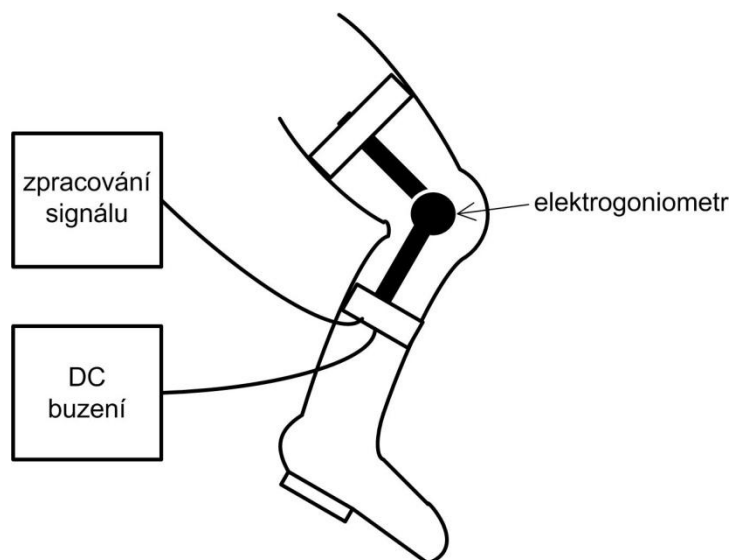


12 Senzory mechanických veličin

Senzory mechanických veličin se používají v několika oblastech medicíny, například jako součást rehabilitační techniky nebo jako akcelerometry pro měření vibrací, statického nebo dynamického zrychlení, měření odstředivých a setrvačných sil nebo pro určování pozice tělesa – například pacienta, kde se pomocí akcelerometru sleduje jeho poloha – zda leží či sedí nebo se prochází po místnosti (sledování osob, zda nespadly a nezranily se).

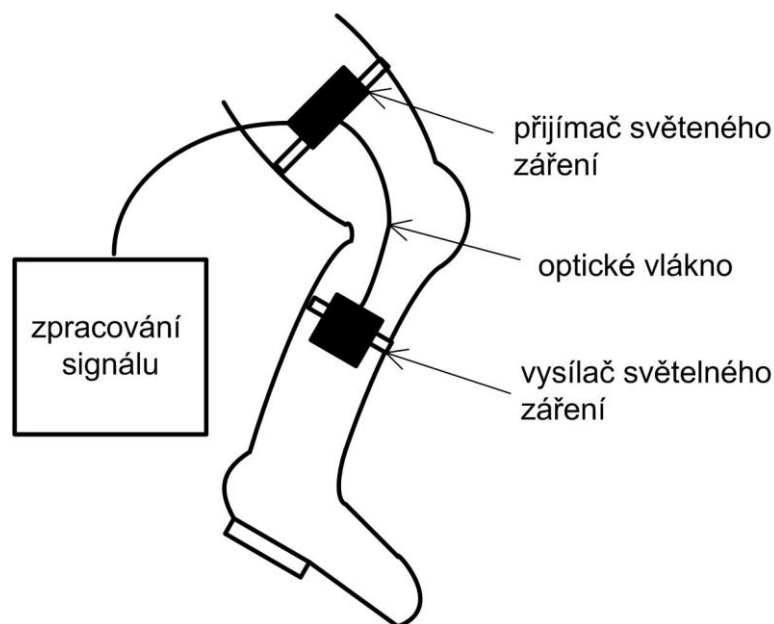
12.1 Senzory kloubních úhlů

Tyto senzory patří do skupiny zařízení rehabilitační techniky a používají se ke snímání kloubních úhlů při rehabilitačních a fyzioterapeutických cvičení pohybového aparátu. Většinou se jedná o aplikaci senzoru v oblastech horních a dolních končetin, tedy loketního kloubu nebo zápěstí horní končetiny a kolenního kloubu dolní končetiny. V praxi se používá několik konstrukčních provedení senzorů, z nichž dále budou popsány nejvíce používané typy senzorů založené na použití odporových potenciometrů a optických vláken.



