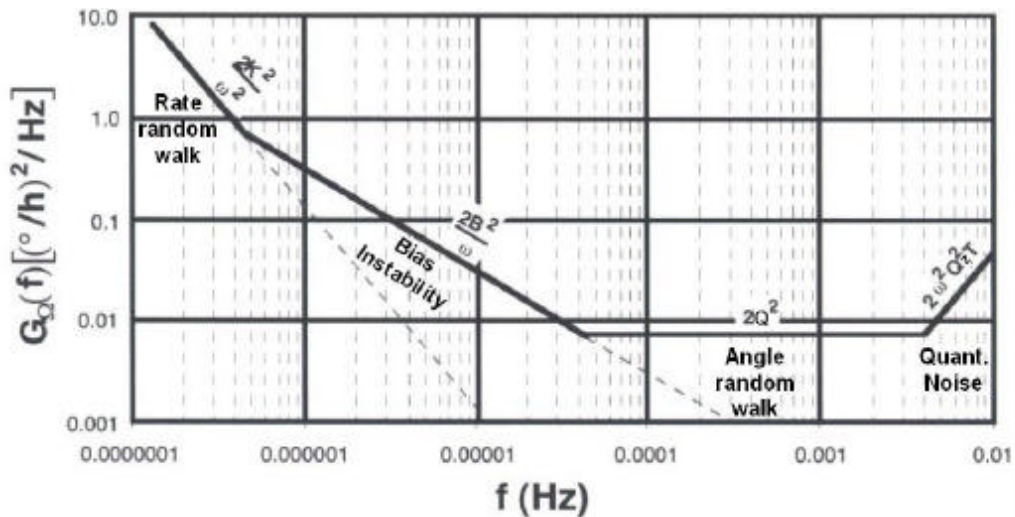
kde $K(\tau)$ je autokorelační funkce signálu.

1.3.3 Allanova odchylka

Allanova odchylka bude vysvětlena podrobněji, neboť právě tato metoda je v této práci použita k určení stochastických parametrů gyroskopů.

Allanova odchylka je oproti PSD analýzou v časové oblasti. Původně byla vynalezena pro studium stability frekvence u precizních oscilátorů. Dnes se používá např.: pro určení stochastických parametrů inerciálních snímačů.

Allanova odchylka je metoda reprezentující efektivní hodnotu (RMS) random drift error jako funkci průměrného času [2]. Je relativně jednoduchá na výpočet i pro



Obr. 1.12: Příklad PSD křivky

[3]

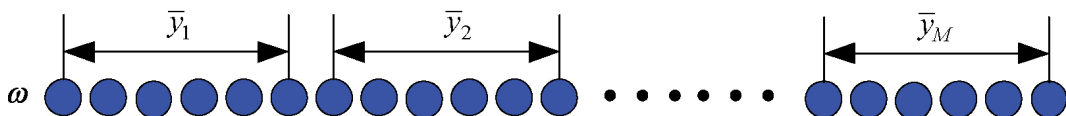
interpretaci výsledků. Podobně jako u PSD je výsledkem křivka, ze které se odečítá příslušné parametry.

Algoritmus lze popsat takto: Data se rozdělí na skupiny dle času τ , viz. obr. 1.13. Ve skupinách se vypočítá střední hodnota. Následně dochází k sumaci kvadrátů rozdílů středních hodnot sousedních skupin.

Pro výpočet Allanovy odchylky lze nejčastěji narazit na nejjednodušší vztah:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 \quad (1.6)$$

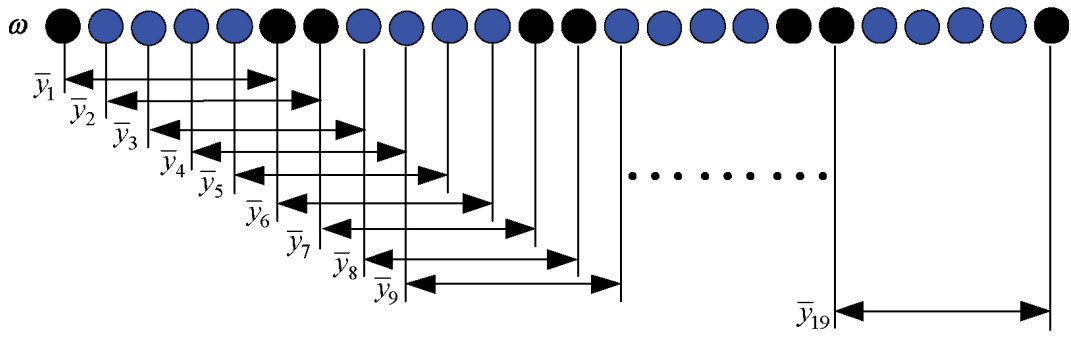
kde τ je průměrovací čas, M je počet skupin, \bar{y}_k je střední hodnota skupiny k . Tato varianta se nazývá bez překryvu, neboť každá skupina je nezávislá[9], viz. obr. 1.13:



Obr. 1.13: Allanova odchylka - varianta bez překryvu

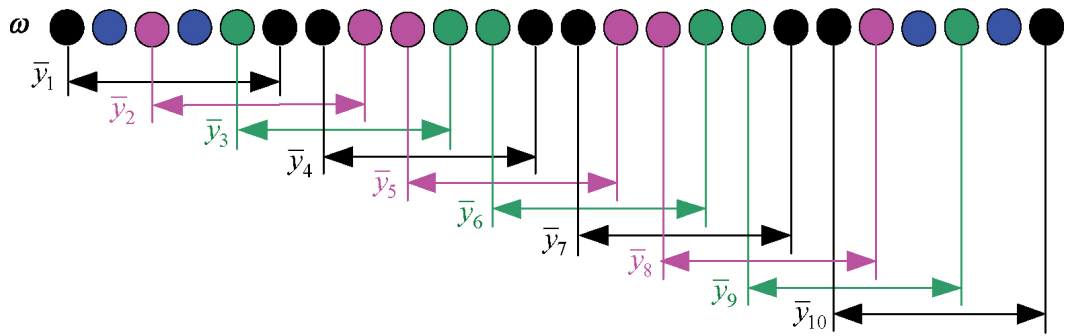
[8]

Někdy se také užívá variant s částečným, viz. obr. 1.15, nebo úplným překryvem, viz. obr. 1.14, které mají lepší výsledek v oblastech s dlouhým průměrovacím časem[6], viz. obr. 1.16. Možné je také použití dalších metod jako jsou např.: Total variance nebo Theo variance.



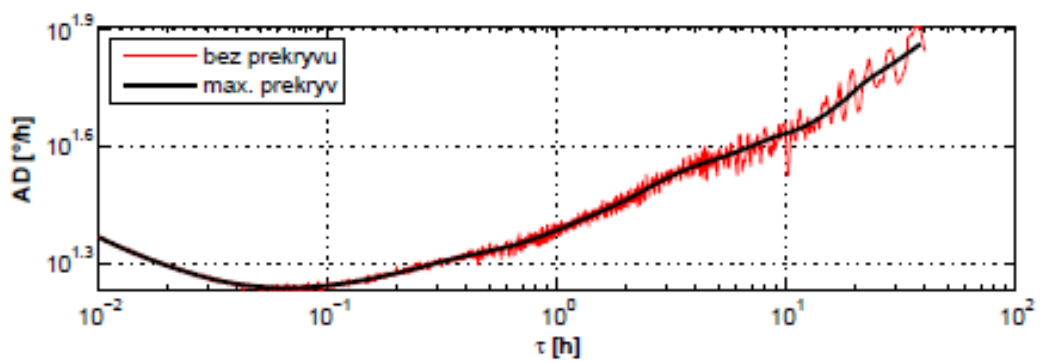
Obr. 1.14: Allanova odchylka - varianta s úplným překryvem

[8]



Obr. 1.15: Allanova odchylka - varianta s částečným překryvem

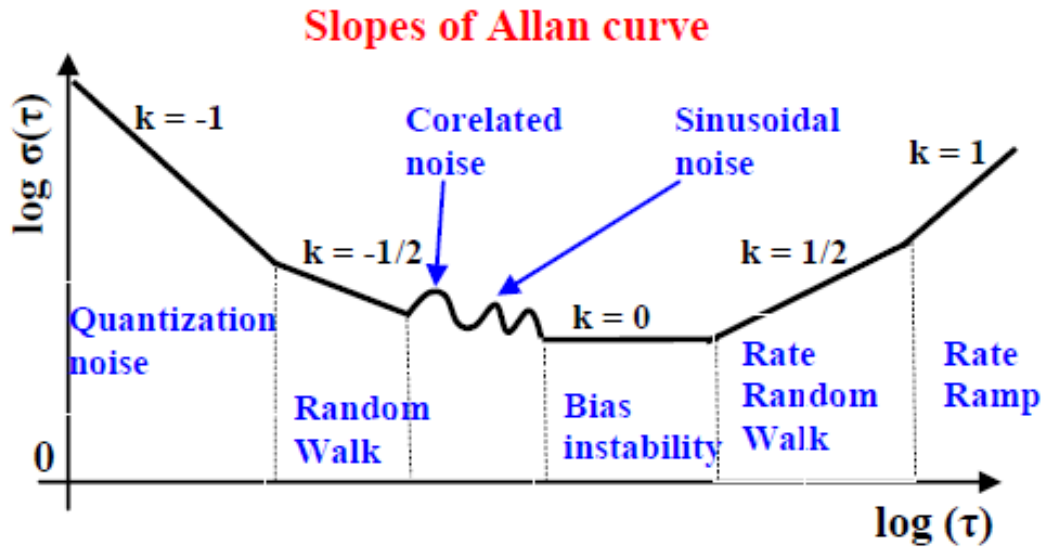
[8]



Obr. 1.16: Vliv překryvu skupin

[6]

Nyní budou popsány parametry, které se určují z výsledné Allanovy křivky, viz. obr. 1.17.



Obr. 1.17: Ukázka Allanovy křivky s určovanými parametry

[9]

Kvantizační šum

Je chybou zavedenou do analogového signálu kódováním v digitálním formátu [7], neboť analogový signál není převáděn přesně, ale hodnotami danými kvantizačními hladinami AD převodníku.

$$\sigma^2(T) = \frac{3Q_z^2}{T^2} \quad (1.7)$$

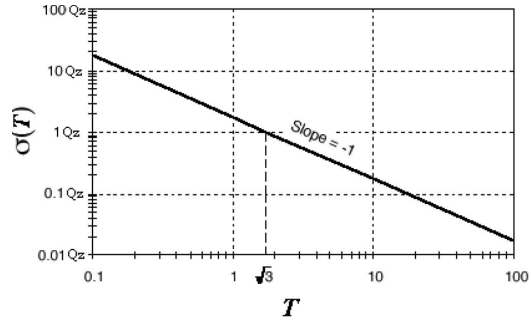
Hodnota kvantizačního šumu se určí z Allanovy křivky na přímce se sklonem $k=-1$, a to v čase $T = 3^{1/2}$, viz. obr. 1.18. Dle zdroje [6] je kvantizační šum pro MEMS gyroskopy s analogovým výstupem bezvýznamný. Projevem kvantizačního šumu je zvýšení hodnoty Angle Random Walk (ARW).

Angle Random Walk

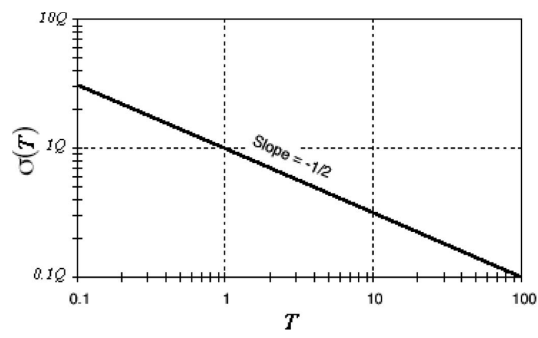
Vysokofrekvenční šумы, které mají korelační čas mnohem kratší než je doba vzorkování. ARW je vyjádřeno jako bílý šum na výstupu snímače.[7] Pokud není ARW dostatečně přesně modelováno, může být významným zdrojem chyby.[3]

$$\sigma^2(T) = \frac{Q^2}{T} \quad (1.8)$$

Hodnota Q se tedy odečte přímo z Allanovy křivky na přímce se sklonem $k=-1/2$ v čase $T=1$, viz. obr. 1.19.



Obr. 1.18: Určení kvantizačního šumu
[7]



Obr. 1.19: Určení ARW
[7]

Bias Instability

Bias Instability je nízkofrekvenční šum. Zdrojem tohoto šumu je elektronika nebo jiné součásti náchylné k náhodnému kmitání.[7]

$$\sigma(T) = 0.664B \quad \text{for } T \gg \frac{1}{f_0} \quad (1.9)$$

Bias Instability se tedy určí jako minimum Allanovy křivky z přímky se sklonem 0. Hodnota B je určena jako minimum z Allanovy křivky (přímka se sklonem 0) vyděleno 0,664.[9]

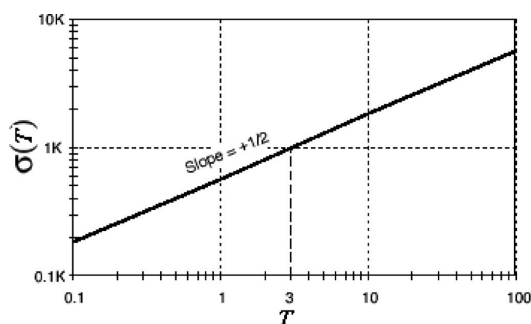
Rate Random Walk

RRW je náhodný proces nejistého původu, pravděpodobně limitní případ exponenciálně korelovaného šumu s velmi dlouhým korelačním časem. RRW vyjádřený ve frekvenční oblasti (PSD) a časové oblasti (σ)[7]:

$$S_K(f) = \left(\frac{K}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{f^2} \quad (1.10)$$

$$\sigma_k^2(T) = \frac{K^2\tau}{3} \quad (1.11)$$

RRW se určí z Allanovy křivky z části se sklonem $+1/2$. Hodnota koeficientu K se



Obr. 1.20: Určení Rate Random Walk

[7]

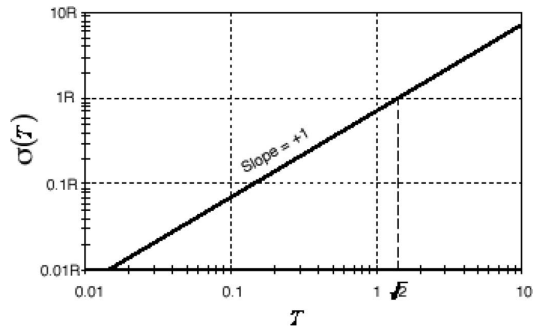
určí při $T=3$, viz. obr. 1.20.

Rate Ramp

Rate Ramp je šum se spíše deterministickým charakterem než náhodným.[9] Původ šumu je podobně jako u RRW nejistý.

Tento šum se vyjadřuje v kmitočtové a časové oblasti:

$$S_{RR}(f) = \frac{R^2}{(2\pi f)^3} \quad (1.12)$$



Obr. 1.21: Určení Rate Ramp

[7]

$$\sigma_{RR}^2(\tau) = \frac{R^2\tau^2}{2} \quad (1.13)$$

Parametr R se tedy určí z Allanovy křivky v části se sklonem $k=+1$ v čase $T = \sqrt{2}$, viz. obr. 1.21.

2 Praktická část

V této části je popsáno měření a vyhodnocení měření. Také jsou popsány prostředky, pomocí kterých bylo měření realizováno.

2.1 LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) je vývojové programovací prostředí firmy National Instruments (NI). Toto prostředí umožňuje sběr dat, regulaci, testování, atd.

Prostředí LabVIEW umožňuje tzv. grafické programování v jazyce G namísto klasického textového. Realizace programu probíhá spojováním různých funkcí, které reprezentují příslušné ikony. Tyto ikony jsou spojeny virtuálními vodiči. Následně je možné výsledky vykreslovat do grafu, zapisovat do souboru, atd.

Soubory, resp. programy, v LabVIEW se nazývají virtuální instrumenty (VI). VI se skládá ze dvou částí: Front Panel a Block Diagram. Ve Front Panelu se vytváří ovládání a vizualizace aplikace. V Block Diagram je realizován vlastní "kód" způsobem, který byl popsán výše.

K ovládání zařízení a sběr dat jsou využívány měřicí karty. Těchto karet existuje několik typů: přenosné a integrované do PC. Přenosné jsou většinou připojovány k PC pomocí USB, Ethernetu nebo WiFi. Integrované do PC často využívají sběrnici PCI.

