

## **Metodika a meranie pomocou MEMS akcelerometrov**

**2017**

**doc. Ing. Branislav Hučko, CSc.**

**Ing. Michal Čekan, PhD.**

**Ing. František Horvát, PhD.**

**Ing. Ondrej Chlebo, PhD.**

## Teória

Akcelerometer sa používa priamo na meranie zrýchlení. Ak poznáme hmotnosť napr. segmentu a zrýchlenie jeho ťažiska, potom vieme priamo vypočítať silu pôsobiacu v ťažisku v smere zrýchlenia použitím druhého Newtonovho zákona

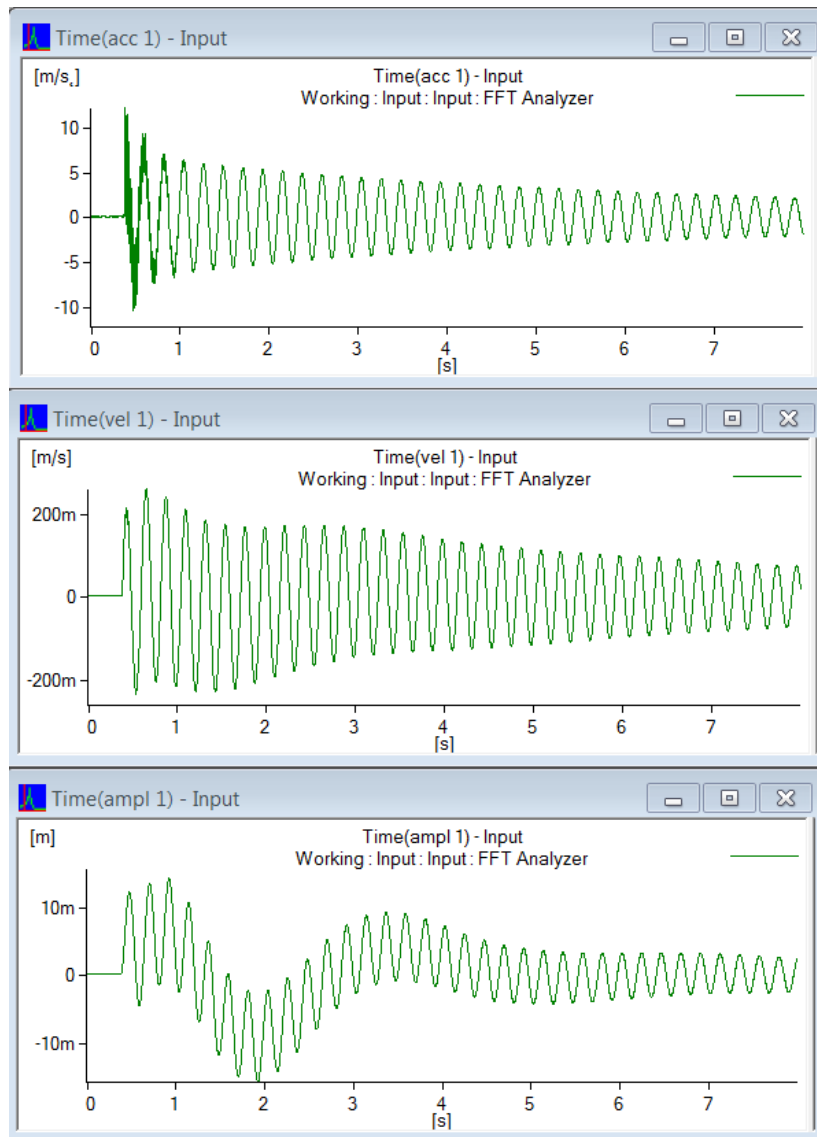
$$F = ma \tag{1}$$

Vzťah medzi ostatnými kinematickými veličinami – rýchlosť a posunutie, je daná nasledujúcimi vzťahmi