Obr.12.1 Senzor s elektrogoniometrem.

Obrázek **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** zachycuje strukturu senzoru snímajícího úhel pokrčení dolní končetiny v kolenní. Základem tohoto typu senzoru je tzv. elektrogoniometr s odporovým potenciometrem, k jehož pevné i pohyblivé části jsou připojena raménka, pomocí kterých je senzor speciálním obvazem připevněn k dolní končetině. Vlivem pohybu dolní končetiny se mění poloha jezdecky kruhového potenciometru a tím se mění odpor elektrogoniometru. Změny odporu se potom zaznamenávají a podle potřeby dále zpracovávají.



Obr.12.2 Senzor s využitím optických vláken (výrobce ADInstruments).

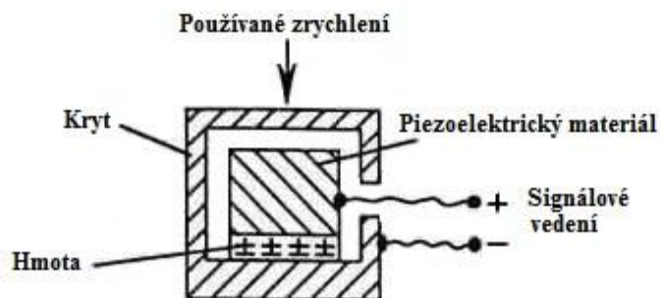
Chyba! Nenalezen zdroj odkazů. popisuje senzor kloubních úhlů využívající konstrukci s optickým vláknem. Mikroohyby tohoto optického vlákna způsobují změny útlumu světelného záření ve vlákne. Pokud je optické vlákno narovnané, útlum je nejmenší a intenzita světelného záření největší. Změny útlumu zaznamenává přijímač světelného záření. Přijímaný optický signál se převádí na elektrický napěťový signál, který se dále zpracovává a převádí na informaci o úhlu natočení kloubu dolní nebo horní končetiny.

12.2 Akcelerometry

Jak již bylo řečeno, akcelerometr je senzor měřící vibrace, zrychlení a pozice předmětu v prostoru. Ve většině případů se jedná o integrovaný obvod, který v sobě sdružuje společně s vlastním snímacím elementem také obvody dalšího zpracování signálu, které snímanou mechanickou veličinu (vibrace) převedou na elektrický signál, který se dále převede do diskrétní podoby a zpracovává podle požadavků dané aplikace.

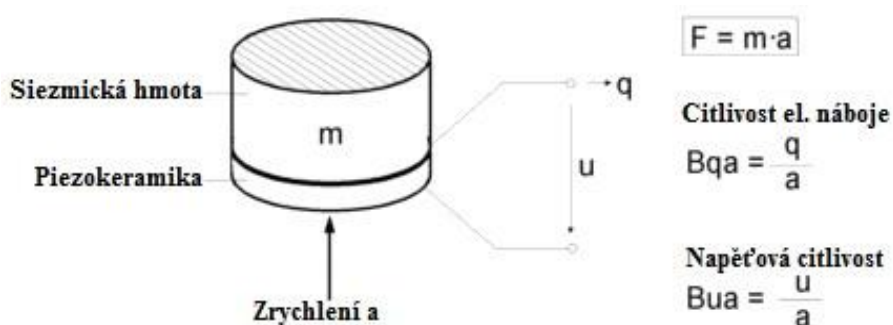
12.2.1 Piezoelektrické akcelerometry

Pro základní snímací element se zde využívá piezoelektrický materiál, který vlivem působení mechanické veličiny (např. vibrace) generuje elektrický náboj úměrný míře mechanického namáhání tohoto piezoelektrického materiálu. Měření náboje piezokrystalu probíhá buď přímo pomocí externích elektronických obvodů s vysokou vstupní impedancí, nebo častěji tyto obvody senzoru konvertují náboj na napěťový výstupní signál s nízkou impedancí. Následující obrázek Obr. 12.3 popisuje princip snímacího elementu piezoelektrického akcelerometru.