2.2 Měřicí řetězec

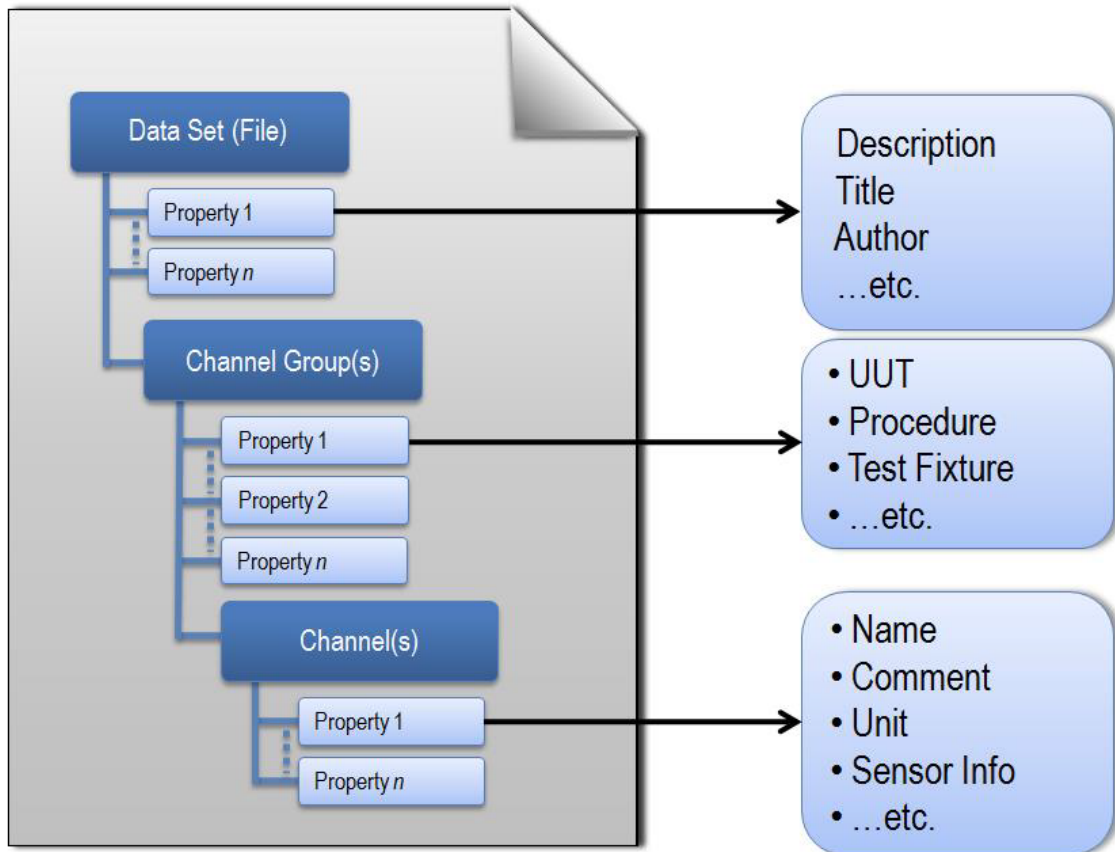
V této části je popsán program, který byl vytvořen v LabVIEW 2017 za účelem získání dat pro Allanovu odchylku a parametr run-to-run. Dále je zde popsán hardware, který byl použit k provedení měření.

2.2.1 Požadavky na program

Požadavky byly sestaveny, aby se podle nich mohl po částech psát program a aby následně bylo jasné, jak pracovat s výstupními soubory.

- Měření výstupů MEMS gyroskopů
- Měření teploty a napájecího napětí
- Doba měření několik dnů
- Uložení naměřených dat ve formátu tdms včetně metadat. Metadata obsahují v úvodu tyto informace: datum měření, název měření, za jakým účelem se měří, informace o měřicí kartě a informace o autorovi. Dále jsou ukládány informace

o jednotlivých snímačích: název měřených snímačů, citlivost a měřená osa. Dále se ukládají informace o měření napájecího napětí, a to: typ napájecího zdroje a dělicí poměr děliče napětí. U měření teploty se ukládá informace o použitém typu snímače. Struktura výsledného tdms souboru odpovídá definici tdms souboru, viz. obr. je na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Struktura tdms souboru

[15]

V tab. 2.1 je popis, jména a příklad náležitostí patřících do části Data Set (File).

V tab. 2.2 je popis, jména a příklad náležitostí patřících do části Channel Group(s).

V tab. 2.3 je popis, jména a příklad náležitostí patřících do části Channel(s).

V obr. 2.2 je ukázka výsledného tdms souboru.

Název v tdms souboru	Popis	Příklad
Root Name	Název	allan variance
Title	Titul	Inicializační měření
Author	Jméno autora	P. Vopršálek
Date/Time	Datum a čas měření	02.01.2018 13:00 odp
Groups	Počet skupin	2
Purpose_of_measurement	Důvod měření	Určení parametrů před vibracema

Tab. 2.1: Náležitosti části Data Set (File)

Název v tdms souboru	Popis	Příklad
Group	Skupina	Snimace
Channels	Počet kanálů ve skupině	2
NI_MinimumBufferSize	Min. velikost bufferu	100

Tab. 2.2: Náležitosti části Channel Group(s)

Název v tdms souboru	Popis	Příklad
Channel	Název kanálu	ADXLS610
Datatype	Typ dat	DT_DOUBLE
Unit	Jednotka	Volts
Length	Délka záznamu	550 000 000
NI_ChannelName	Počet skupin	2
NI_UnitDescription	Jednotka	Volts
wf_increment	Časový rozdíl mezi vzorky	0,0006
wf_samples	Počet sbíraných vzorků	1000
wf_start_offset	Offset od startu	0
wf_start_time	Spuštění měření	23.02.2018 12:20:56,704 odp.

Tab. 2.3: Náležitosti části Channel(s)

2.2.2 Použitý hardware

V této části jsou popsány měřené MEMS gyroskopy a přístroje, které byly použity pro měření.

MEMS Gyroskopy ADXRS610 a ADXRS613

ADXRS610 a ADXRS613 jsou gyroskopy s $ARW > 0.5deg/\sqrt{h}$ a $BI > 50deg/h$. Jejich základní parametry jsou uvedeny v tab. 2.4.

Úroveň 1: Soubor							
Root Name	Příklad						
Author	Kolovrat						
DateTime	...						
Title	Dělič napětí						
Purpose of measurement	Zkouška						
Description	...						

Úroveň 2: Skupiny	
Group	Channels
Snímače	2
Podmínky	2

Úroveň 3: Skupina Snímače							
Channel	Datatype	Unit	Length	NI_ChannelName	wf_increment	wf_samples	wf_start_offset
ADXRS610	DT_DOUBLE	Volts	26000	Dev1/ai0	0,000605469	1000	0
ADXRS613	DT_DOUBLE	Volts	26000	Dev1/ai1	0,000605469	1000	0

Úroveň 3: Skupina Podmínky							
Channel	Datatype	Unit	Length	_description	NI_ChannelName	wf_increment	wf_samples
Napětí	DT_DOUBLE	Volts	26000	Agilent E3631A, 2	Dev1/ai2	0,000605469	1000
Teplota	DT_DOUBLE	Volts	26000	Pt100, Agilent 34410A	Dev1/ai3	0,000605469	1000

Obr. 2.2: Ukázka struktury tdms souboru

Parametr	ADXRS610	ADXRS613
Rozsah	+300°/sec	+150°/sec
Měřené osy	Z	Z
Napájecí napětí	5V	5V
Citlivost	6 mV/°/sec	12.5 mV/°/sec
Šířka pásma	80 Hz	80 Hz
Výstupní napětí při nulové úhlové rychlosti	2,5 V	2,5 V
Rate Noise Density	0,05 °/sec/ \sqrt{Hz}	0,04 °/sec/ \sqrt{Hz}

Tab. 2.4: Parametry MEMS gyroskopů

Měřicí karta NI-9234

Pro měření byla použita měřicí NI 9234, jejíž parametry jsou uvedeny v tab. 2.5.

Parametr	Hodnota
Počet kanálů	4
Rozsah	+/-5V
Max. vzorkovací frekvence	51,2 kS/s/channel
Min. vzorkovací frekvence	1,652 kS/s/channel
Rozlišení	24 bitů

Tab. 2.5: Parametry měřicí karty NI 9234



Obr. 2.3: Měřicí karta NI-9234

[16]

Stabilizovaný zdroj Agilent E3631A

K napájení MEMS gyroskopů je využit programovatelný stabilizovaný zdroj. Zdroj je možné propojit s počítačem pomocí rozhraní GPIB nebo RS232. Při měření parametru run-to-run je ovládán z programu v LabVIEW přes RS232 s redukcí na USB s využitím VISA rozhraní.

Zdroj má 3 výstupy:

- Output 1: 0 to 6 V, 0 to 5 A
- Output 2: 0 to +25 V, 0 to 1 A
- Output 3: 0 to -25 V, 0 to 1 A

Vzhledem k napájecímu napětí MEMS gyroskopů je používán pouze výstup 1, který má vlastnosti uvedené v tab. 2.6.

Stabilizovaný zdroj Agilent E3615

Zdroj má 1 výstup:

- Output 1: 20V, 0 to 3 A

Parametry zdroje uvedeny v tab. 2.7.

Parametr	Hodnota
Stabilita napětí	0,1% + 5 mV
Stabilita proudu	0.2% + 10 mA
Teplotní koeficient na °C pro napětí	0.01% + 2 mV
Teplotní koeficient na °C pro proud	0.02% + 3 mA
Šum	<350 uVrms/2 mVpp

Tab. 2.6: Parametry zdroje Agilent E3631A

Parametr	Hodnota
Stabilita napětí	0.1% + 5 mV
Stabilita proudu	0.1% + 10 mA
Teplotní koeficient na °C pro napětí	0.02% + 500uV
Teplotní koeficient na °C pro proud	0.02% + 1.5 mA
Šum	<200 uVrms/<1 mVpp

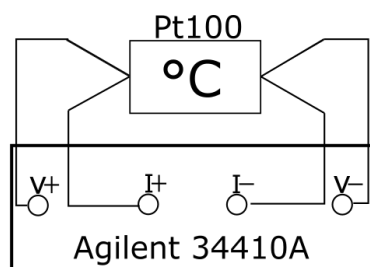
Tab. 2.7: Parametry zdroje Agilent E3615

Teplotní komora

Abychom v průběhu měření dosáhli co nejmenších změn teploty, byly snímače umístěny do teplotní komory.

Měření teploty

Pro měření teploty je použit platinový snímač Pt100 ve čtyřvodičovém zapojení s DMM Agilent 34410A, viz. obr. 2.4.

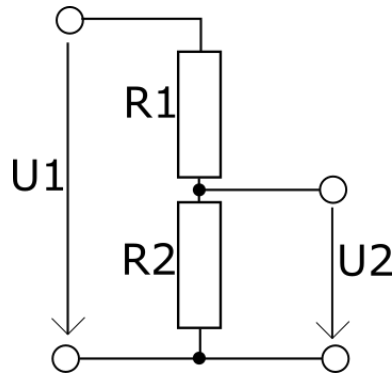


Obr. 2.4: Pt100 ve čtyřvodičovém zapojení

Proud při měření ve čtyřvodičovém zapojení pomocí DMM Agilent 34410A je při rozsahu 100 Ω 1 mA.

Využití děliče napětí pro měření napájecího napětí

Protože na vstup měřicí karty může být připojeno max. 5 V, je využit napěťový dělič ze dvou rezistorů s dělicím poměrem 1:1, viz. obr. 2.5. Tudíž při připojení napájecího napětí MEMS gyroskopů 5V, je na vstupu měřicí karty 2,5 V.



Obr. 2.5: Dělič napětí

2.2.3 Realizace v LabVIEW

Byly vytvořeny 2 programy, a to program pro sběr dat pro Allanovu odchylku a program pro parametr Run-to-Run.

Měření pro Allanovu odchylku

Po seznámení se s vývojovým prostředím LabView 2017 bylo přistoupeno k vlastní realizaci programu pro měření parametrů MEMS gyroskopů.

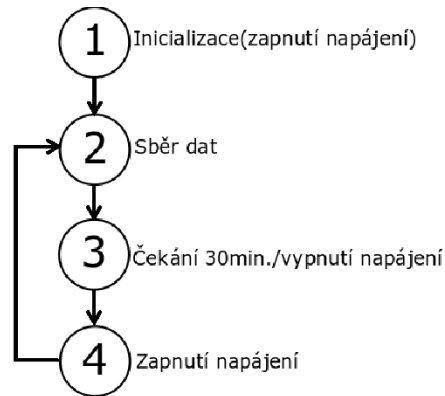
Sběr dat z měřených vstupů je realizován pomocí elementárních funkcí LabView. Následně je prováděna vizualizace a ukládání dat do souboru formátu TDMS. Toto je řešeno metodou Producer/Consumer, kdy jedna smyčka sbírá data z měřicí karty a druhá smyčka data ukládá. Komunikace těchto smyček probíhá pomocí fronty.

Vzorky hodnot teploty se ukládají s 5x nižší frekvencí než ostatní vzorky hodnot, neboť ke změnám teploty nedochází tak rychle. Zároveň dojde k významnému snížení velikosti výsledného souboru.

Vzhledem k faktu, že sběr dat pro analýzu dat pomocí Allanovy odchylky probíhá po dobu několika dní, cca po 20MB dochází k zápisu na disk pomocí funkce flush, abychom v případě nenadálé chybové události neztratili naměřená data.

Měření run-to-run

Při tvorbě programu pro měření parametru run-to-run byla využita stejná kostra jako pro Allanovu odchylku, ale byl navíc přidán stavový automat v consumer smyčce a komunikace se stabilizovaným zdrojem pomocí RS232. Stavy mezi kterými automat přechází jsou na obr. 2.6. V prvním stavu dojde k zapnutí napájení



Obr. 2.6: Stavový diagram

MEMS gyroskopů. Následně se 30 minut sbírají data. Poté se přechází do dalšího stavu, kde dochází k vypnutí napájení a čeká se 30 minut. Poté se cyklus opakuje.

2.2.4 Uživatelské rozhraní

Na obr. 2.7 je ukázka Front Panelu.

Ve *File description* se popíše, co se měří, za jakým účelem, datum měření, atd.

Následně v příslušné *Page* se zvolí, co se měří na kterém kanálu. Popíše se název kanálu, zvolí se *AC/DC vazba*.

Do *File path* se zapíše složka, ve které se vytvoří výstupní soubor typu *tdms*.

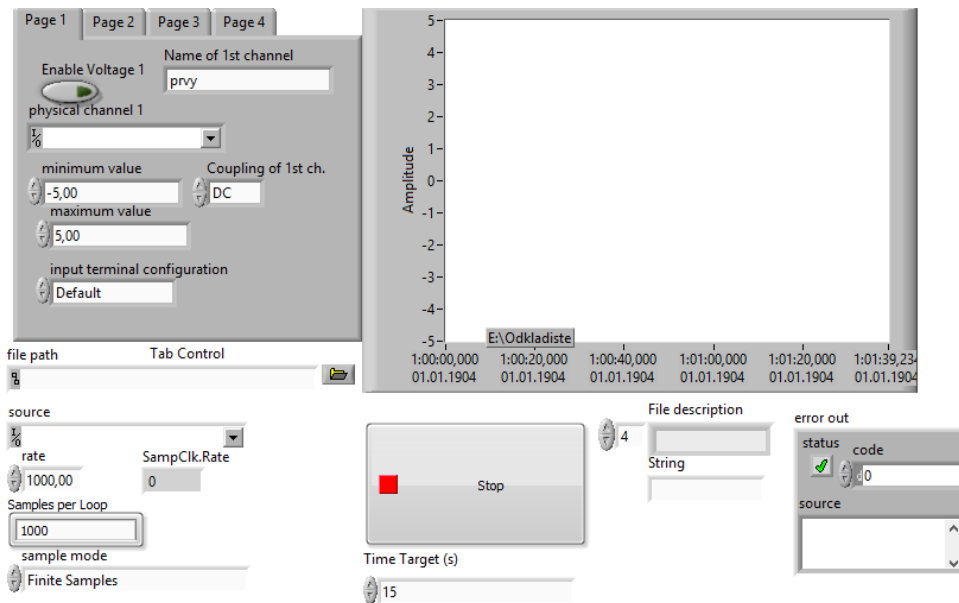
Dále se určí *vzorkovací frekvence, vzorkovací mód a doba*, po kterou se má měřit.

Kdykoliv je možné měření ukončit stiskem tlačítka *stop*.

Ve *waveform chart* se vykreslují měřené hodnoty.

2.3 Měření parametrů pomocí Allanovy odchylky

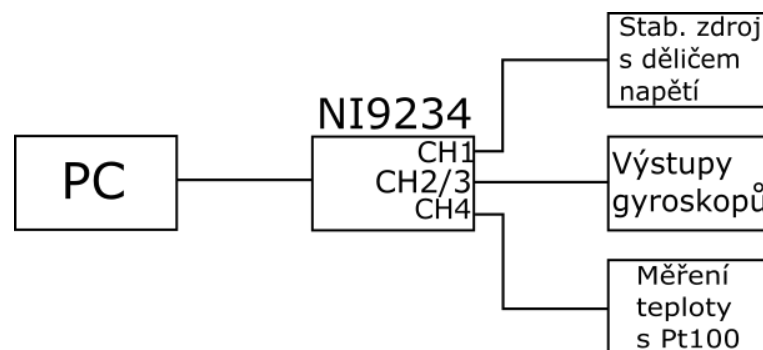
S použitím programu a hardwaru popsaného výše bylo realizováno měření. Naměřená data byla využita k výpočtu Allanovy odchylky. S využitím softwaru Matlab 2016 byly vykresleny přímky s příslušnými sklony, dle teorie popsané v první části práce. Následně byly výpočtem, z rovnic přímeček, určeny stochastické parametry.



