

SYSTEM FOR MEMS GYROSCOPE TESTING

Stanislav Hasík

Master Degree Programme (2), FEEC BUT

E-mail: xhasik02@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Stanislav Klusáček

E-mail: klusacek@feec.vutbr.cz

Abstract: This paper presents fundamental information about an apparatus for tests on MEMS gyroscopes. Within the introductory section, the measurement system used to test MEMS gyroscopes at a Honeywell laboratory is characterized; the set-up comprises a Polytec MSA-500 analyzer, goniometers, and a controller. The related practical part then describes an application developed with the LabVIEW software to control the position of the goniometers. Importantly, the discussed system is able to fully control two goniometer stages and to align the MEMS device surface into an orthogonal position with respect to the Polytec MSA-500 measurement unit.

Keywords: MEMS gyroscope, Polytec MSA-500, Goniometer, Controller, Topography

1. ÚVOD

MEMS gyroskopy jsou Mikro-Elektro-Mechanické Snímače úhlové rychlosti vztažené k inerciální referenční soustavě a jde o snímače malých rozměrů a malé hmotnosti a nízkou spotřebou energie, což je jejich největší výhodou. MEMS gyroskopy jsou většinou založeny na měření Coriolisovy síly působící na pohybující se setrvačnou hmotu při současném působení úhlové rychlosti. Velikost Coriolisovy síly (F) je určena vztahem:

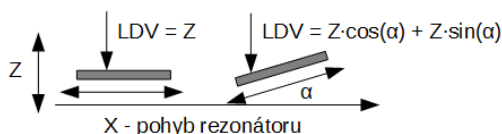
$$F = -2m\bar{\Omega} \times \bar{v} \quad (1)$$

Ve společnosti Honeywell International s.r.o. jsou vyvíjeny MEMS gyroskopy pro použití v inerciálních navigačních systémech pro letecký a vesmírný průmysl. Tyto senzory jsou tedy využívány jako snímače úhlového natočení získané integrací úhlové rychlosti měřené gyroskopem. Výsledná hodnota natočení je však při integraci zatěžována nepřesností měřené hodnoty a to především výstupní hodnotou při nulové úhlové rychlosti tzv. offsetem. Velikost chyby gyroskopu při nulové výchylce je rozhodující pro dlouhodobou integraci výstupu a tedy i pro přesnost inerciálního navigačního systému. Tato chyba offsetu je z velké části způsobena tím, že setrvačná hmota, elektrostaticky vybuzená do mechanické rezonance, nekmitá pouze v ose buzení, ale dochází k přenosu pohybu i do ostatních os a to zejména do osy, ve které dochází k měření Coriolisovy síly (viz **Obrázek 1**). Tímto jevem dochází k offsetu na výstupním signálu snímače. Tento přenos kmitání je z velké části způsoben nedokonalostmi výrobního procesu mechanické struktury gyroskopu, která u MEMS výrobních procesů dosahuje jednotek procent.

2. TESTOVÁNÍ MEMS GYROSKOPŮ

Jednou z nejpřesnějších metod jak testovat statické parametry gyroskopu (offset) je přímé měření výchylek setrvačné hmoty pomocí laserového vibrometru. Proto byl pro testování použit měřicí systém Polytec MSA-500, který obsahuje Laser Doppler Vibrometr (LDV) a dokáže měřit výchylku v kolmém směru s rozlišením $0,1 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$. Aby bylo možné stanovit příčnou výchylku vybuzené setrvačné hmoty způsobenou nepřesnostmi při výrobním procesu (offset při nulovém natočení), je nutné nastavit klidovou polohu tak, aby rovina setrvačné hmoty byla dokonale kolmá k měřicí optice analyzátoru. Proto byl navržen komplexní měřicí řetězec, který mimo jiné