Obr.12.3 Struktura piezoelektrického akcelerometru.

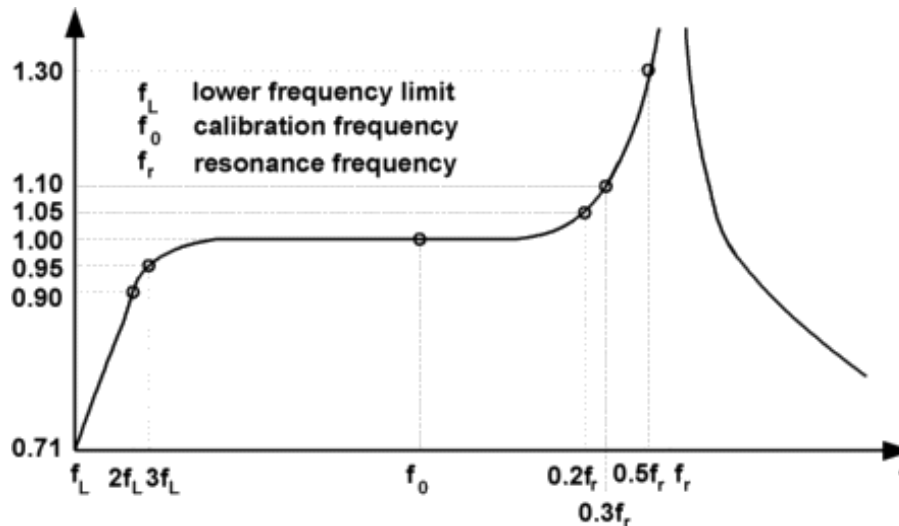
Jedna strana piezoelektrického materiálu (převodník zrychlení) je upevněna na tuhou podpěru základny senzoru. Část pojmenovaná jako seismická hmota je připevněna na piezosnímač (případně také k druhé straně pouzdra). Jestliže je akcelerometr vystaven zrychlení (vibracím, akceleraci, otřesům) pak generovaná síla F , která působí na piezoelektrický element, způsobí vygenerování elektrického náboje, čímž na výstupu senzoru vzniká na kontaktech potenciálový rozdíl. Podle Newtonova zákona je tato síla úměrná zdroji zrychlení a seismické hmotě. Piezoelektrický efekt tak generuje na výstupu náboj q úměrný působící síle. Protože seismická hmota má konstantní hmotnost, výstupní signál v podobě náboje je úměrný akceleraci senzoru. Pokud je akcelerometr pevně upevněn k testovanému objektu, měří i jeho zrychlení (zrychlení celé soustavy). Akcelerometr charakterizuje nábojová citlivost B_{qa} , resp. napěťová citlivost B_{ua} . Viz Obr. 12.4.



Obr.12.4 Matematické vztahy nábojové a napěťové citlivosti senzoru.

Každý akcelerometr je schopen měřit zrychlení v určitém frekvenčním rozsahu, který je daný konkrétní konstrukcí senzoru, protože citlivost je zvláště u některých provedení významně závislá právě na pracovní frekvenci. Z tohoto pohledu je piezoelektrický akcelerometr považován za mechanickou dolnofrekvenční propust s rezonanční špičkou. Seismická hmota

a piezokeramický materiál včetně dalších pružných komponent senzoru formují pružnou hmotu systému, který se tak chová jako pružina s vlastní rezonancí a ta definuje horní frekvenční limit akcelerometru. Aby bylo dosaženo širšího provozního frekvenčního rozsahu, měla by být rezonanční frekvence pružné hmoty co nejvyšší. Toho se obvykle dosahuje odbouráním obsahu seismické hmoty. Tento způsob ale zase snižuje citlivost senzoru, takže se při výrobě volí určitý kompromis. Například akcelerometr pro měření otřesů a nárazů potřebuje mít vyšší rezonanční frekvenci na úkor nižší citlivosti.