Obr. 2.7: Ukázka uživatelského rozhraní

2.3.1 Schéma měření

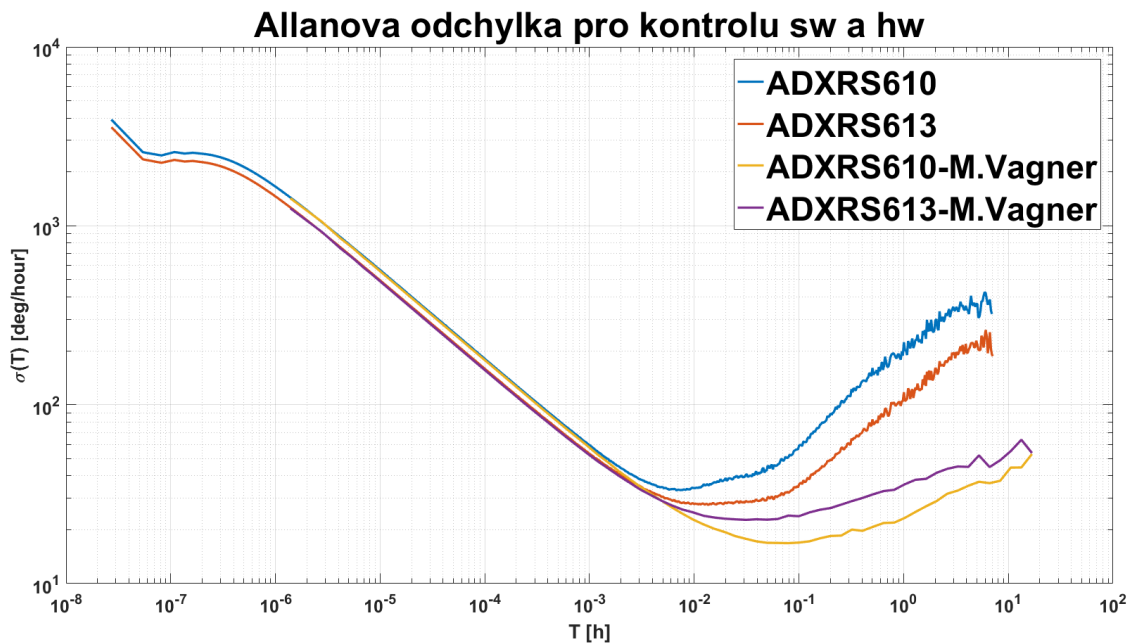
Na obr. 2.8 je zobrazeno schéma měření. Na dvou kanálech se měří výstupy gyroskopů, na dalších dvou parazitní vlivy, a to teplota a napájecí napětí. V budoucnu je možné měření teploty provést přes SCPI komunikaci, čímž se ušetří jeden kanál. Také by bylo možné použít více karet zapojených paralelně.



Obr. 2.8: Schéma měření

2.3.2 Kontrola softwaru a hardwaru

První měření bylo provedeno na stole bez teplotní komory za účelem kontroly softwaru a hardwaru. Naměřená data byla porovnána s daty Martina Vágnera, obr. 2.9, který měřil stejné gyroskopy.



Obr. 2.9: Kontrolní měření

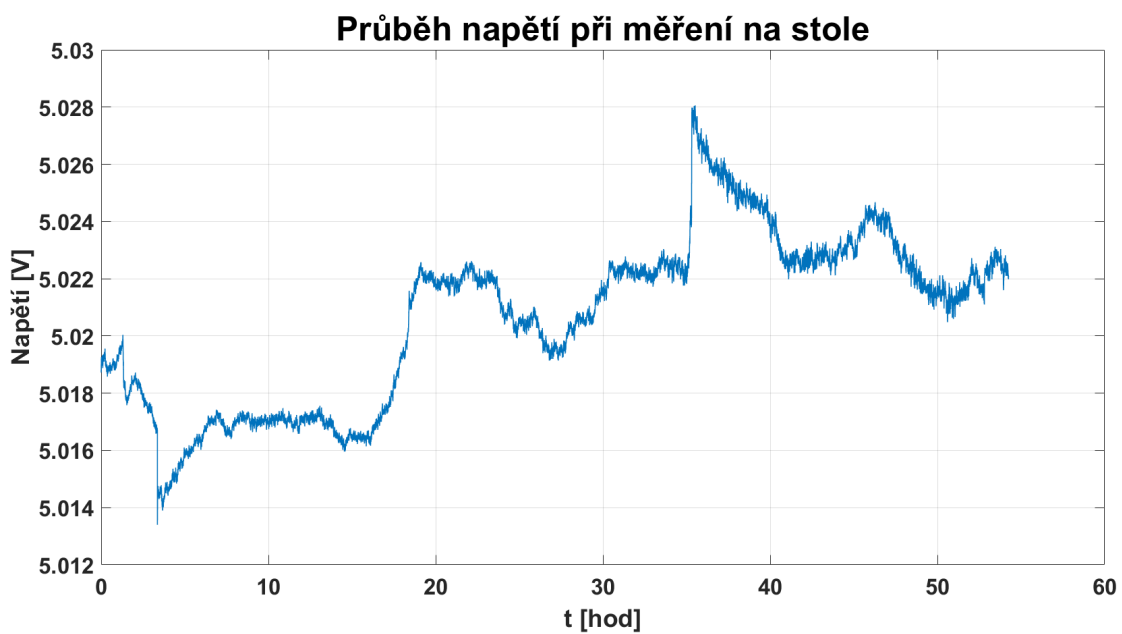
Vykreslené křivky jsou podobné. Rozdíly při větších průměrovacích časech mohou být způsobeny změnami napájecího napětí, změnami teploty či šumem měřicí karty. Na obr. 2.10 vidíme průběh napájecího napětí. Napětí můžeme označit za stabilní.

Na obr. 2.11 je zobrazen vývoj teploty. Vidíme, že teplota postupně klesala, kdy rozdíl teploty od začátku měření do konce měření je cca 2°C . S takovýmto rozdílem teplot se nemůžeme spokojit i vzhledem k faktu, že pokud se budou měnit parametry gyroskopů po vibračních zkouškách, tak změny očekáváme v malém rozsahu, kdy by vyhodnocení bylo takovýmto nebo i horším vývojem teploty znehodnoceno. Proto budou při dalším měření gyroskopy umístěny do teplotní komory.

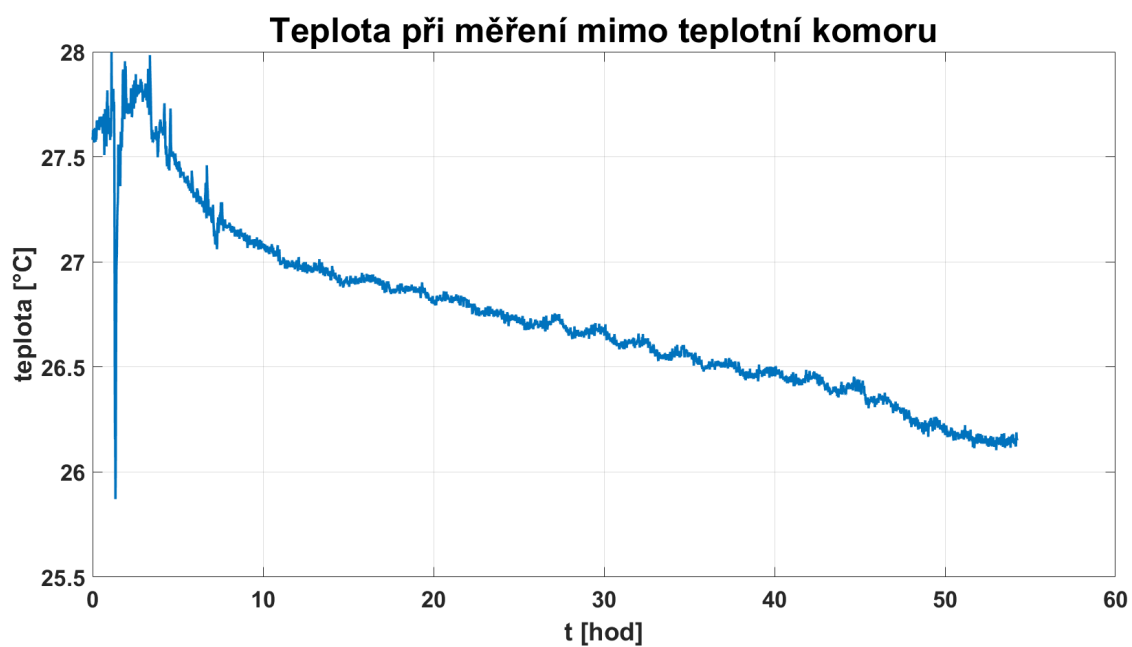
Pro jistotu bylo provedeno měření šumu měřicí karty, abychom se ujistili, že měřicí karta NI 9234 nemá zásadní vliv na měření Allanovy odchylky gyroskopů, ačkoliv tento vliv vzhledem k jejím katalogovým parametrům popsaným výše neočekáváme.

Podobným způsobem jako se získala Allanova odchylka pro MEMS gyroskopy, bylo provedeno měření šumu měřicí karty. Měřilo se s definovanou impedancí $50\ \Omega$ na jednom kanálu, se zkratovaným druhým kanálem a třetí kanál byl ponechán volný. Na čtvrtém kanálu se měřila teplota. Tímto rozestavením jsme se snažili pokrýt co nejvíce možností, neboť nebyla nalezena literatura, která by tuto problematiku jasně definovala.

Výsledné křivky jsou vykresleny na obr. 2.12. Tvary křivek jsou víceméně podobné, konfigurace konce neměla významný vliv na celkový tvar křivek. Vzhledem k hodnotám ve kterých se křivky nachází, můžeme říci, že šum měřicí karty neměl vliv na

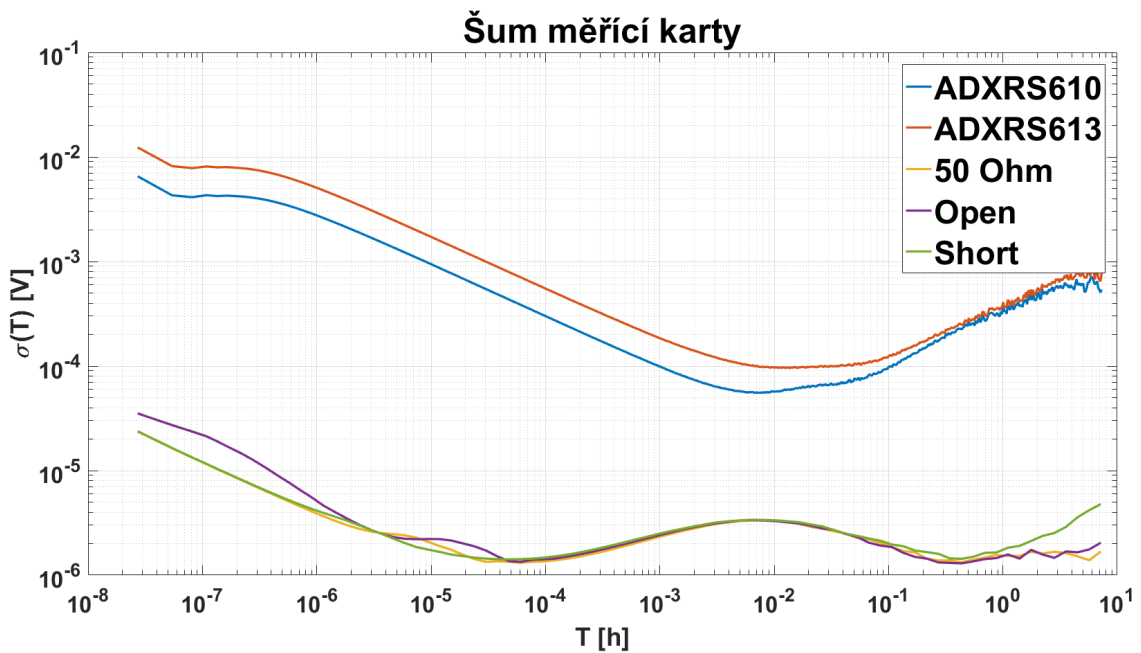


Obr. 2.10: Napětí při měření na stole



Obr. 2.11: Vývoj teploty při měření na stole

předchozí měření parametrů MEMS gyroskopů.



Obr. 2.12: Měření šumu měřicí karty

2.3.3 První měření

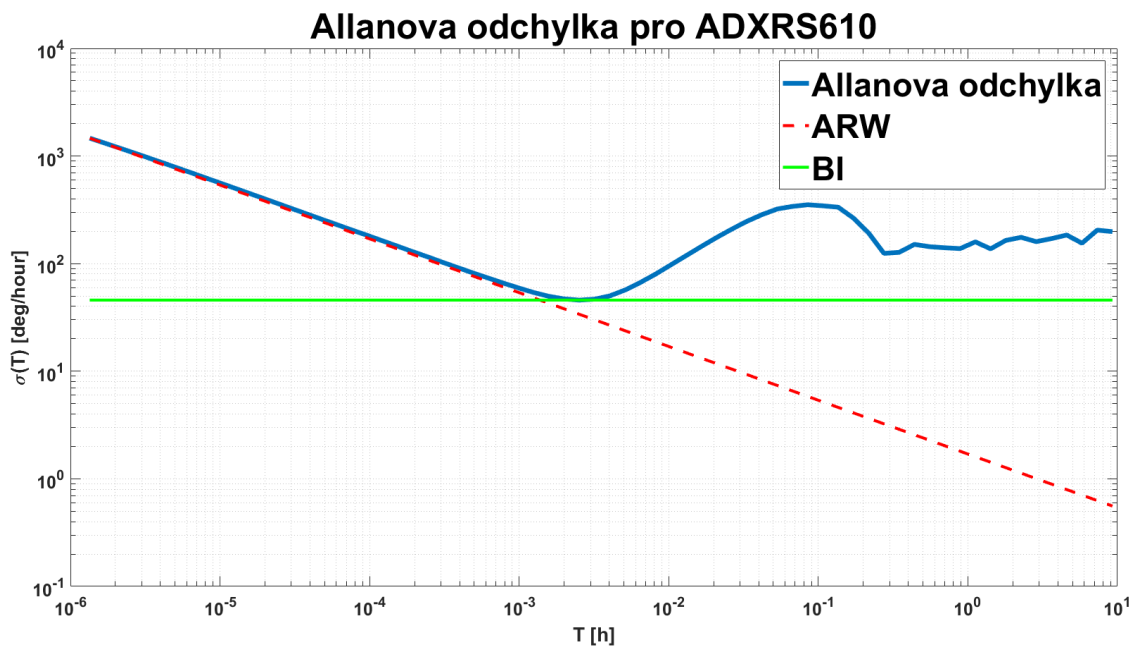
Dle výše uvedeného schématu měření bylo sestaveno měřicí pracoviště. Tentokrát již byly snímače umístěny do teplotní komory, jejíž teplota byla nastavena na 25°C. V grafu 2.13 je zakreslena křivka snímače ADXRS610. Dle popsané teorie jsou v tomto grafu zakresleny přímky s příslušnými sklony pro jednotlivé šumové parametry. Z rovnic těchto přímek byly určeny hodnoty šumových parametrů, viz. tab.2.8.

Stejné úkony byly provedeny pro snímač ADXRS613, viz. obr. 2.14.

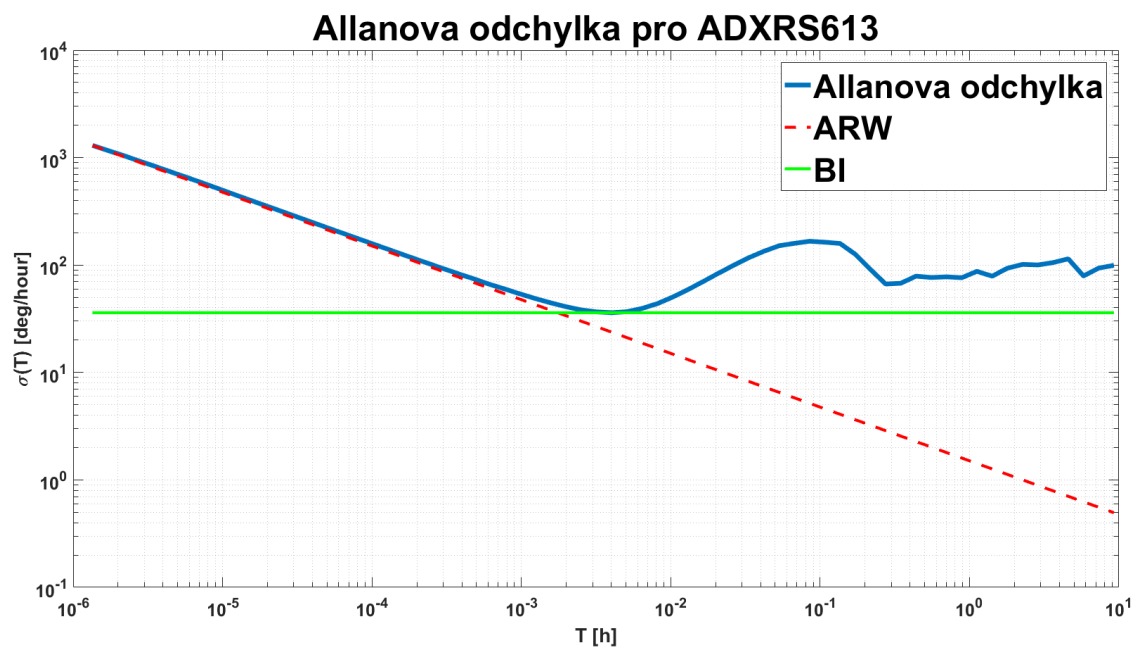
Snímač	ARW [deg/\sqrt{h}]	BI [deg/h]
ADXRS610	1.6993	68.9718
ADXRS613	1.5056	54.2115

Tab. 2.8: Určené stochastické parametry

Z šumových parametrů popsaných v teoretické části práce byly určeny pouze parametry Angle Random Walk a Bias Instability. Přímka se sklonem -1 pro kvantizační šum v grafech nebyla nalezena, potvrdilo se tedy tvrzení [10], že pro MEMS gyroskopy nemá význam a kvantizační šum se projeví zvýšením Angle Random Walk. Vzhledem ke tvaru Allanovy odchylky nebyly určeny parametry Rate Random Walk ani Rate Ramp. Mmj. v katalogových listech také nebývají standardně



Obr. 2.13: Allanova odchylka pro ADXRS610

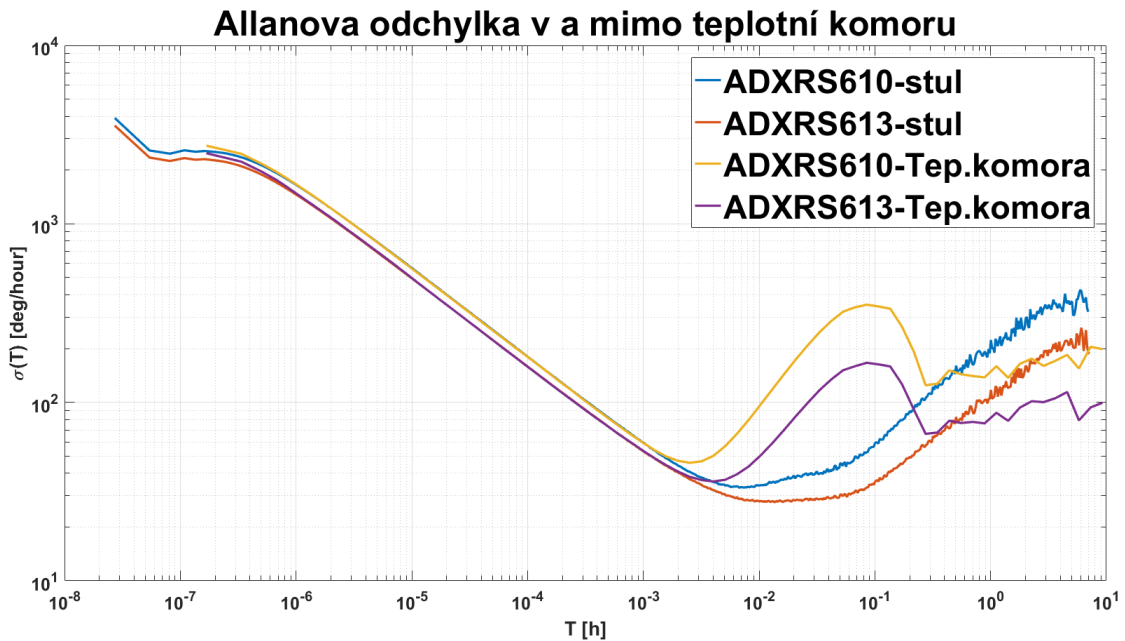


Obr. 2.14: Allanova odchylka pro ADXRS613

uváděny. Růst a následné klesání křivky má nejspíše souvislost s napájecím napětím nebo teplotou. Vzhledem k tomu, že snímače byly umístěny do teplotní komory, nebyla měřena teplota, a proto není možné vyhodnotit jaký vliv měla na měření.