$$v = \int a dt \tag{2}$$

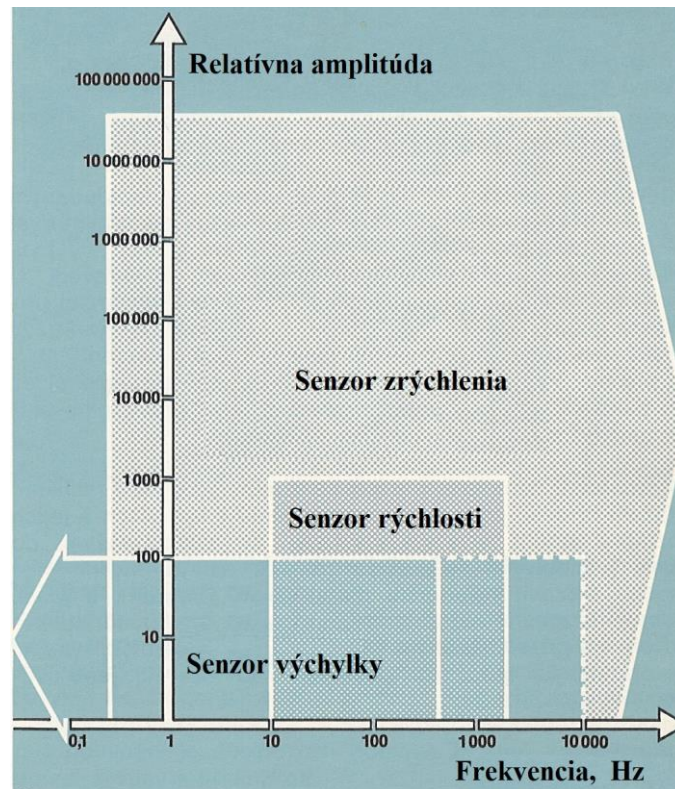
$$x = \int v dt \tag{3}$$

Vplyv zašumenia signálu a integračné chyby – vplyv integračnej konštanty, môžu spôsobiť značné nepresnosti pri výpočte posunutia využívajúc vzťahy (2) a (3). Na odstránenie tohto nedostatku sa používajú Kalmanové filtre [1]. Príklad integrácie zrýchlenia kmitajúceho nosníka je na Obr. 1.



Obr.1. Integrácia časového záznamu zrýchlenia kmitania nosníka po uvoľnení z predpätej polohy, hore – zrýchlenie, v strede -rýchlosť a dole výchylka

Pri voľbe senzora zohľadňujeme viacero parametrov ako napríklad rýchlosť pohybu, frekvencia pohybu, prostredie alebo možnosti pripevnenia senzora. Napríklad ak použijeme akcelerometer kvôli vysokému meraciemu rozsahu a citlivosti, a budeme pritom potrebovať dráhu, nastane problém pri dvojnásobnej integrácii časového záznamu nakoľko nepoznáme integračnú konštantu. To sa prejaví deformáciou časového záznamu tak ako je znázornené na príklade kmitania nosníka uvedenom na Obr.1. Pre voľbu vhodného senzoru môžeme vychádzať aj s diagramu uvedenom na Obr.2.

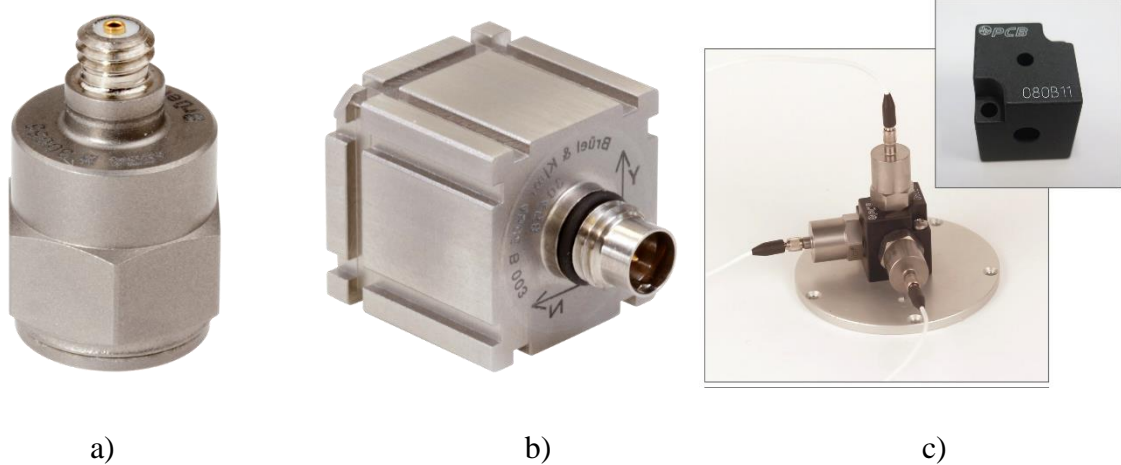


Obr. 2. – Porovnanie meracích rozsahov štandardných typov senzorov [2]