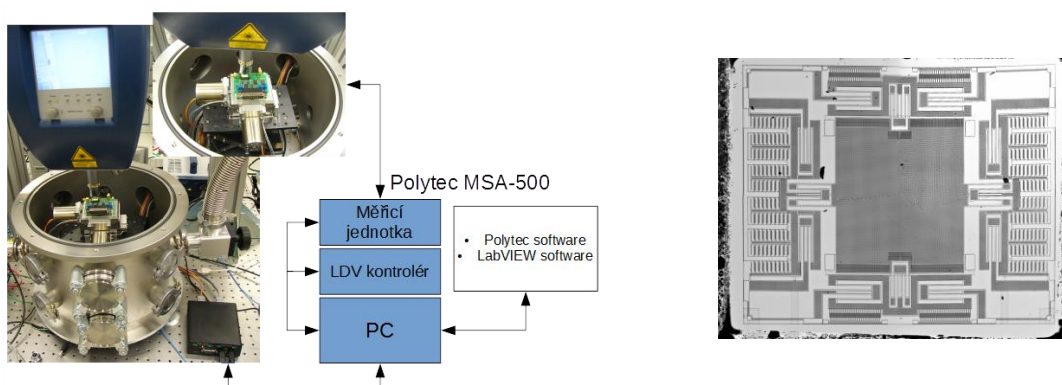
kompenzuje vliv náklonu struktury a tím umožňuje přesnější měření nedokonale pohybující se struktury gyroskopu, ve směru Z na obrázku 1, a určení mechanické složky offsetu.



Obrázek 1: Chyba měření způsobená náklonem

2.1. POPIS MĚŘICÍHO ŘETĚZCE

Pro dokonalé ustavení povrchu setrvačné hmoty do směru kolmého k měřicí optice LDV MSA-500 byla použita dvojice goniometrických plošin řízených prostřednictvím programu v prostředí NI LabVIEW. K získání referenčního údaje o náklonu zkoumaného povrchu se využívá další z vybavení měřicího analyzátoru MSA-500 a to topografické měření povrchu. Ukázka celé měřicí aparatury pro testování MEMS gyroskopů je na **Obrázek 2 a)**:



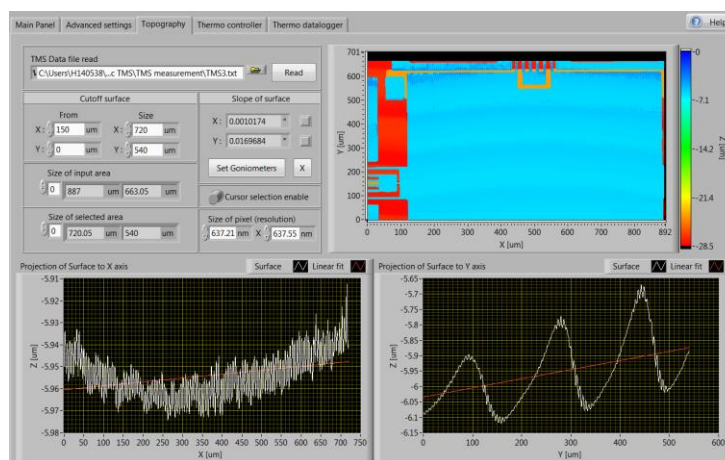
Obrázek 2: a) Měřicí aparatura pro testování gyroskopů; b) ukázka MEMS gyroskopu [1]

Příklad mechanické struktury MEMS gyroskopu je na **Obrázek 2 b)**. Jedná se o design vycházející z [1], jehož parametry (rezonanční frekvence, velikost kapacity řídicího a snímacího obvodu, atd.) byly upraveny tak, aby odpovídaly parametrům snímače vyvíjeného interně firmou Honeywell International s.r.o. Mechanická struktura gyroskopu je umístěna do LCC32 pouzdra, která společně s elektronikou tvoří gyroskopický systém. Tento systém je poté upevněn na dvojici goniometrických plošin, které umožňují náklon systému v osách X a Y až o $\pm 2,5^\circ$ s rozlišením $10''$. Celé toto zařízení je posléze umístěno do vakuové komory. Každý goniometr obsahuje pohon s krokovým motorem a dvojicí koncových spínačů. Goniometry jsou řízeny kontrolérem, do kterého jsou po USB rozhraní posílány příkazy z prostředí LabVIEW. Kontrolér je zapojen do systému MSA-500 firmy Polytec, kde je spuštěn program pro obsluhu MSA-500, jak je naznačeno na **Obrázek 2 a)**.