Porovnání inicializačního měření a prvního měření

Na obr. 2.15 jsou vykresleny křivky Allanovy odchylky z měření bez teplotní komory a z měření v teplotní komoře.

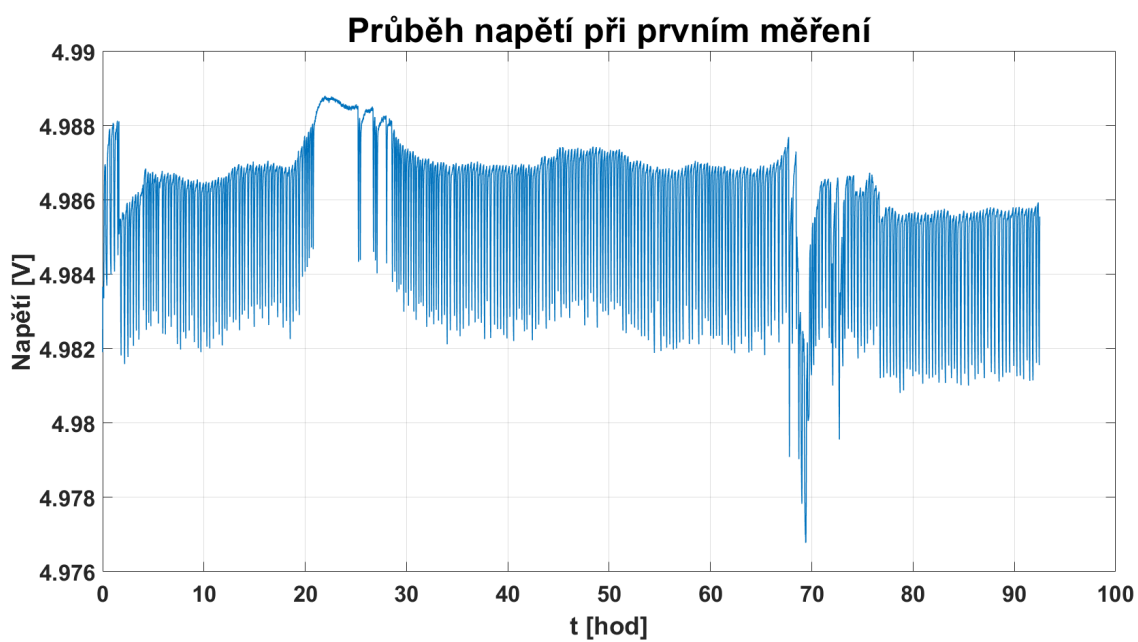


Obr. 2.15: Srovnání měření v teplotní komoře a mimo komoru

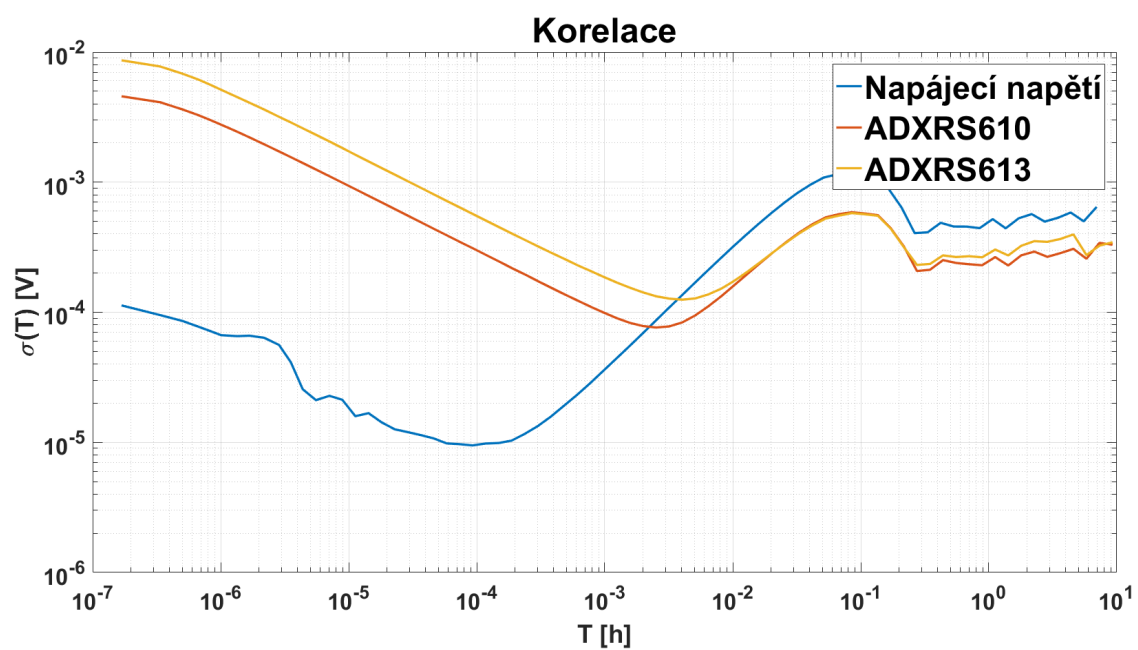
Vidíme, že Angle Random Walk je u obou křivek stejný. Parametr Bias Instability i tvar křivky je evidentně lepší u měření bez teplotní komory. Napětí při měření na stole bylo víceméně stabilní, viz. graf 2.10. U měření v teplotní komoře vidíme náhlý pokles napětí v čase okolo 70 hod., viz. graf 2.16. Na obr. 2.17 vidíme, že "peak" Allanovy odchylky u měření v teplotní komoře koreluje s napájecím napětím zdroje 2.17.

Teplota u měření bez teplotní komory postupně klesala, kdy od začátku do konce měření klesla o cca 2°C, viz. graf 2.11. Touto změnou je naše měření značně znehodnoceno oproti podmínkám v teplotní komoře.

Z výše uvedeného lze vyvodit následující závěr. Zásadní vliv na měření má teplota a stabilita napájecího zdroje. Pro následující měření zůstaneme u umístění snímačů v teplotní komoře a zjistíme, zda-li se stávající stabilitou napájecího zdroje budeme schopni vyhodnotit změny parametrů snímačů po vibračních zkouškách.



Obr. 2.16: Napětí při měření v teplotní komoře



Obr. 2.17: Korelace Allanovy odchylky s napájecím napětím

2.3.4 Vibrační zkoušky

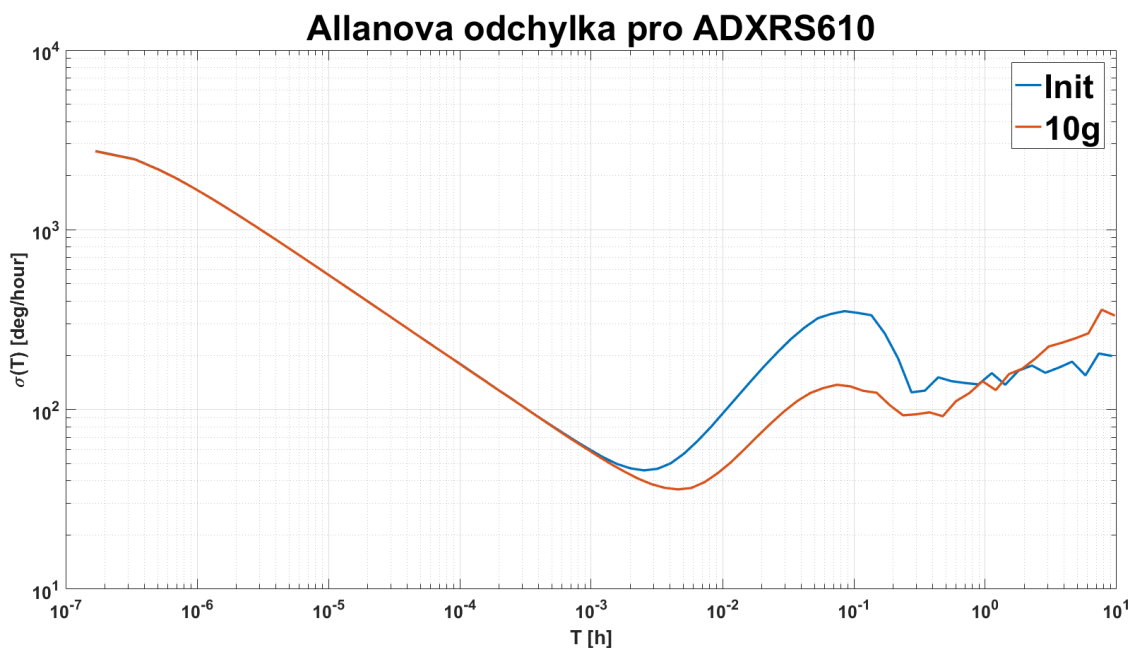
Součástky bývají vystaveny při transportu a následně i v cílové aplikaci různým vibračním a rázům. Tento fakt musí být brán v úvahu při návrhu součástky, avšak neméně důležitou informací je, jak se mění parametry součástky po tomto působení. Testy, které se standardně provádějí se součástkami se dělí do 4 základních skupin [11]:

- sinusoidal vibrations
- swept sine vibrations
- random vibrations
- mechanical shocks

Průběhy testů jsou normalizovány. V této práci byly snímače vystaveny vibračním 10g a 20g, dle normy: IEC 60068-2-6. Následně, po naměření dat po vibracích, byly snímače vystaveny rázům, dle normy: IEC 60068-2-27.

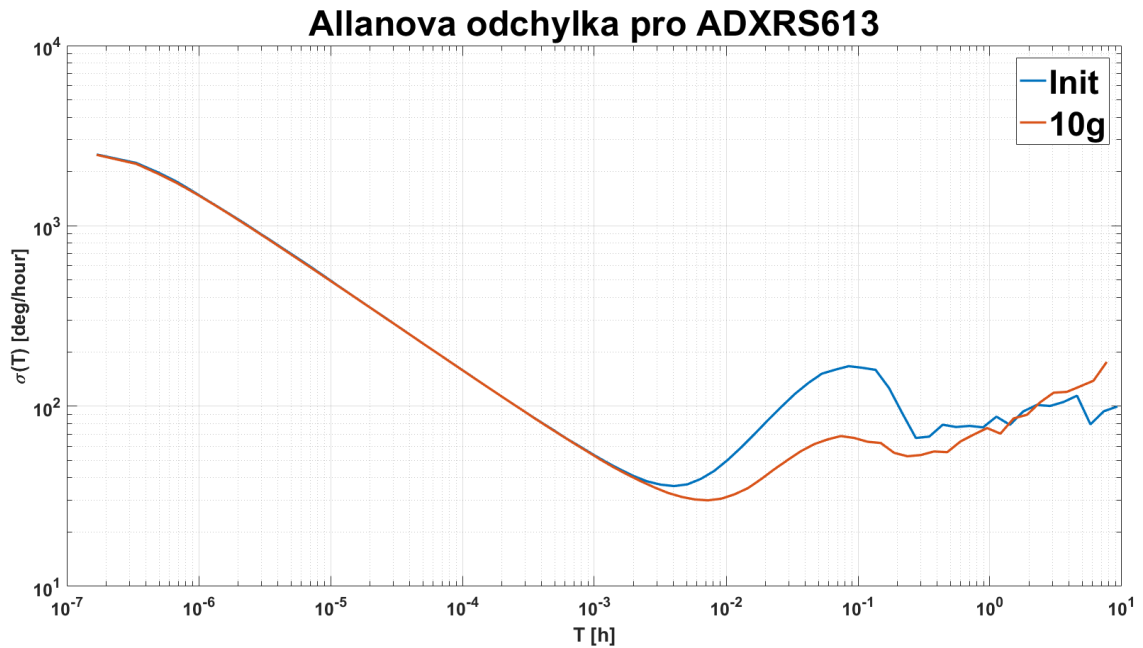
2.3.5 Měření po vibračních zkouškách 10g

Po vibračních zkouškách 10g popsaných výše bylo provedeno další měření za účelem vyhodnotit jak se změni stochastické parametry. Vykreslené křivky jsou v grafech 2.18 a 2.19.



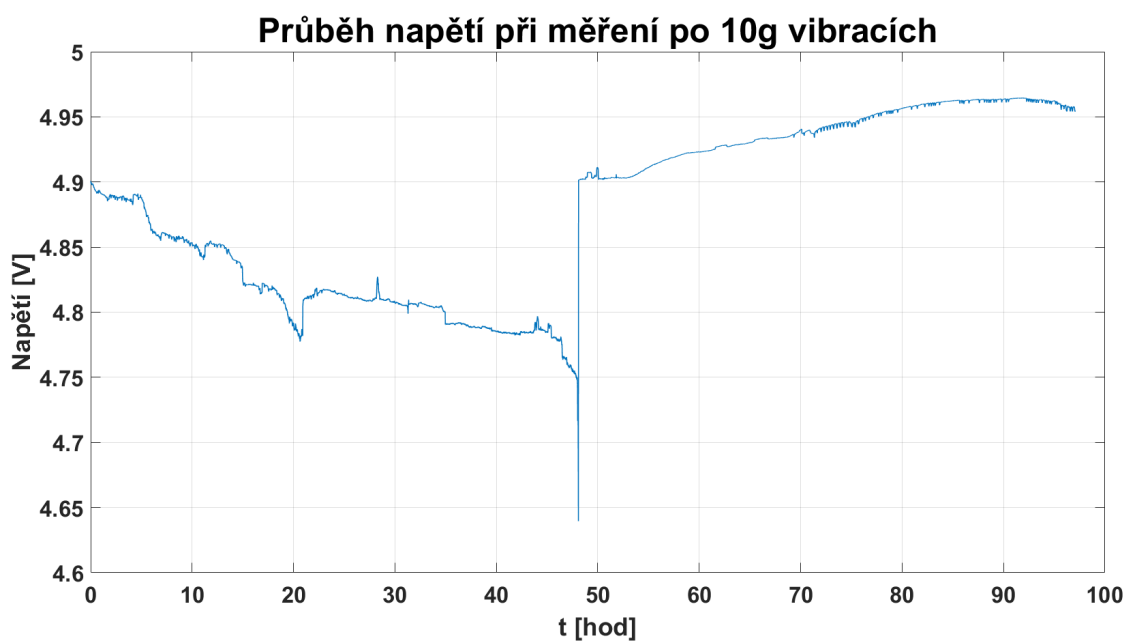
Obr. 2.18: Allanova odchylka po vibračních zkouškách pro ADXRS610

Parametr Angle Random Walk se evidentně nezměnil. U parametru Bias Instability bychom zdánlivě mohli říci, že jsme dosáhli zlepšení. Avšak po analýze průběhu

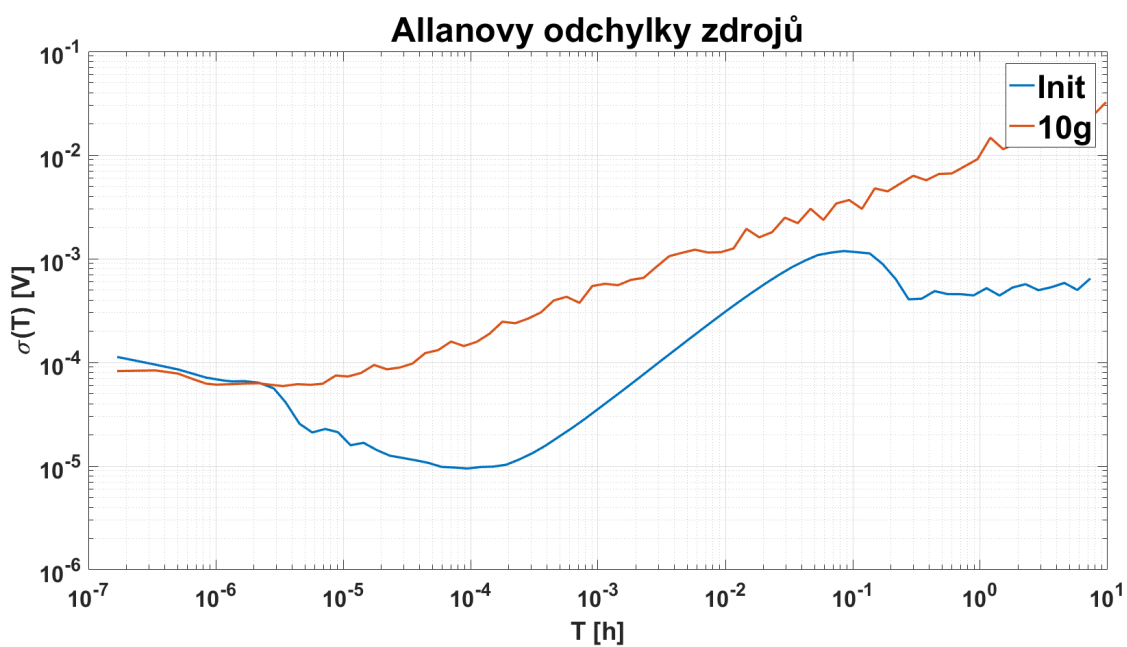


Obr. 2.19: Allanova odchylka po vibračních zkouškách pro ADXRS613

napájecího napětí nemůže být toto měření označeno za věrohodné. V grafu 2.20 je vidět, jak napětí s časem klesá, načež v čase cca 200 000 s náhle padá asi o 0,25 V. Tento propad napětí a následné okamžité zvýšení o cca 0,35 V je těžko vysvětlitelné. Při tomto měření nebyla v laboratoři zapnuta klimatizace, což mohlo mít neblahý vliv na stabilitu napájecího zdroje. Pokud se podíváme na graf 2.21, kde je vykreslena Allanova odchylka napětí zdroje při měření před vibračními zkouškami a po vibračních zkouškách, vidíme, že bylo dosaženo řádově horších parametrů. A proto se při následujících měřeních bude měřit v klimatizované laboratoři a pro jistotu se bude měřit i teplota v teplotní komoře.