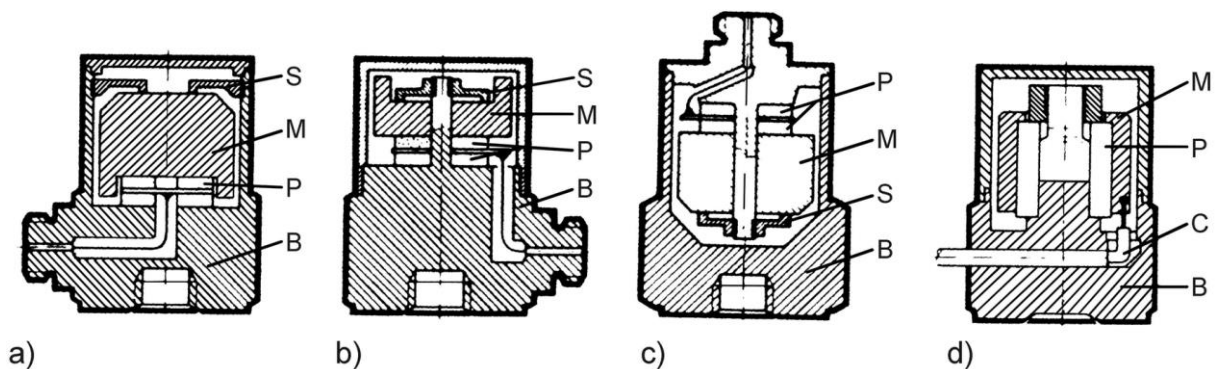
V praxi sa používajú mikromechanické senzory na báze MEMS a piezoelektrické akcelerometre. Citlivejšie z väčším meracím rozsahom sú senzory založené na piezoelektrickom prvku. Tie sa používajú aj ako národné etalóny. Piezoelektrické akcelerometre sú ale výrazne drahšie na výrobu ako senzory na báze MEMS, ktoré svoj menší merací rozsah kompenzujú možnosťou jednoduchšej kombinácie s inými typmi senzorov ako napríklad gyroskopy alebo magnetickými senzormi v jednom puzdre alebo jednej základni.

**Piezoelektrické akcelerometre** sú charakteristické linearitou v širokom frekvenčnom pásme (0,2 Hz až 100 kHz z odchýlkou od lineárnej charakteristiky menšou ako 5 %) a širokým pracovným dynamickým rozsahom (160 dB) [33]. Konštrukcia piezoelektrických akcelerometrov pozostáva zo základne na ktorej je cez piezoelektrický kryštál pripevnená seizmická hmotnosť. Tá svojou zotrvačnosťou pri pohybe základne senzora zdeformuje kryštál ktorý vygeneruje na elektródach napätie ktoré zaznamenáme a po prepočte pomocou známej citlivosti senzora získame hodnotu zrýchlenia. Je viacero základných konštrukcií piezoelektrických akcelerometrov. Rozdeliť sa dajú podľa počtu osí citlivosti a konštrukcie Obr. 3. Najviac používané akcelerometre sú jednoosové ktoré majú niekoľko základných vyhotovení Obr. 4. Tieto akcelerometre sa najčastejšie používajú na diagnostiku a hodnotenie

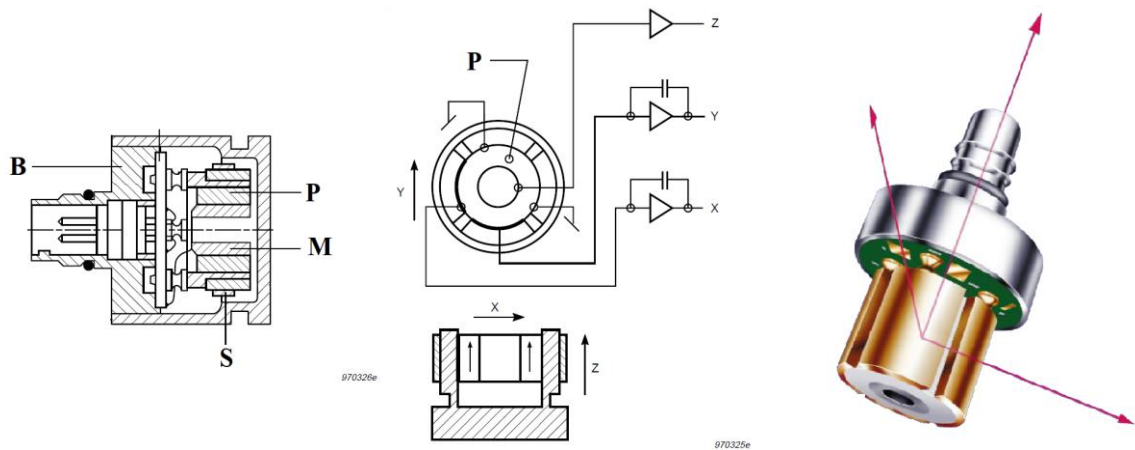
strojov a ich vplyvu na človeka. Pre potreby merania v biomechanike je ale vhodnejšie merať zrýchlenie v troch osiach. Vhodnou konštrukciou je možné tieto akcelerometre pospájať a urobiť jeden senzor ktorý meria v troch osiach Obr. 3 c. Výhoda takejto koncepcie spočíva v možnosti použiť senzory s rovnakou citlivosťou pre všetky osi, prípadne zostaviť senzor tak aby spĺňal nároky kladené naň. Prípadne je možné použiť jeden trojosový senzor, ale ten je konštrukčne náročnejší, a z toho vyplýva aj rozdielna citlivosť pre jednotlivé osi Obr. 5. Jednotlivé komponenty senzora v Obr. 4 a Obr. 5 sú označené nasledovne S – pružina, M – seizmická hmotnosť, P- piezoelektrický kryštál, B – základ, C – vodič.