Obr.12.5 Typická frekvenční závislost piezoelektrického akcelerometru.

Na obrázku Obr. 12.5 je znázorněn průběh kmitočtové závislosti piezoelektrického akcelerometru. Kmitočet f_L (lower frequency limit) představuje počáteční kmitočet rozsahu, kmitočet f_r je rezonanční kmitočet a f_0 je tzv. kalibrační frekvence. Na frekvenční křivce lze pozorovat několik užitečných rozsahů. Na zhruba pětina rezonanční frekvence je odezva senzoru 1.05 což znamená, že měřicí chyba v porovnání s nižšími frekvencemi je 5%. Na zhruba 1/3 rozsahu je chyba 10 %. Z tohoto důvodu lze frekvenční rozsah považovat za lineární právě do 1/3 hodnoty rezonanční frekvence. 3dB limit s přibližně 30 % chybou obdržíme zhruba na 1/2 hodnoty rezonanční frekvence. Spodní frekvenční limit hlavně závisí na zvoleném předzesilovači a je podle toho nastaven.

Typy piezoelektrických akcelerometrů

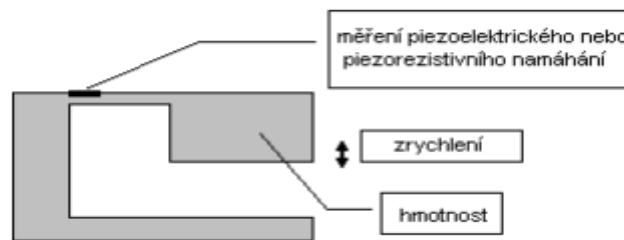
Akcelerometry, které se používají pro měření klasického zrychlení a vibrací využívají odlišných konstrukcí. Zejména se jedná o rozdílné uspořádání komponent piezoelektrického snímače a pouzdra. Využívá se následujících provedení:

- **Smykový mód (Shear mode)** – Využívá se pro senzory se zvýšenou odolností na vliv teploty a parazitní vibrace pouzdra.
- **Ohybový mód (Flexural mode)** – pro velmi citlivé senzory – tzv. seismické akcelerometry
- **Kompresní mód (Compression mode)** – jedná se o nejjednodušší provedení

12.2.2 Piezorezistivní akcelerometry

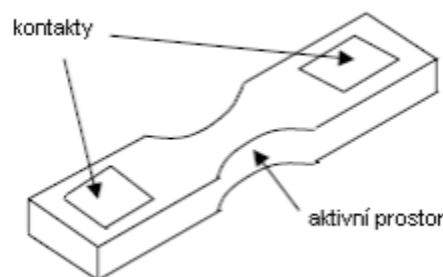
Piezorezistivní akcelerometr je senzor, který využívá piezorezistivní materiál místo piezoelektrického krystalu a jeho prostřednictvím převádí sílu vzniklou urychlovanou hmotou na změnu odporu. V integrovaných piezorezistivních akcelerometrech se využívá sítě vyleptaných měřicích piezorezistivních snímačů (můstků) zapojených ve Wheatstonově můstku. Piezorezistivní akcelerometry mají tu výhodu proti piezoelektrickým, že mohou měřit i stálou (neměnnou) akceleraci, tj. frekvenci změn od 0 Hz.

Hlavním principem piezorezistivního akcelerometru je, že seismická hmotnost je závislá na pružném návratu plochy. Tato plocha je vybavena dvěma až třemi piezorezistivními měniči. Ohyb plochy je převáděn na měření deformace. Míra deformace je konvertována na elektrickou hodnotu a získaný elektrický signál je úměrný zrychlení pohybujícího se objektu.