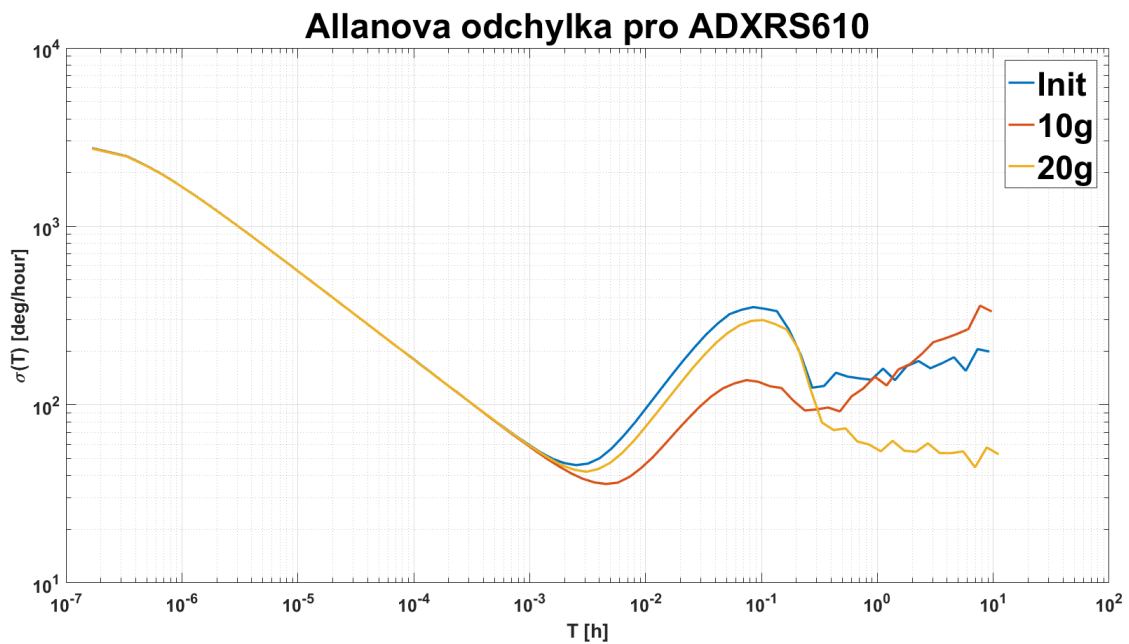
Obr. 2.20: Napětí při měření v teplotní komoře - 10g



Obr. 2.21: Allanovy odchylky napětí - 10g

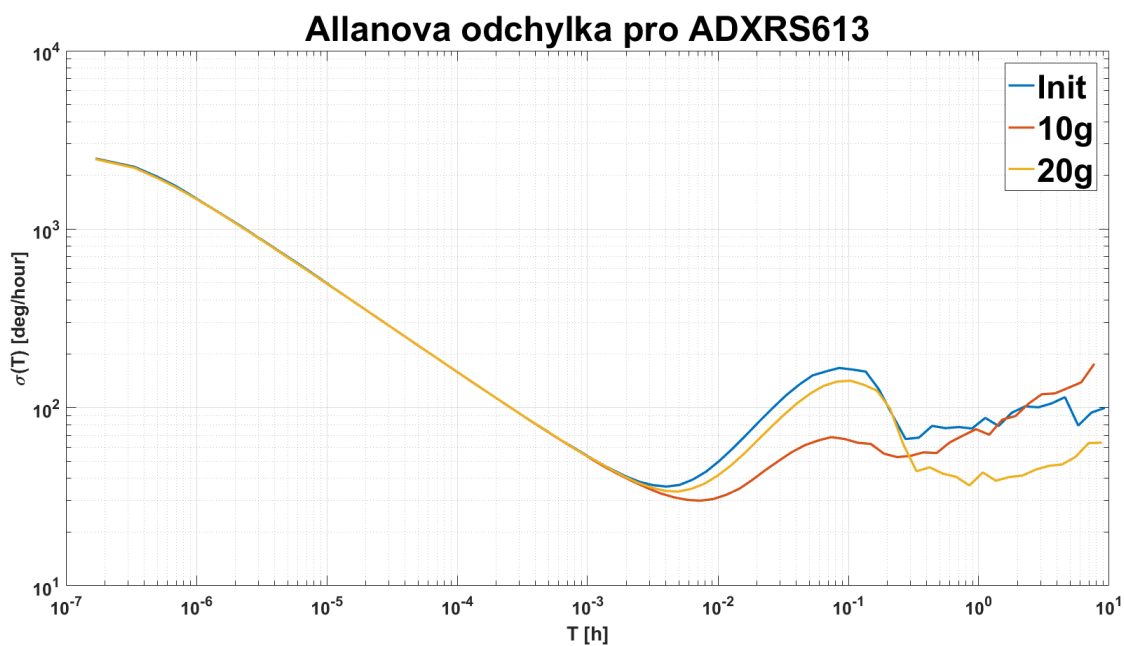
2.3.6 Měření po vibračních zkouškách 20g

Po vibračních zkouškách 20g bylo provedeno další měření. Vykreslené křivky jsou v grafech 2.22 a 2.23.

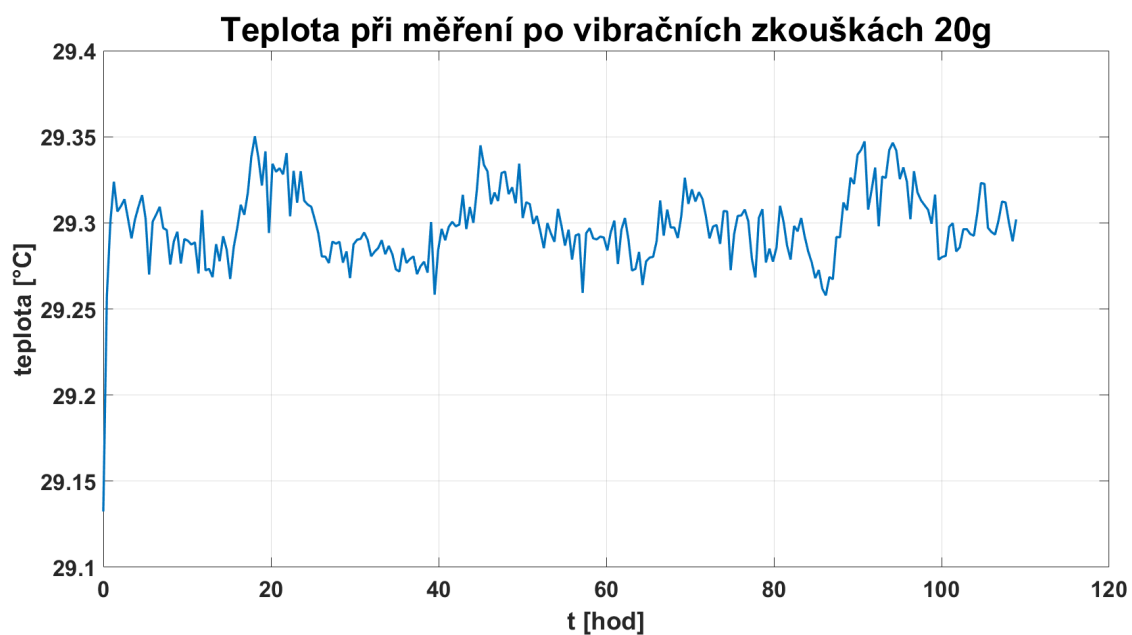


Obr. 2.22: Allanova odchylna po vibračních zkouškách 20g pro ADXRS610

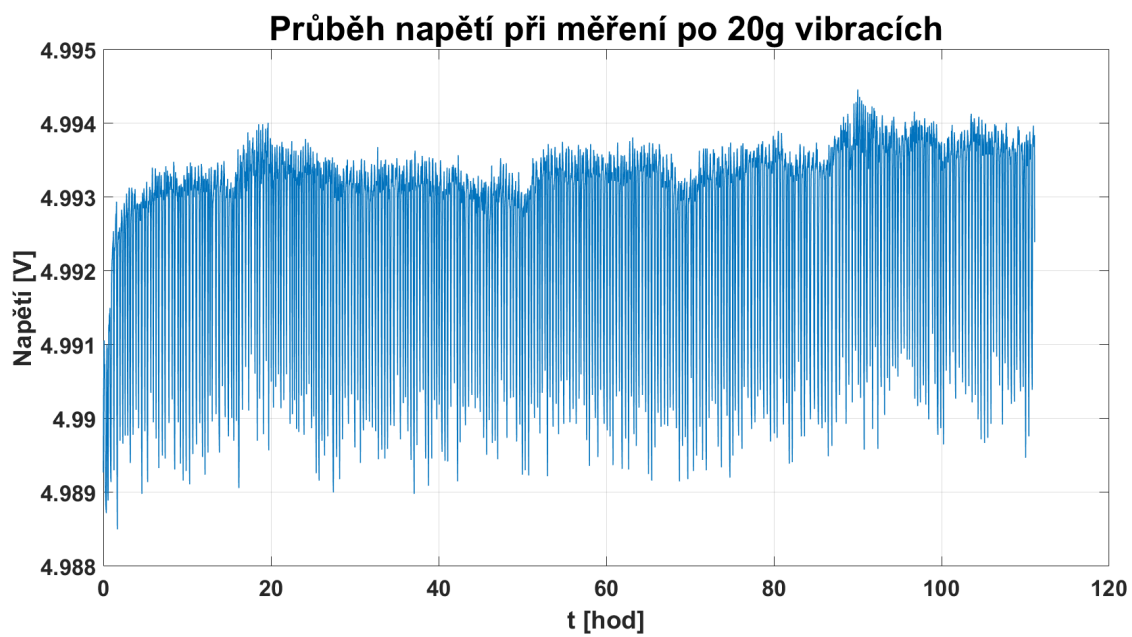
Jak je zřejmé z grafů 2.22, 2.23, parametr Angle Random Walk zůstává neměnný. U parametru Bias Instability došlo ke zlepšení oproti měření před vibračními zkouškami. Napájecí napětí při měření po 20g vibracích bylo srovnatelně stabilní jako při měření před vibračními zkouškami, viz. graf 2.25 a graf s vykreslenými Allanovými odchylnkami 2.26. Teplota v teplotní komoře se významně nemění, viz. graf 2.24, což jsme předpokládali. Dle grafu 2.27 "peak" Allanovy odchylnky snímačů koreluje s napájecím napětím. Měření bylo prováděno v klimatizované laboratoři - je otázkou jak se klimatizace chová přes víkend a jaký je pohyb v laboratoři, každopádně tyto podmínky nemůžeme ovlivnit. V této chvíli se může provést měření se stabilnějším zdrojem napětí.



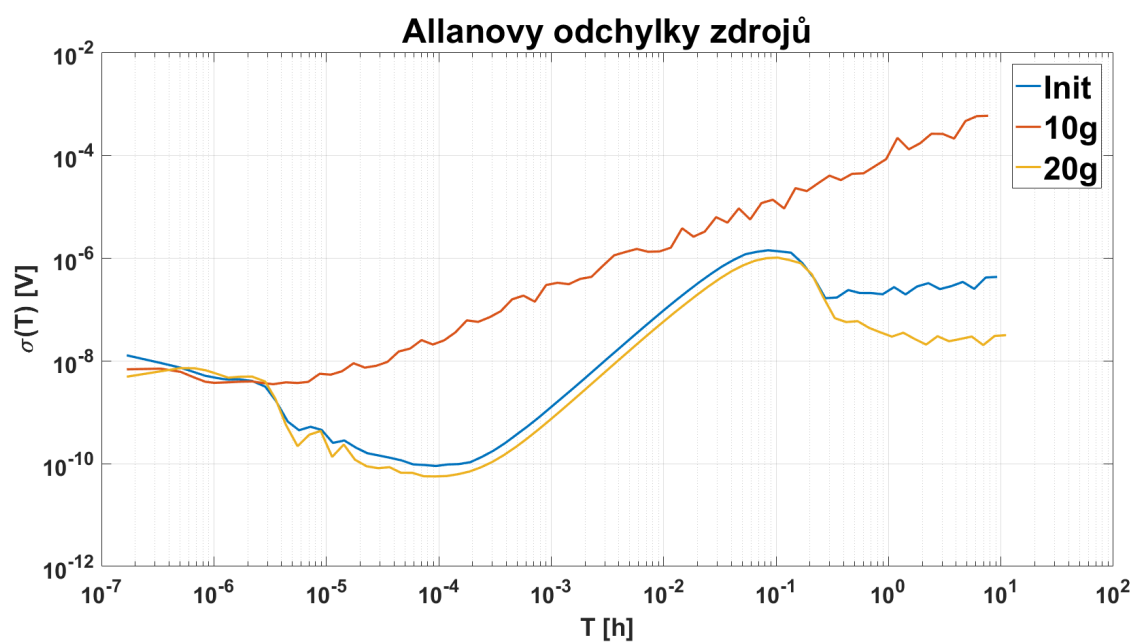
Obr. 2.23: Allanova odchylka po vibračních zkouškách 20g pro ADXRS613



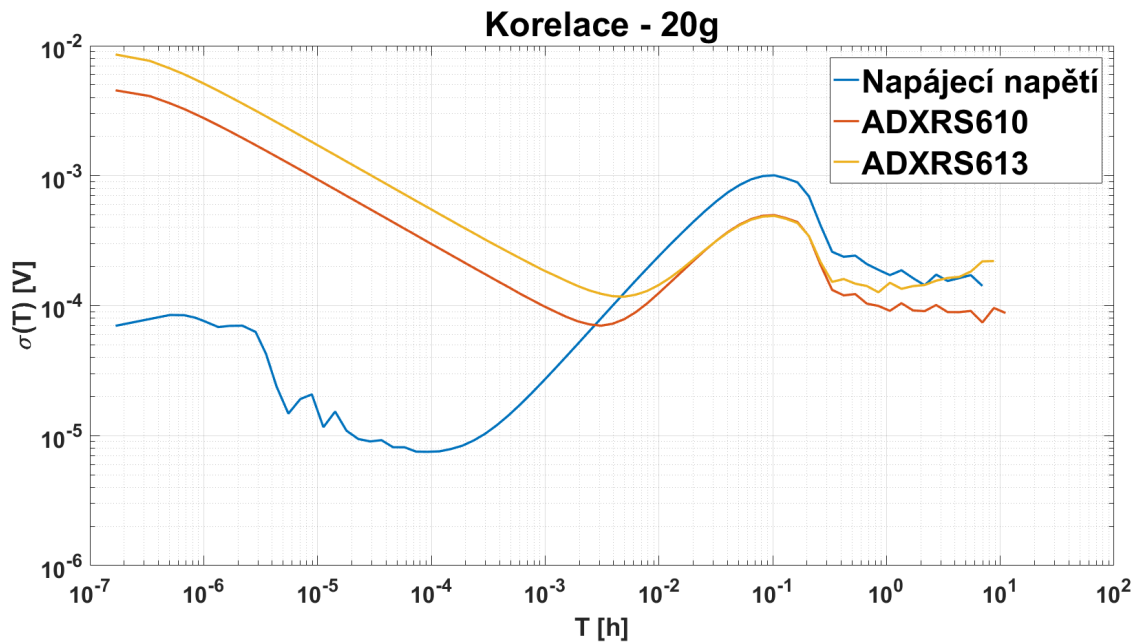
Obr. 2.24: Vývoj teploty v teplotní komoře - 20g