Obr. 3. – a) jednoosový akcelerometer, b) trojosový akcelerometer, c) trojosová konfigurácia jednoosových akcelerometrov.

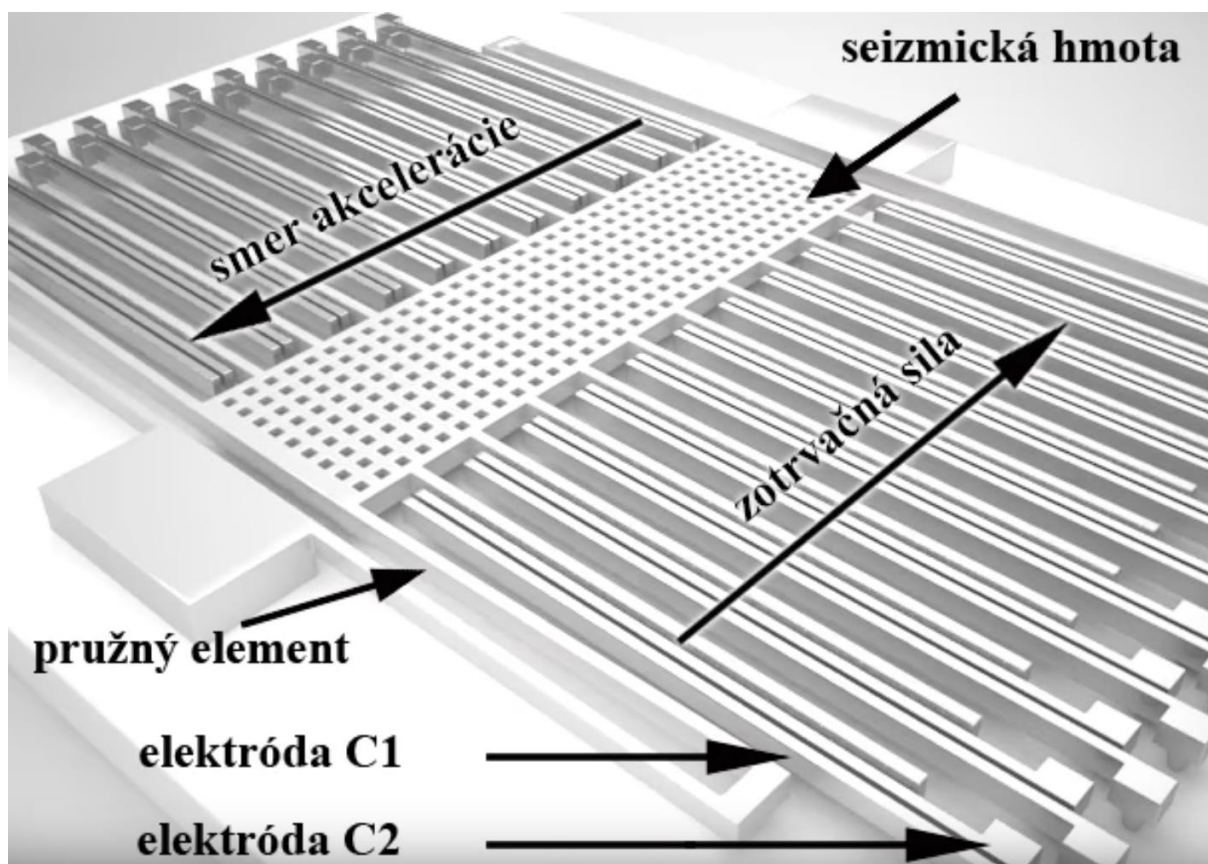


Obr. 4. – Schematický rez konštrukcie štyroch bežných akcelerometrov, a) obvodovo stláčaná konštrukcia, b) centricky stláčaná konštrukcia, c) inverzne centricky stláčaná konštrukcia, d) šmyková konštrukcia