Obr.12.6 Princip piezorezistivního akcelerometru

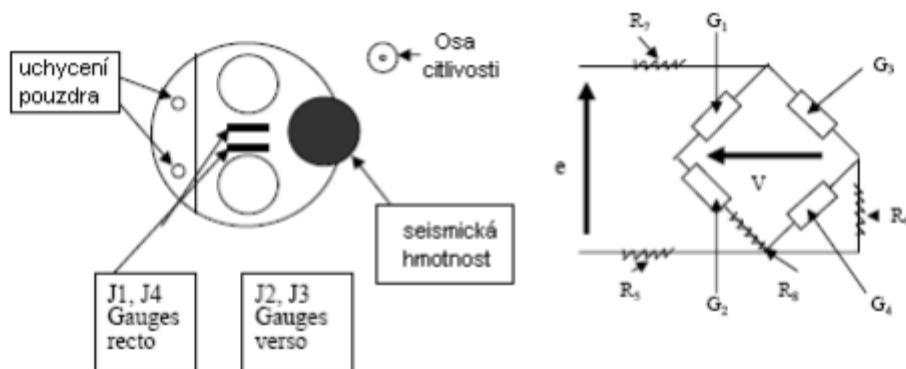
Mechanické namáhání, ke kterému při piezorezistivní metodě vzniká, může být měřeno např. pomocí křemíkovým polovodičovým snímačem.



Obr.12.7 Ukázka plochy měřidla piezorezistivního akcelerometru

Snímač je konstrukčně tvořen dvěma širšími ploškami, které jsou spojeny úzkým středovým prvkem. Tyto snímače jsou tvořeny jednoduchým křemíkovým krystalem, který disponuje vysokým stupněm čistoty.

Výhodou tohoto typu akcelerometru je vysoká citlivost, nízká cena a poměrně vysoká šířka frekvenčního pásma. Tyto senzory jsou miniaturní a umožňují jednoduché zpracování naměřených dat.



Obr.12.8 Příklad měřícího systému pro piezorezistivní akcelerometr

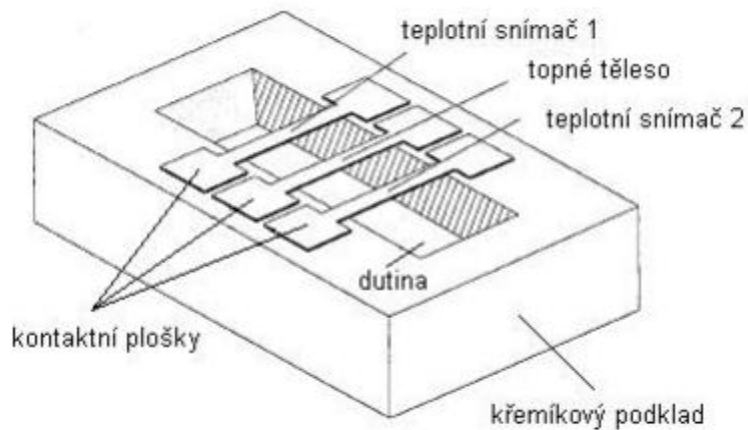
Nevýhodou tohoto akcelerometru je značná nelinearita. Tento akcelerometr se vyznačuje velkou citlivostí na změnu teploty. Je vyžadováno velmi stabilního zdroje napájení. Akcelerometr je citlivý na zvýšení šířky pásma, kdy dochází k poklesu citlivosti.

12.2.3 Tepelné akcelerometry

Tepelné akcelerometry využívají fyzikální princip, který se v podobné verzi používá u kalorimetrických průtokoměrů. Jde o přenos tepla v plynu a snímání rozložení teploty v okolí zdroje tepla. Topné tělísko zahřívá okolní vzduch ve vzduchové komoře senzoru na konstantní teplotu. Rozložení teploty v závislosti na vzdálenosti od topného tělíska je měřené teplotními snímači (termistory). Ty jsou realizovány soustavou termočlánků hliník/polykrystalický křemík umístěné v pravidelných rozestupech. Celá tato soustava je implementována ve vyleptaném korytě křemíkového substrátu. Celý senzor, včetně vyhodnocovací elektroniky, je plně integrován na jednom čipu senzoru v jednom pouzdře.