Obr. 2.25: Napětí při měření v teplotní komoře - 20g



Obr. 2.26: Allanovy odchylky napětí - 20g



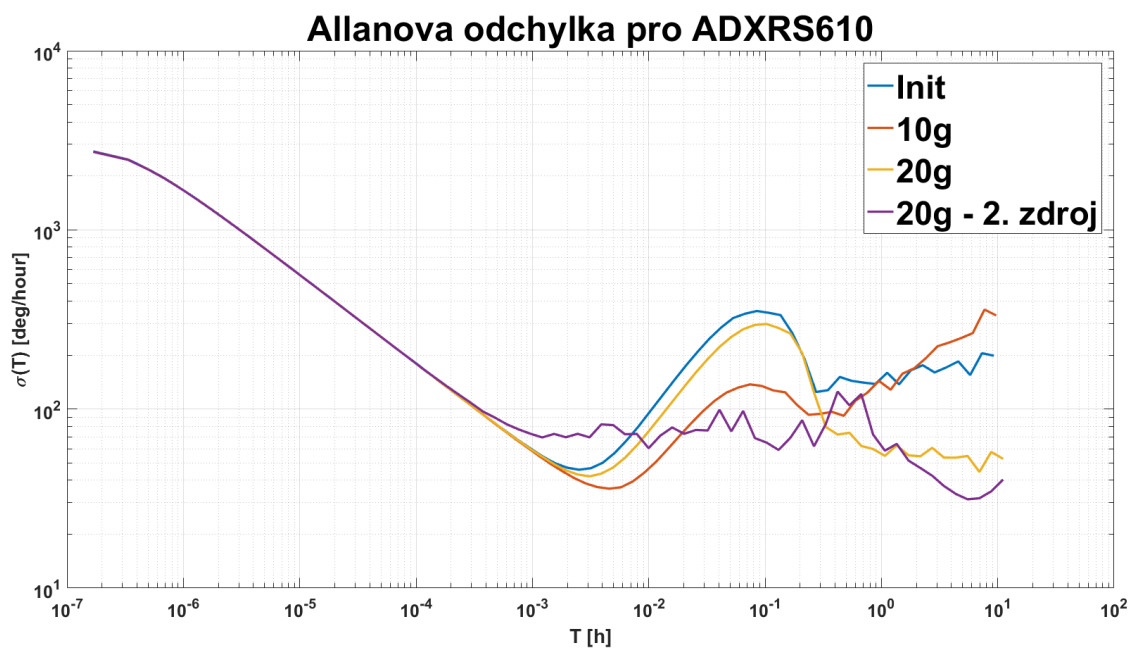
Obr. 2.27: Korelace Allanovy odchylky snímačů s napětím - 20g

Měření s jiným zdrojem a jiným rozestavením

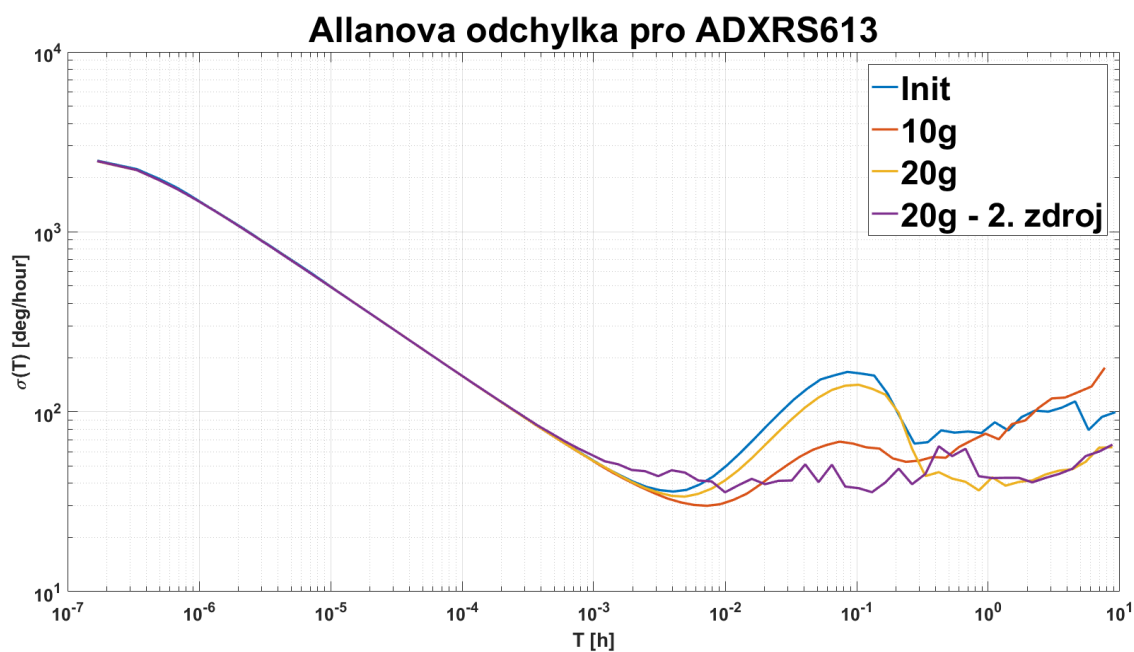
Vzhledem ke zjištění, že napájecí napětí má výrazný vliv na měření, bylo provedeno druhé měření po 20g vibracích se snahou eliminovat vlivy, které by mohly ovlivňovat stabilitu napětí. Byl vybrán jiný zdroj napětí, a to Agilent E3615. Z možných zdrojů pouze tento má v katalogovém listu popsáno, jak se mění jeho napětí s teplotou. Vzhledem ke skutečnosti, že ostatní zdroje nemají popsáno, jak se mění napětí s teplotou, nebylo možné provést srovnání. Z časových důvodů nebylo možné provést měření stability zdrojů svépomocí. Také byl tento zdroj umístěn do podstatně větší vzdálenosti od výfuku vzduchu teplotní komory.

Výsledné křivky jsou zakresleny v grafech 2.28, 2.29.

Napájecí napětí bylo při tomto experimentu nejstabilnější ze všech dosavadních měření, viz. graf 2.30. V grafu 2.32 jsou zobrazeny Allanovy odchylky napájecích napětí pro provedená měření. Tento graf dokazuje, že při měření po vibracích 20g s 2. zdrojem bylo napájecí napětí nejstabilnější a po vibracích 10g byla stabilita napájecího napětí jednoznačně nejhorší ze všech provedených měření. Teplota jejíž záznam je v grafu 2.31 je stabilní. Z Allanovy odchylky snímačů se povedlo eliminovat "peak", který byl viditelný u předchozích měření a evidentně koreloval s napájecím napětím. Parametr Bias Instability u snímače ADXRS610 má lepší hodnotu než u předchozího měření, je však nutno říci, že se posunul o více jak 2 dekády doprava. U snímače ADXRS613 je parametr Bias Instability stejný jako u předchozího měření. Díky odstranění "peaku" jsme dosáhli křivky Allanovy odchylky lepšího



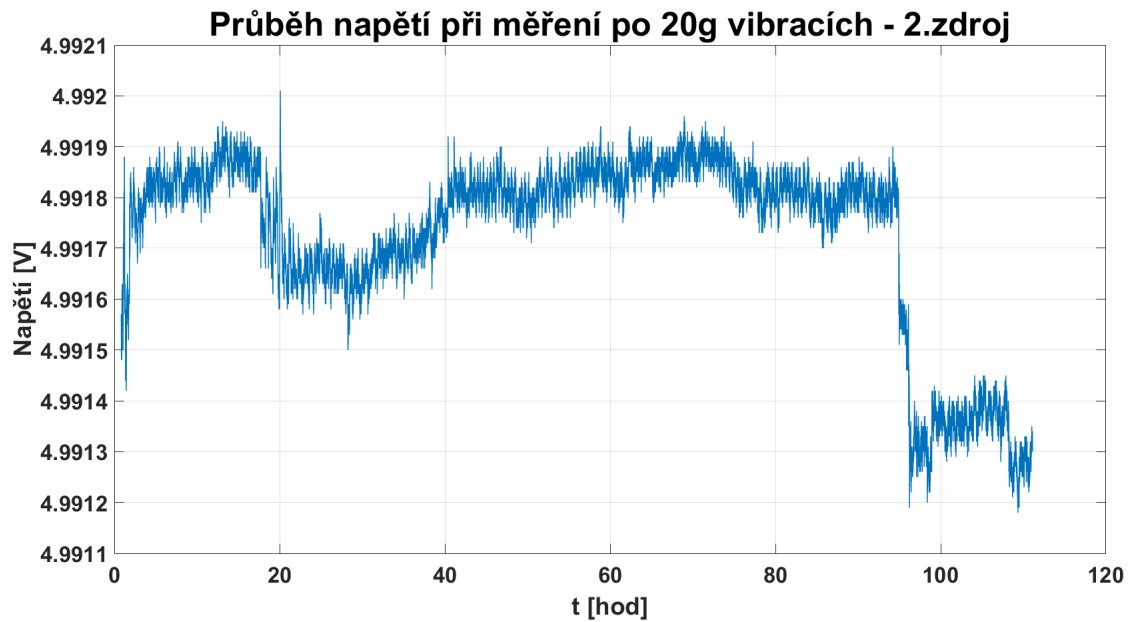
Obr. 2.28: Allanova odchylka se zdrojem Agilent E3615 pro ADXRS610



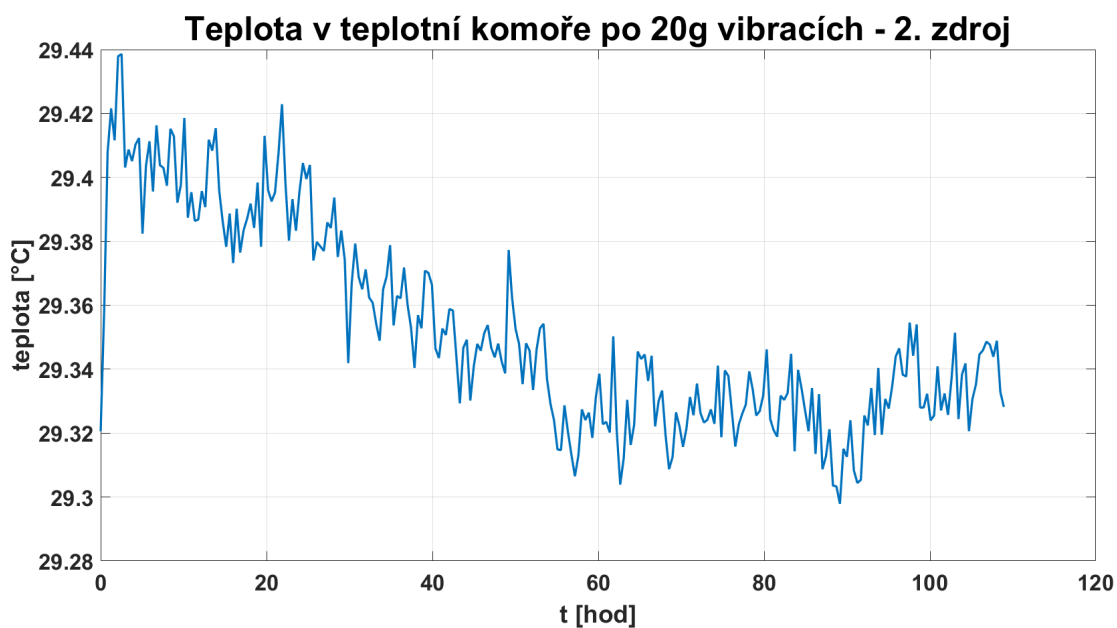
Obr. 2.29: Allanova odchylka se zdrojem Agilent E3615 pro ADXRS613

tvaru než u předchozích měření.

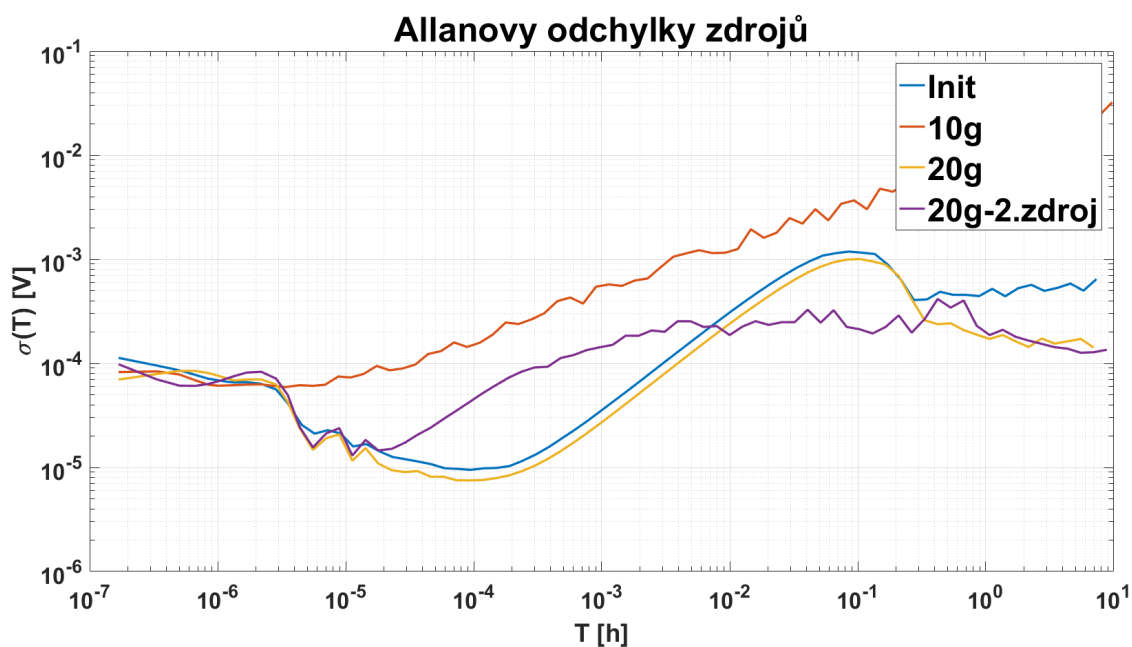
Bylo by vhodné měřit teplotu v místnosti, abychom mohli zjistit jaký vliv má teplota v místnosti na stabilitu napájecího napětí zdroje. Též by bylo možné měřit teplotu pomocí vlastních výstupů gyroskopů.



Obr. 2.30: Napětí při měření v teplotní komoře



Obr. 2.31: Vývoj teploty v teplotní komoře - 20g 2. zdroj

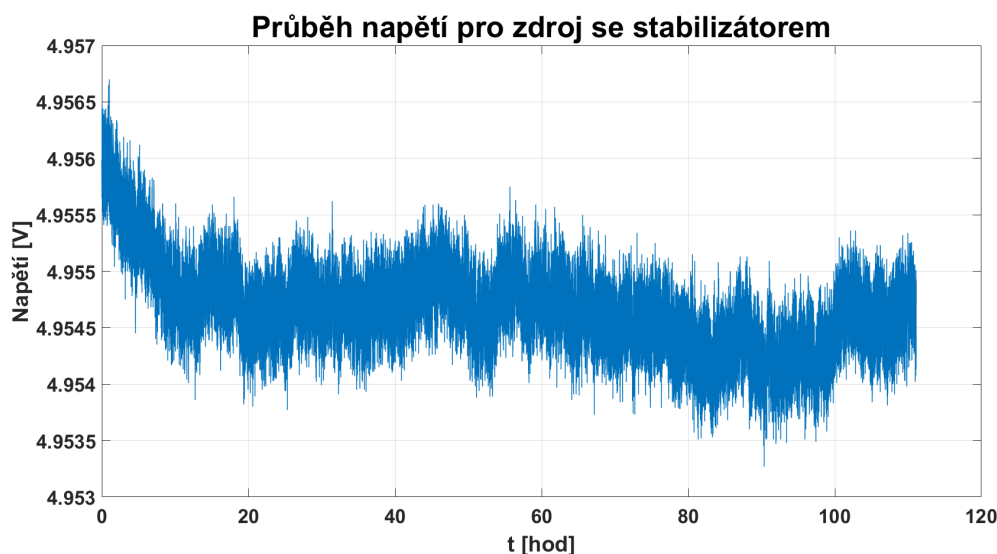


Obr. 2.32: Allanova odchylka zdrojů při jednotlivých měřeních

2.3.7 Měření - rázy

Po rázových zkouškách bylo provedeno další měření. Vzhledem ke skutečnosti, že stabilita napájecího napětí stále není ideální, bylo vyzkoušeno stabilizovat napětí pomocí lineárního stabilizátoru Lm2936. Po krátkém měření bylo však z tohoto záměru ustoupeno vzhledem k horším výsledkům než při měření se samotným zdrojem Agilent E3615. Přesto bylo měřeno výstupní napětí stabilizátoru, abychom to mohli potvrdit, viz. graf 2.35. K napájení gyroskopů byl použit zdroj napětí integrovaný v PXI 4130, jehož parametry jsou lepší než u zdroje Agilent E3615, viz. [17]. Také byla měřena teplota v místnosti pomocí druhého snímače teploty Pt100.