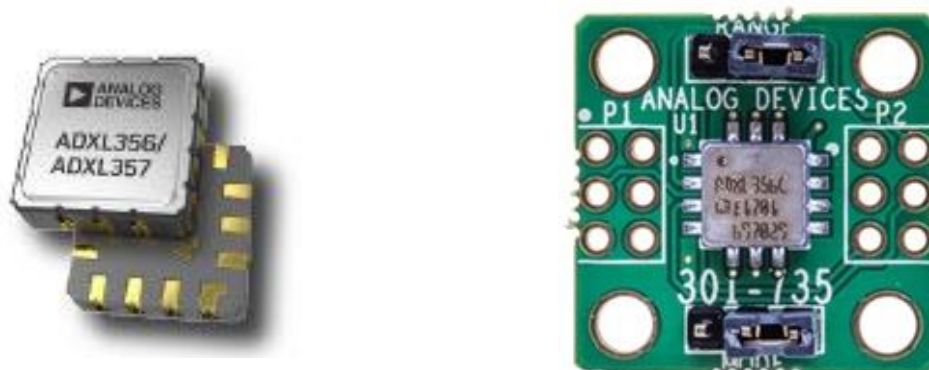


Obr. 5. – Rez konštrukcie trojosového akcelerometra

**Mikromechanické akcelerometre na báze MEMS** majú síce menší merací rozsah ako piezoelektrické akcelerometre ale sú menšie a na sériovú výrobu výrazne jednoduchšie a lacnejšie. S týmto typom senzorov sa môžeme najčastejšie stretnúť v inteligentných telefónoch ale aj iných elektronických zariadeniach, kde je potrebné merať vektor pohybu, ako napríklad v kamerách a fotoaparátoch pri stabilizácii obrazu. Princíp funkcie je podobný ako v prípade piezoelektrických akcelerometrov len v prípade mikromechanických akcelerometrov sa negeneruje elektrický náboj, ale mení sa kapacita senzora. Princíp činnosti mikromechanického senzora je názorne vykreslený na Obr. 6. Seizmická pružne uložená hmotou sa vplyvom pohybu priblíži k elektródam C1, C2 čím sa zmení rozstup medzi seizmickou hmotou a elektródami čoho výsledkom je zmena kapacity, ktorú je možné merať. Nakoľko na výrobu mikromechanických senzorov sa používa výrobný postup, ako pri výrobe počítačových procesorov, tak veľkosť aj tvar týchto senzorov je podobná. Mikromechanické senzory sa umiestňujú na dosku tlačených spojov Obr. 7. Výhodou takéhoto riešenia je možnosť kombinovať viac senzorov na báze MEMS rôzneho typu na jednu dosku. Dvoj a troj osové mikromechanické akcelerometre sa vyrábajú zmenou konštrukcie jednoosového senzora. Tieto senzory sa nekombinujú tak ako je to v prípade piezoelektrických akcelerometrov Obr. 3 c.



Obr. 6. – princíp funkcie jednoosového mikromechanického akcelerometra



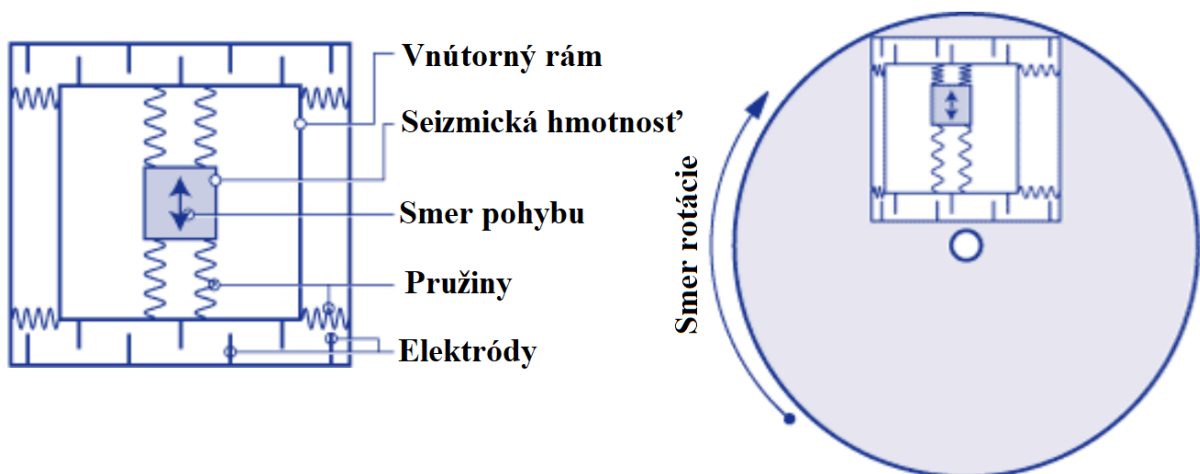
Obr. 7. – trojosový mikromechanický akcelerometer – v ľavo, akcelerometer osadený na doske s elektronikou – v pravo