2.2. POSTUP ZAROVNÁNÍ STRUKTURY

Měřený vzorek (gyroskop) je vložen do elektroniky a upevněn na povrch goniometrických plošin. Poté je pomocí software Polytec TMS změřena topografie povrchu části (setrvačná hmota) zkoumaného vzorku, kterou je potřeba zarovnat. Topografické měření povrchu je založeno na principu interference bílého světla Mirau interferometrem, jež je součástí optiky (**Obrázek 2 a**). Ze software Polytec TMS je poté vyexportována matice hodnot (bodů), které udávají relativní výšku s přesností ± 10 nm. Změřená matice bodů je načtena navrženou aplikací, která z hodnot opět sestaví topografickou mapu povrchu. Z těchto hodnot je pomocí průměrování získán průmět povrchu v osách X a Y. Tyto průměty jsou poté automaticky proloženy lineární závislostí a ze směrnice přímky je získán úhel náklonu zkoumaného vzorku v jednotlivých osách. Takto získaný úhel je použit pro vyrovnání (korekci) sklonu povrchu a tím zajištění ideální ortogonality vůči optice MSA-500. Chyba způsobená náklonem u tímto způsobem vyrovnané struktury je zanedbatelná a tuto strukturu je možné podrobit testování pomocí LDV. Přesnost topografického

měření umožňuje vyrovnat strukturu s přesností v jednotkách úhlových minut. Náklon struktury před vyrovnáním může být i v jednotkách stupňů, kvůli nepřesnostem při lepení struktury do pouzdra, umístění pouzdra do patice či samotné montáži zařízení do vakuové komory, která je nezbytná pro dosažení minimálního tlumení při pohybu struktury.



Obrázek 3: Vyrovnání struktury pomocí topografie: ukázka po vyrovnání

Před začátkem vyrovnání je doporučeno omezit zkoumanou oblast struktury (setrvačná hmota), protože velké změny výšky v oblastech pružin a nosníků mohou zhoršit přesnost vyrovnání. Před vyrovnáním byl sklon plochy v oblasti setrvačné hmoty cca $0,2^\circ$ v ose X a $0,4^\circ$ v ose Y. Po vyrovnání je v konečné iteraci (**Obrázek 3**), kdy byl cyklus měření a vyrovnání opakován, náklon roviny setrvačné hmoty asi $0,001^\circ$ v ose X a $0,02^\circ$ v ose Y. Zde se již dosáhne maximálního rozlišení topografie, kde dochází k jevu zvlnění naměřených dat vlivem vibrací a perforace struktury gyroskopu a také se projevuje vliv kmitání mechanického upevnění optické hlavy ve směru Y, viditelné na **Obrázek 2**.

3. ZÁVĚR

Byl navrhnout, vytvořen a ověřen měřicí systém a řídicí aplikace v prostředí LabVIEW, která je schopná plně řídit dvojici goniometrických plošin umístěných ve vakuové komoře. Vytvořený měřicí řetězec je schopen nastavit povrch zkoumané struktury do pozice kolmé vůči optice analyzátoru Polytec MSA-500 s přesností v rozmezí $\pm 1.5'$ za pomoci topografického měření. Na **Obrázek 3** je ukázka aplikace pro zpracování naměřených dat ze systému Polytec TMS, kde je možné jednoduchým způsobem provést korekci sklonu zkoumaného povrchu. Aplikace je rovněž schopna akceptovat změny v instalaci (orientaci) goniometrických plošin vůči měřicí jednotce MSA-500. Aplikace obsahuje další možnosti řízení goniometrických plošin pomocí úhlových souřadnic a dále algoritmy pro řízení Peltierových článků pro stabilizaci teploty měřeného zařízení.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl za podpory společnosti Honeywell International s.r.o. divize Aerospace Advanced Technology Europe, za podpory grantu Technologické agentury České republiky číslo TE02000202 - "Pokročilé senzory a metody zpracování sensorových dat" a také grantu číslo FEKT-S-14-2429 - "Výzkum nových řídicích metod, měřících postupů a inteligentních prostředků v automatizaci" financovaného z Interní grantové agentury Vysokého učení technického v Brně.

REFERENCE

- [1] ALPER, Said Emre. MEMS gyroscopes for tactical-grade inertial measurement applications. 2005. PhD Thesis. MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY. Dostupné také z: <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12606483/index.pdf>