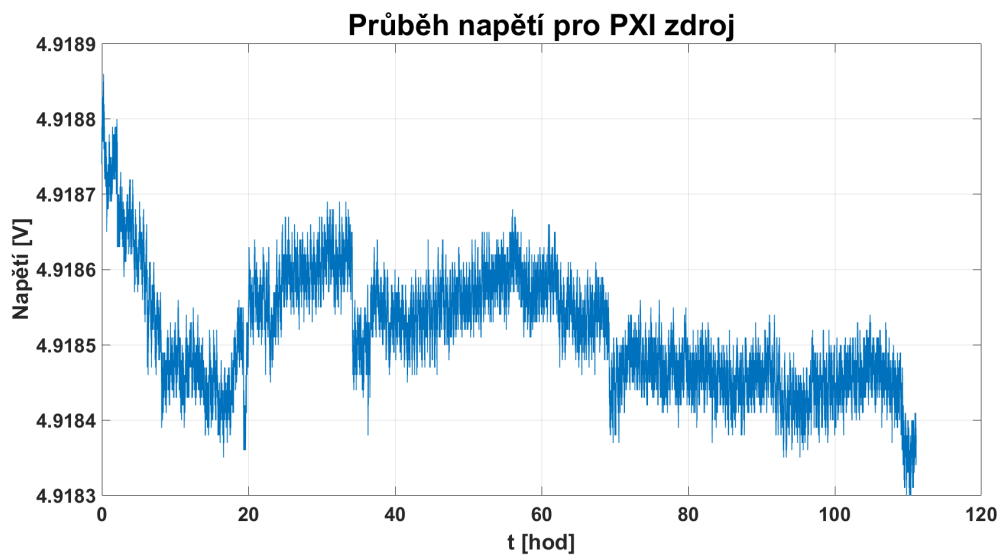
Na obr. 2.33 je zobrazen vývoj napětí na výstupu lineárního stabilizátoru Lm 2936. Na obr. 2.34 je zobrazen vývoj napětí Pxi zdroje ze kterého byly napájeny měřené gyroskopy. Na obr. 2.35 jsou zobrazeny Allanovy odchylky zdrojů pro všechna provedená měření. Z tohoto obrázku vyplývá, že nejvyšší stability bylo dosaženo se zdrojem v Pxi 4130, čili při měření po rázových zkouškách. U zdroje Pxi 4130 není u Allanovy odchylky "peak" viditelný u ostatních zdrojů. Peak se neprojevil ani u stabilizátoru Lm 2936, tudíž pro měření by byl vhodnější než předchozí použité zdroje.



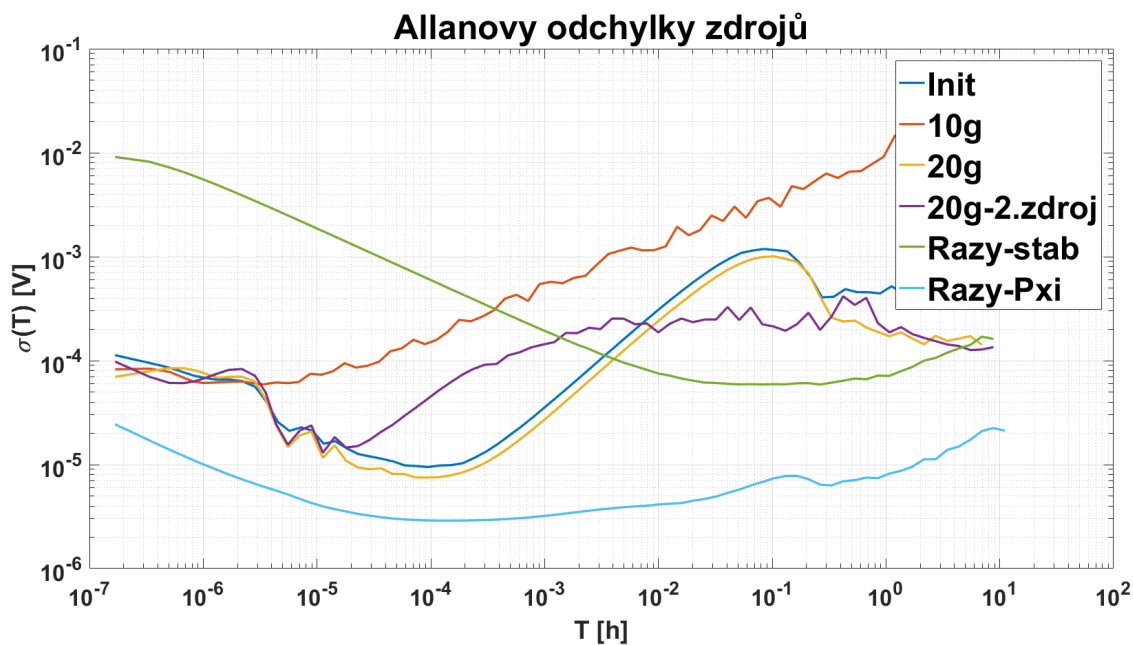
Obr. 2.33: Vývoj napětí na výstupu stabilizátoru Lm 2936.

Na obr. 2.36 je zobrazen vývoj teploty v teplotní komoře. Stabilita teploty odpovídá předchozím měřením s využitím teplotní komory. Lépe již parazitní vliv teploty omezit nemůžeme.

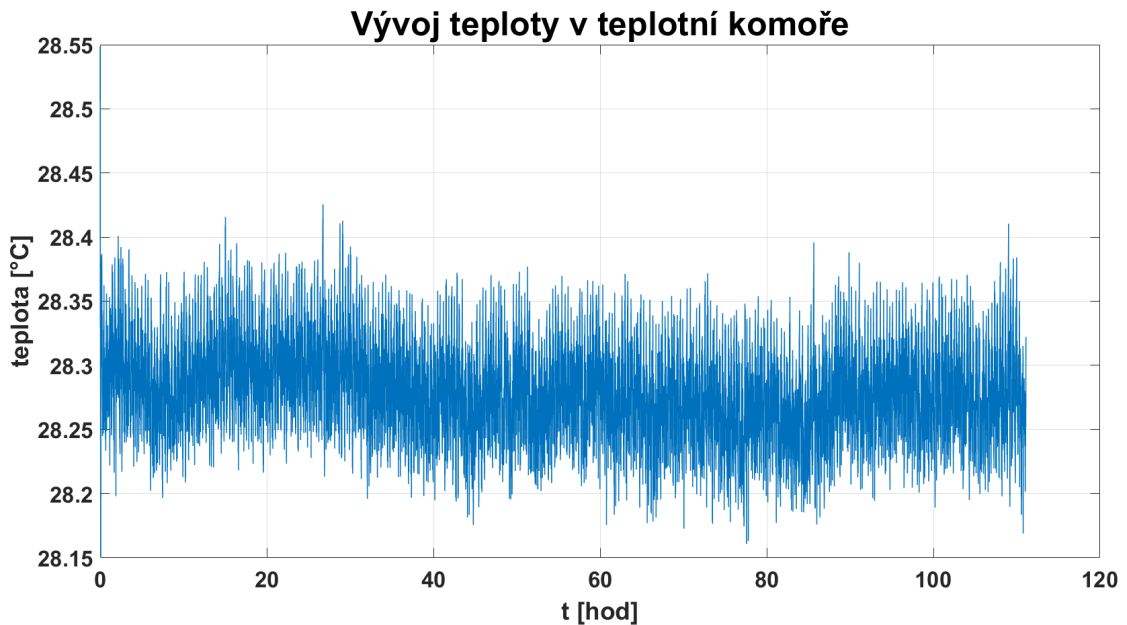
Na obr. 2.37 je zobrazen vývoj teploty mimo teplotní komoru v klimatizované místnosti. Teplota se zde mění v rozsahu cca 1,5 °C. V tomto grafu neodpovídá teplota značená na y-vé ose skutečné teplotě v místnosti. Snímač teploty Pt100,



Obr. 2.34: Vývoj napětí zdroje v Pxi 4130



Obr. 2.35: Allanova odchylka zdrojů při jednotlivých měřeních

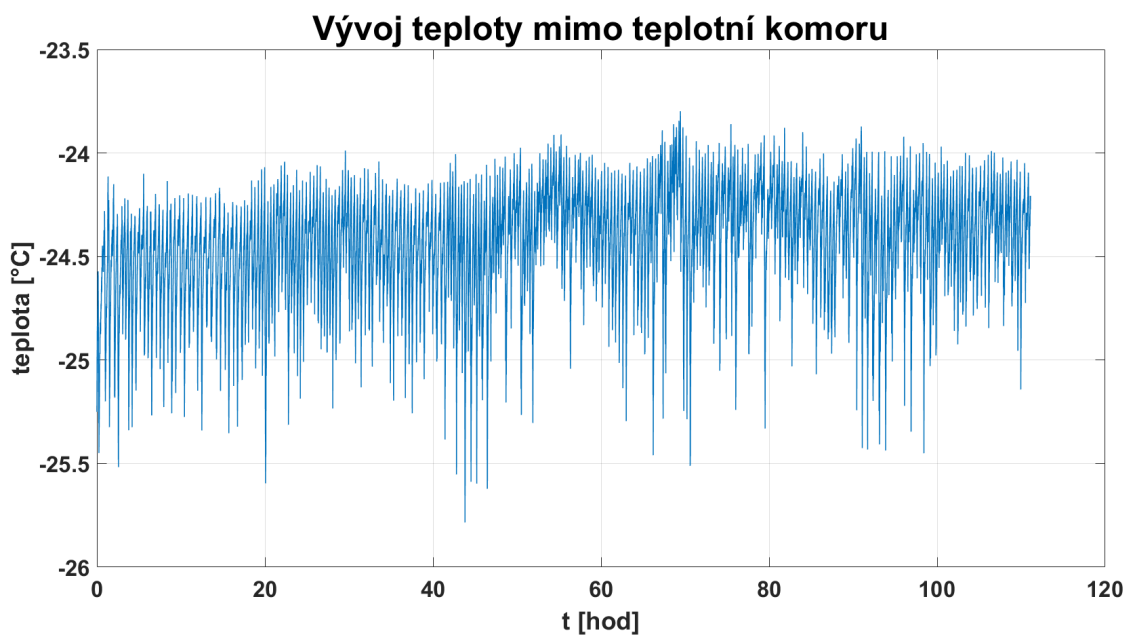


Obr. 2.36: Vývoj teploty v teplotní komoře po rázových zkouškách

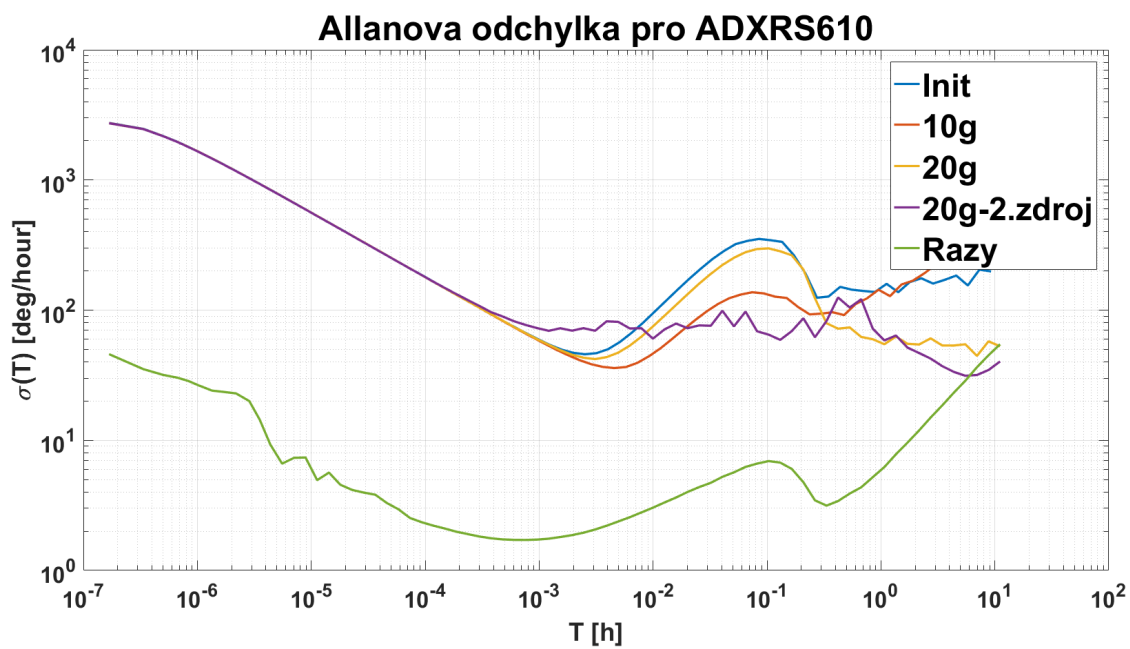
který by měl mít při nulové teplotě 100Ω měl při teplotě 25°C cca 90Ω . Díky tomu graf ukazuje, že teplota v laboratoři byla pod bodem mrazu, což není pravda. Byla cca 25°C . Nám jde především o informaci, jak moc se teplota měnila, a proto se s tímto spokojíme.

Na obr. 2.38 jsou zobrazeny průběhy Allanovy odchylky pro snímač ADXRS610. Změna po rázových zkouškách je naprosto zřejmá. Křivka je posunuta asi o 2 dekadý níže, což by znamenalo výrazné zlepšení parametrů. To je výsledek nečekaný a těžko vysvětlitelný. Je možné, že při rázových zkouškách došlo k poškození gyroskopu, ačkoliv při základním ověření funguje. Vzhledem k časovému průběhu výstupu gyroskopu, viz. obr. 2.39 je nepravděpodobné, že by došlo k chybnému měření, neboť výstup gyroskopu při nulové úhlové rychlosti má být cca 2,5 V a hodnoty, které ukazuje graf jsou v toleranci výrobce. Mohlo dojít k poškození mechanické části zodpovědné za dlouhodobou stabilitu a šum, což bez dalšího měření, které vzhledem k časové tísně nelze provést, nelze tvrdit.

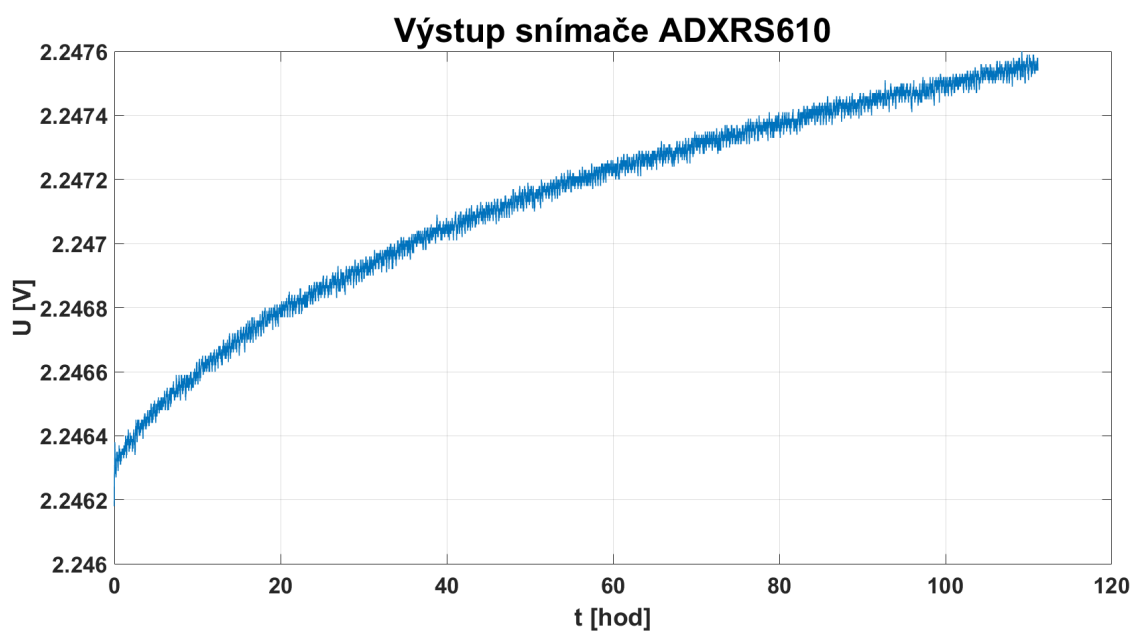
Na obr. 2.40 jsou zobrazeny průběhy Allanovy odchylky pro snímač ADXRS613. Dle tohoto grafu můžeme konstatovat, že došlo k vyřešení problému s "peakem", který koreloval s napájecím napětím. Kritickým bodem je tedy použití stabilního zdroje napětí a ideální by bylo nejspíš umístění celého měřicího řetězce do teplotní komory, což vzhledem k rozměrům komory není možné.