**Mikromechanické gyroskopy na báze MEMS** , pozri Obr. 8, sa používajú na meranie uhlovej rýchlosti z využitím princípu Coriolisovej sily. Gyroskopy sú konštrukčne veľmi podobné mikromechanickým akcelerometrom , s tým rozdielom že v prípade akcelerometrov

je pohyblivá štruktúra voľná a jej pohyb je závislý od zotrvačného účinku seizmickej hmotnosti, tak pri gyroskopoch je seizmická hmotnosť zámerné periodicky budená [4]. Funkcia gyroskopu Obr. 9 je založená na periodicky sa pohybujúcej seizmickej hmotnosti upevnenej pomocou pružín na vnútornom ráme. Smer pohybu musí však byť vždy kolmý na smer otáčania, aby na gyroskopický senzor začala pôsobiť Coriolisova sila, ktorej veľkosť je úmerná uhlovej rýchlosti. To spôsobí posun vnútorného rámu a zmenu vzdialenosti medzi elektródami. Tým sa zmení kapacita senzora ktorú je možné merať.



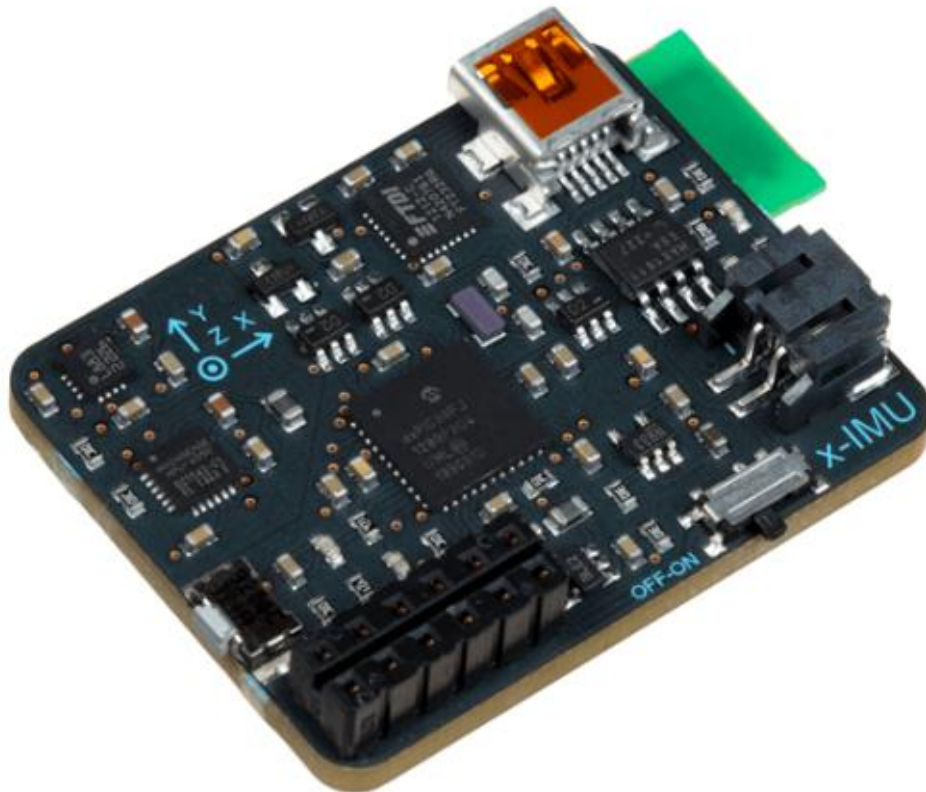
Obr. 5.8. – jednoosový gyroskop s elektronikou [5.5]



Obr. 5.9. – princíp funkcie mikromechanického gyroskopu

## Meranie kinematických veličín ťažiská plavca

Na meranie zrýchlenia ťažiska plavca sme použili trojosový akcelerometer spojený s gyroskopom X-IMU, Obr.10.



Obr. 5.10. x-IMU

Zariadenie x-IMU, ktorého výrobcom je spoločnosť x-io Technologies so sídlom vo Veľkej Británii, bol navrhnutý ako všestranná inerciálna meracia jednotka obsahujúca referenčný systém pre orientáciu polohy.

x-IMU umožňuje dva spôsoby prenosu údajov v reálnom čase. Prvý spôsob je prostredníctvom USB portu, pričom druhý spôsob predstavuje bezdrôtový prenos údajov postavený na technológii Bluetooth – Class 1. Z pohľadu všestrannosti zariadenie ďalej obsahuje okrem vlastných hodín reálneho času tiež funkciu kalendáru, wake-up funkciu podmienenú zrýchlením zariadenia v ktoromkoľvek smere a funkciou sleep pri spotrebe 130  $\mu\text{A}$ . Nabíjanie napájacej 3.3 V batérie je zabezpečené prostredníctvom USB portu a zariadenie podporuje tiež funkciu data loggeru prostredníctvom microSD karty s podporou FAT16/32. V zariadení je integrovaných päť senzorov, popis je uvedený v tab. 1, ktoré sú kalibrované priamo

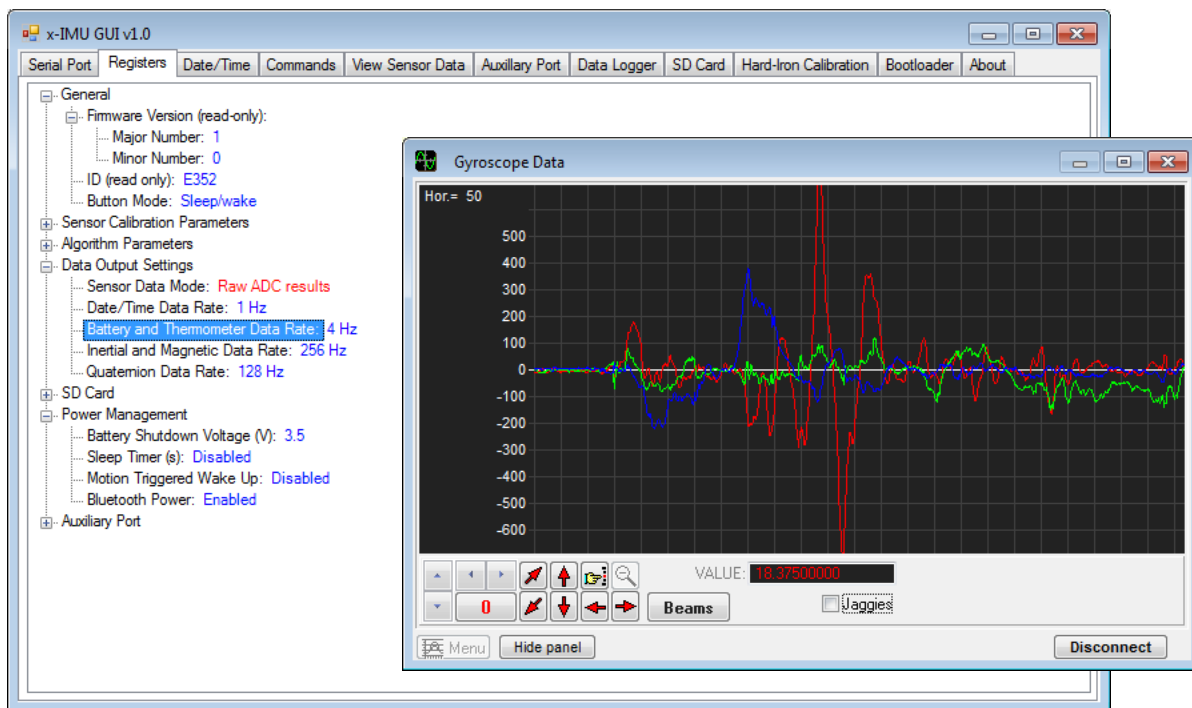
pri výrobe zariadenia a samotný senzor natočenia obsahuje kompenzáciu na teplotu. Rýchlosť vzorkovania so senzorov je voliteľná do 512 Hz. Hmotnosť zariadenia je 12 g pri rozmeroch 33 x 42 x 10 mm (dĺžka x šírka x výška).