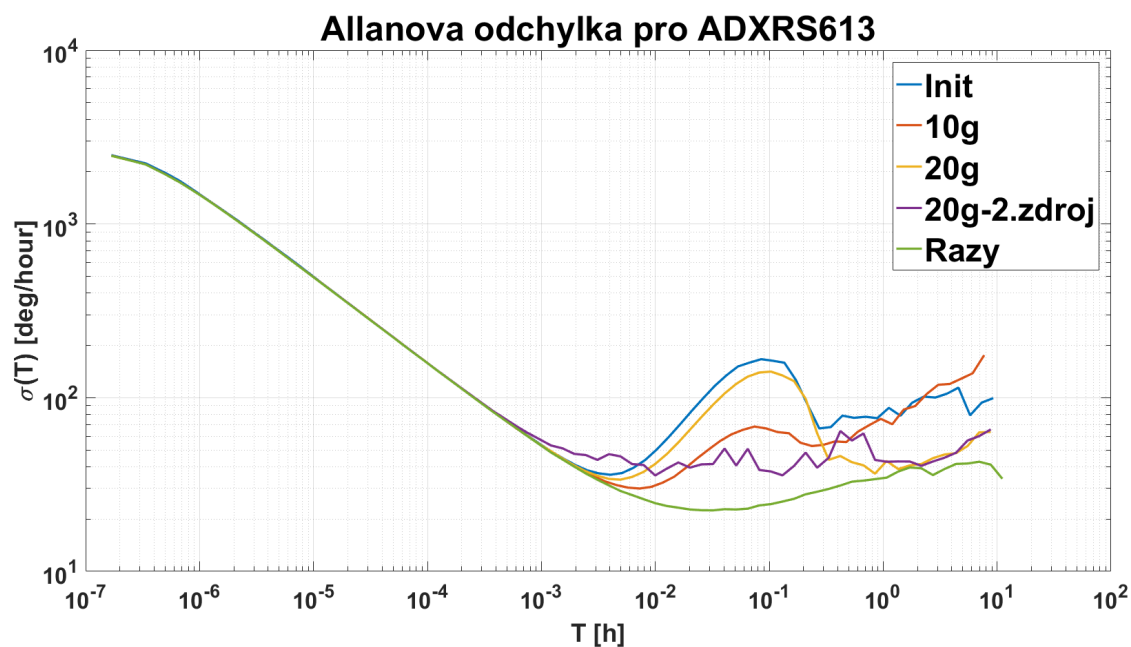
Obr. 2.37: Vývoj teploty mimo teplotní komoru



Obr. 2.38: Allanova odchylka pro jednotlivé měření snímače ADXRS610



Obr. 2.39: Časový průběh napětí na výstupu snímače ADXRS610



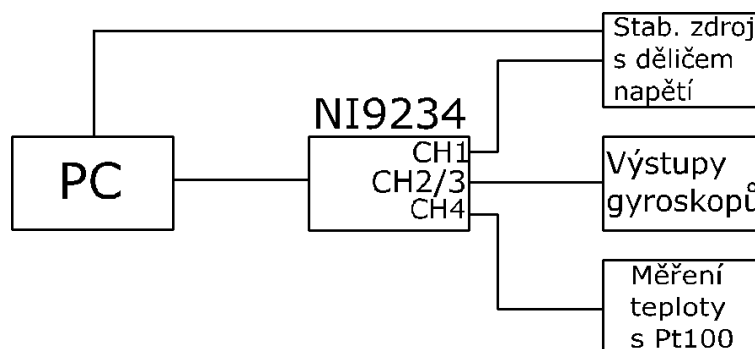
Obr. 2.40: Allanova odchylka pro jednotlivé měření snímače ADXRS613

2.4 Měření parametru run-to-run

S použitím programu pro run-to-run a hardwaru popsaného výše bylo realizováno měření. Naměřená data byla využita k výpočtu parametru run-to-run. K výpočtu byl využit software NI LabVIEW 2017 a k vykreslení grafu software Matlab 2016.

2.4.1 Schéma měření

Na obr. 2.41 je zobrazeno schéma měření podobné jako při měření Allanovy odchylky. Navíc je zde ovládání zdroje pomocí programu v LabVIEW.



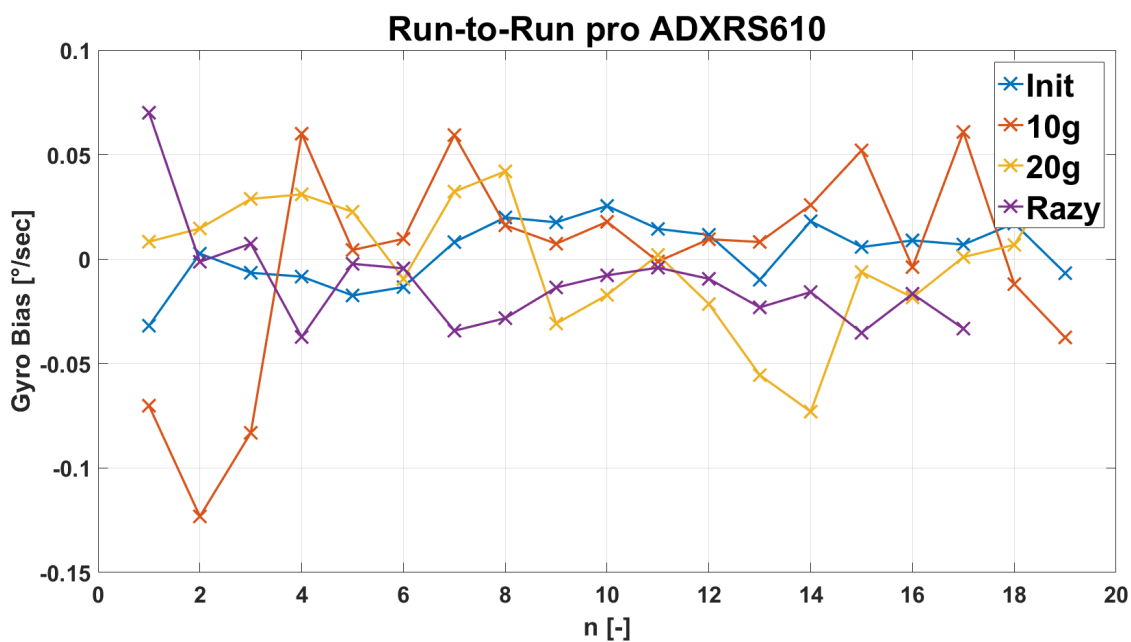
Obr. 2.41: Schéma měření

2.4.2 Run-to-Run pro snímače ADXRS610, ADXRS613

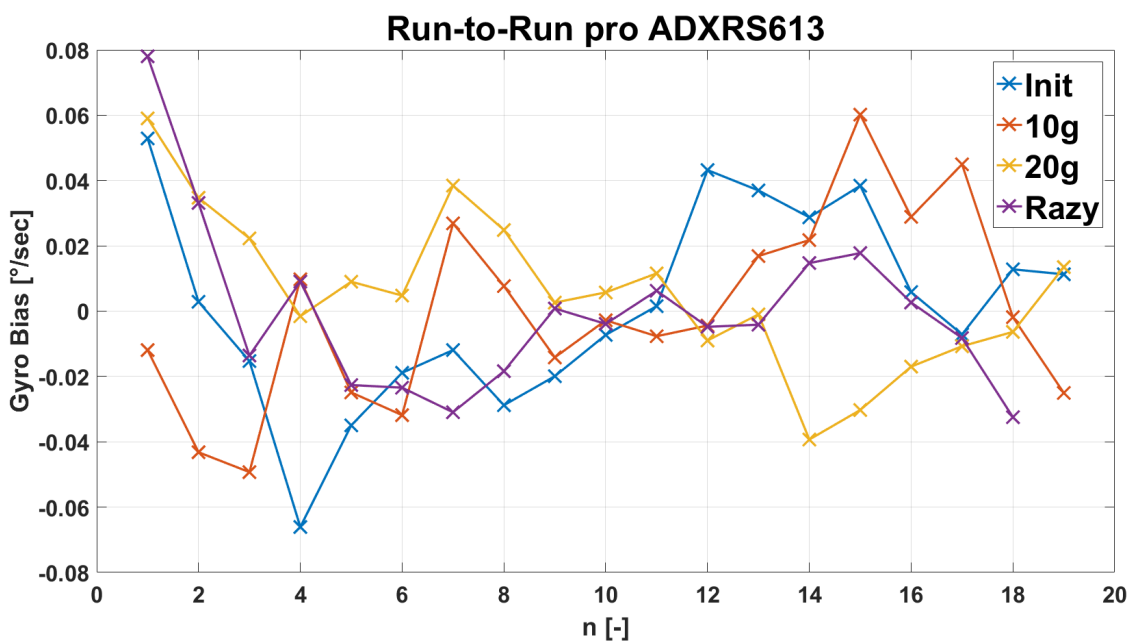
Měření parametru Run-to-Run probíhalo v cyklech 30min. měření, 30min. vypnuté napájení. Následně byla pomocí softwaru NI LabVIEW určena střední hodnota na výstupu gyroskopů v jednotlivých cyklech a z těchto hodnot vytvořeny grafy 2.42, 2.43. Statistika ukázána v tab. 2.9

Měření	ADXRS610			ADXRS613		
	Min. [°/s]	Max. [°/s]	Δ_{\max} [°/s]	Min. [°/s]	Max. [°/s]	Δ_{\max} [°/s]
Init	-0,035	0,025	0.060	-0,066	0,053	0.119
10g	-0,123	0,061	0.184	-0,049	0,060	0.109
20g	-0,073	0,047	0.12	-0,060	0,059	0.119
Rázy	-0,037	0,070	0.107	-0,032	0,078	0.110

Tab. 2.9: Statistika parametru Run-to-Run



Obr. 2.42: Run-to-Run pro snímač ADXRS610



Obr. 2.43: Run-to-Run pro snímač ADXRS613

2.4.3 Zhodnocení

U snímače ADXRS613 můžeme dle grafu 2.43 a dle tab. 2.9 říci, že parametr Run-to-Run se po vibračních zkouškách nezměnil. U snímače ADXRS610 došlo ke změnám, kdy po vibracích 10g jsou hodnoty nejvyšší, po vibracích 20g se opět snížily, ale stále jsou 2x vyšší než před vibračními zkouškami. Po rázových zkouškách jsou hodnoty podobné jako po vibracích 20g. Můžeme tedy konstatovat, že u snímače ADXRS610 došlo po vibracích ke změně parametru Run-to-Run, a to tak, že je cca 2x vyšší než při měření před vibracema. Nicméně vzhledem k numerickým hodnotám, můžeme říci, že tento parametr nehraje významnou roli, stejně jako říká zdroj [10].

3 Závěr

V teoretické části práce jsou představeny principy gyroskopů včetně MEMS gyroskopů, kterými se tato práce zabývá. Dále jsou popsány typické parametry MEMS gyroskopů a metody sloužící ke stanovení stochastických parametrů s důrazem na Allanovu odchylku, která je v této práci využita.

Dále bylo přistoupeno k praktické části práce. Byl vytvořen program v LabVIEW pro sběr dat pro výpočet Allanovy odchylky a program pro stanovení parametru Run-to-Run. V části požadavky na program jsou popsány informace potřebné pro práci s naměřenými daty ve formátu tdms. Také je popsán hardware obsažený v měřícím řetězci, jehož středem jsou MEMS gyroskopy ADXRS610 a ADXRS613 společně s měřicí kartou NI 9234.

V další části je popsáno první měření Allanovy odchylky včetně určení stochastických parametrů. Poté byly gyroskopy vystaveny vibračním zkouškám 10g a mělo dojít k vyhodnocení změn stochastických parametrů. K tomu nedošlo vzhledem ke zjevným problémům se stabilitou napájecího napětí gyroskopů a možnými problémy se stabilitou teploty, tzn. byly stanoveny stochastické parametry, ale změny těchto parametrů byly překryty rušivými vlivy. Při tomto měření nebyla zapnuta v laboratoři klimatizace, což mělo významný vliv na stabilitu napájecího zdroje. A proto měření následující byla prováděna se zapnutou klimatizací.

Vzhledem k časové náročnosti měření nebylo možné provádět měření několikrát za účelem eliminace rušivých vlivů, a proto byly minimalizovány postupně.

Gyroskopy byly vystaveny vibračním zkouškám 20g. Následovalo další měření Allanovy odchylky gyroskopů, tentokrát s měřením teploty v teplotní komoře a se zapnutou klimatizací v laboratoři. Zde se potvrdilo, že teplota v teplotní komoře je stabilní a velkým problémem je stabilita napájecího napětí.

Vzhledem k problémům se stabilitou napájecího napětí bylo přistoupeno k volbě jiného napájecího zdroje, a to zdroje Agilent E3615. Následovalo druhé měření po vibracích 20g, kdy volbou zdroje Agilent E3615 a volbou jiné polohy napájecího zdroje v místnosti došlo ke zlepšení výsledku, viz. část měření s jiným zdrojem a jiným rozestavením .

Následně byly gyroskopy vystaveny rázovým zkouškám. Poté bylo přistoupeno k poslednímu měření. Vzhledem k trvajícím problémům se stabilitou napájecího napětí byly gyroskopy napájeny ze zdroje v Pxi 4130 u kterého byly vzhledem k povaze zařízení a katalogovým údajům očekávány parametry lepší než u stávajícího zdroje Agilent E3615, což se záhy potvrdilo. Zde evidentně došlo k vyřešení problému se stabilitou napájecího napětí. Dále byla vyzkoušena stabilita zdroje Agilent E3615 v kombinaci s lineárním stabilizátorem LM 2936 se závěrem, že i tento by se dal použít k napájení gyroskopů.

Dále byl průběžně měřen parametr Run-to-Run. Měření je popsáno v praktické části v části měření parametru Run-to-Run. Zde nedošlo k problémům a potvrdilo se tvrzení [10], že tento parametr je významný pouze u levných snímačů.

Vzhledem k rozdílným podmínkám v kombinaci s výše popsány problémy nebylo možné stanovit, jak se změní stochastické parametry MEMS gyroskopů po životnostních zkouškách. Nyní by bylo vhodné začít s měřením od začátku s novými gyroskopy, s napájecím zdrojem v Pxi 4130, který má nejlepší katalogové hodnoty z dostupných zdrojů, výše potvrzené měřením. Napájecí zdroj by neměl být umístěn blízko výfuku vzduchu teplotní komory. Snímače musí být umístěny v teplotní komoře. Laboratoř, ve které probíhá měření, musí být klimatizovaná a ideálně bez pohybu osob, aby nedocházelo k otevírání dveří nebo oken. Vzhledem k časové tísně a časové náročnosti měření, nelze toto měření momentálně provést.

Literatura

- [1] Integrované MEMS GYROSKOPY | Automatizace.HW.cz. Automatizace.HW.cz | Elektronika v automatizaci [online]. Copyright © 1997 [cit. 05.01.2018]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>
- [2] AGGARWAL, Priyanka. *MEMS-based integrated navigation*. 1. Boston: Artech House, c2010. GNSS technology and applications series. ISBN 978-1608070435.
- [3] HOU, Haiying. *Modeling Inertial Sensors Errors Using Allan Variance*. Calgary, 2004. M.Sc. thesis. University of Calgary.
- [4] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [5] HASIK, S. *Testování MEMS gyroskopů*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing.Stanislav Klusáček, Ph.D.
- [6] VÁGNER, Martin. *Návrh a identifikace rozšířeného modelu MEMS gyroskopu*. Brno, 2015, 148 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
- [7] EL-SHEIMY, Naser, Haiying HOU a Xiaoji NIU. Analysis and Modeling of Inertial Sensors Using Allan Variance. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2008, **57**(1), 140-149 [cit. 2017-12-14]. DOI: 10.1109/TIM.2007.908635. ISSN 0018-9456. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4404126/>
- [8] LI, Jintao a Jiancheng FANG. Not Fully Overlapping Allan Variance and Total Variance for Inertial Sensor Stochastic Error Analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2013, **62**(10), 2659-2672 [cit. 2017-12-14]. DOI: 10.1109/TIM.2013.2258769. ISSN 0018-9456. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6576249/>
- [9] MATEJCEK, Miroslav a Mikulas SOSTRONEK. Computation and evaluation allan variance results. In: *2016 New Trends in Signal Processing (NTSP)* [online]. IEEE, 2016, s. 1-9 [cit. 2017-12-14]. DOI: 10.1109/NTSP.2016.7747786. ISBN 978-8-0804-0529-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7747786/>

- [10] IEEE Std 1431-2004. *IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros*. New York, NY, USA: IEEE, 2004.
- [11] LALANNE, Christian. *Mechanical vibration and shock analysis*. Third edition. Hoboken, NJ, USA: John Wiley and Sons, 2014. ISBN 978-1-84821-644-0.
- [12] Gyroskop. *FYZMATIK* [online]. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/633-gyroskop.html>
- [13] Gyroscope - *Simple English Wikipedia, the free encyclopedia*. [online]. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <https://simple.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>
- [14] O. J. Woodman, “An introduction to inertial navigation,” Tech. Rep. 696, University of Cambridge, Computer Laboratory, 15 JJ Thomson Avenue, Cambridge CB3 0FD, United Kingdom, August 2007. ISSN 1476-2986.
- [15] The NI TDMS File Format. *National Instruments*. [online]. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/3727/en/>
- [16] NI-9234. *National Instruments* [online]. [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz/support/model.ni-9234.html>
- [17] PXI 4130. *National Instruments* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374746e.pdf>

Seznam příloh

A	Obsah přiloženého CD	65
A.1	allan_odchylka	65
A.2	runtorun	65
A.3	zpracovani_labview	65
A.4	zpracovani_matlab	65

A Obsah přiloženého CD

Na CD jsou 4 složky:

- allan_odchylka
- runtorun
- zpracovani_labview
- zpracovani_matlab

A.1 allan_odchylka

V této složce je program v LabVIEW 2017 pro sběr dat pro výpočet Allanovy odchylky. Nastavení vstupních podmínek a výstupního souboru se provádí v Allan1. V souboru formatTdms je pouze definováno formátování výstupního souboru.

A.2 runtorun

V této složce je program v LabVIEW 2017 pro sběr dat pro výpočet parametru Run-to-Run. Ve složce runtorun/E/runtorun je program Runtorun, ve kterém se provádí nastavení vstupních podmínek a výstupního souboru. V souboru tdmsformat je pouze definováno formátování výstupního souboru. Ve složce runtorun/C/-Program Files/National Instruments/LabVIEW 2017/instr.lib/Agilent E363X Series jsou ovladače pro ovládání programovatelného zdroje Agilent E3631.

A.3 zpracovani_labview

V této složce je soubor runtorun pro vypočtení průměrných hodnot pro jednotlivá měření parametru runtorun. Dále jsou zde soubory pro vykreslení grafů výstupů snímačů, napětí nebo teploty s možností průměrování. Soubory byly vytvořeny v LabVIEW 2017.

A.4 zpracovani_matlab

Soubor AllanEvaluation slouží k určení stochastických parametrů z allanových odchylek. Zbylé programy slouží k vykreslení grafů z uložených pracovních prostorů. Soubory byly vytvořeny v software Matlab 2016.