Tab. 5.1 Výpis snímačov x-IMU

Typ senzora	Rozsah
<b>gyroskop</b>	16-bit nastaviteľný do +/- 2000°/s
<b>akcelerometer</b>	12-bit nastaviteľný do +/- 8g
<b>magnetometer</b>	12-bit nastaviteľný do +/- 8.1G
<b>teplomer</b>	16-bit s rozsahom -30°C až 85°C
<b>snímač napätia batérie</b>	12-bit s rozsahom 0 V až 6.6 V

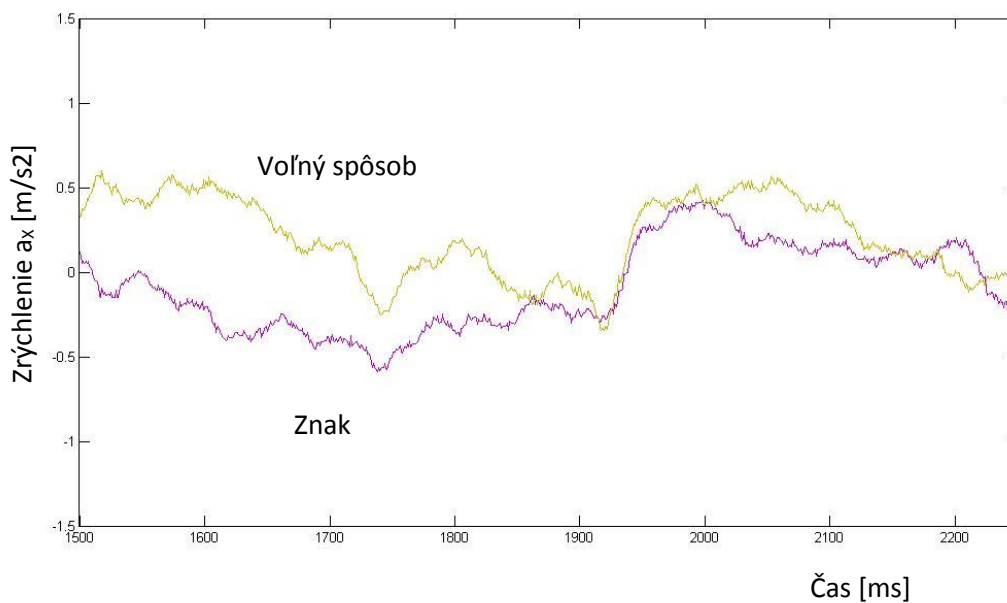
Základné prostredie pre prácu so zariadením a jeho nastaveniami je postavené na API rozhraní ako open source softvér umožňujúci, zobrazenie, úpravu a zálohovanie všetkých interných nastavení. Podporuje vykresľovanie údajov zo senzorov v 2D a 3D prostredí, pričom umožňuje priamy export dát do programu MATLAB a Microsoft Excel. Zaujímavosťou je že obsahuje tzv. firmware bootloader pre prístup k novým funkciám v rámci aktualizácií zariadenia. Na obr. 2 je znázornený softvér zariadenia x-IMU s dôrazom na časť „Registers“ v rámci ktorých sa vykonáva nastavenie jednotlivých senzorov pred samotným meraním.

Ovládanie zariadenia x-IMU nie je limitované iba na výrobcom dodávaný softvér. V rámci podpory tohto zariadenia sú na stránke výrobcu dostupné knižnice API funkcií pre program MATLAB a tiež C++.



Obr. 5.11. Prostredie softvéru x-IMU

Pomocou x-IMU sme merali zrýchlenia ťažiska plavca pri rôznych plaveckých štýloch: voľný spôsob, znak, motýlik a prsia [7]. Ako príklad uvádzame zrýchlenie v smere osi x ťažiska pri plávaní voľným spôsobom a znakom po odfiltrovaní šumu sú na nasledujúcom Obr. 5.12.



Obr. 5.12. Porovnanie zrýchlenia ťažiska v smere osi x pre voľný spôsob a znak

## Literatúra

- [1] Starek, L. – Chmelko, V.: Experimentálne metódy v mechanike, STU v Bratislave, 2007.
- [2] Sledování provozního stavu strojních zařízení, Bruel&Kjaer 1991
- [3] Žiaran, S.: Technická diagnostika, Nakladateľstvo STU Bratislava 2013
- [4] <https://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>
- [5] <http://www.analog.com/en/products/sensors-mems/gyroscopes/adxrs450.html>
- [6] <http://www.analog.com/en/technical-articles/mems-gyroscope-provides-precision-inertial-sensing.html>
- [7] Čekan, M. -- Šoltés, L. -- Horvát, F. -- Hučko, B. -- Meleg, T. -- Zemková, E.: Kinematic analysis of a swimmers center of mass when swimming. In CEPKOVÁ, A. Od výskumu k praxi [elektronický zdroj]: 17. ročník medzinárodnej vedeckej konferencie. Bratislava, 29.-30.11. 2012. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2012, s. 280--284. ISBN 978-80-227-3828-6.