Pokud se s akcelerometrem začne pohybovat, tj. vznikne zrychlení v osách X nebo Y, dochází vlivem setrvačnosti vzduchu k jeho posuvu vůči pohybující se vzduchové komoře. To znamená, že dochází k posuvu shluku zahřátého vzduchu proti směru pohybu senzoru. Vlivem tohoto jevu se krátkodobě změní rozložení teploty měřené teplotními snímači a vzniká tak teplotní rozdíl proti klidovému stavu. Z prostorového poklesu či nárůstu teploty lze zjistit směr pohybu a z teplotního rozdílu rychlost pohybu nebo velikost zrychlení. Z principu měření teploty plyne, že lze měřit pohyb (rychlost, zrychlení, náklon) jen ve dvou osách X a Y, protože rozložení teploty se měří jen plošně.

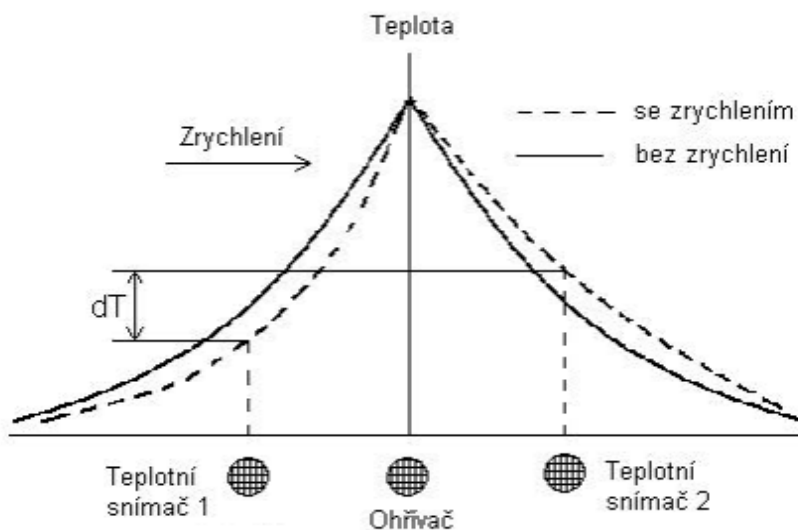
Z výše uvedeného fyzikálního principu je zřejmé, že základní citlivost a rychlost odezvy tepelného akcelerometru je zhruba stejná a nezávisí tedy na typu senzoru a jeho výrobci. Hodnoty se mohou lišit pouze citlivostí teplotního snímače a provedením vyhodnocovacích elektronických obvodů. Nevýhodou tepelného akcelerometru je velký vliv změny okolní teploty na citlivost. Mají však výbornou stabilitu a prakticky není možné senzor zničit přetížením, tj. vystavením příliš velké hodnotě zrychlení.



Obr.12.9 Uspořádání tepelného akcelerometru

Topné tělísko vytváří symetrický tvar teploty, což má za následek na výstupu žádný signál. Při působení zrychlení je tato symetrie narušena. Dojde ke změně teploty dT . Tato teplotní diference je měřena dvěma teplotními snímači. Na výstupu je formován signál, který odpovídá velikosti náklonu.

Rozměry křemíkového podkladu bývají standartně 3 až 5 mm. Dutina je tvořena specifickým plynem. Topné tělísko včetně snímačů jsou uloženy ve vnitřku dutiny. Hloubka této dutiny je přibližně 480 μm . Tyto akcelerometry bývají uloženy v mosazném pouzdře.



Obr.12.10 Symetrický profil teploty topného tělesa, který je narušen zrychlením

Pro experimentální měření s tepelným akcelerometrem je možné využít vztah:

$$T = \frac{R(T) - T_0}{\alpha R_0} \quad (12.1)$$

T – je zjištěná průměrná teplota ($^{\circ}\text{C}$)

$R(T)$ – je elektrický odpor (Ω)

R_0 – je elektrický odpor při teplotě 0°C

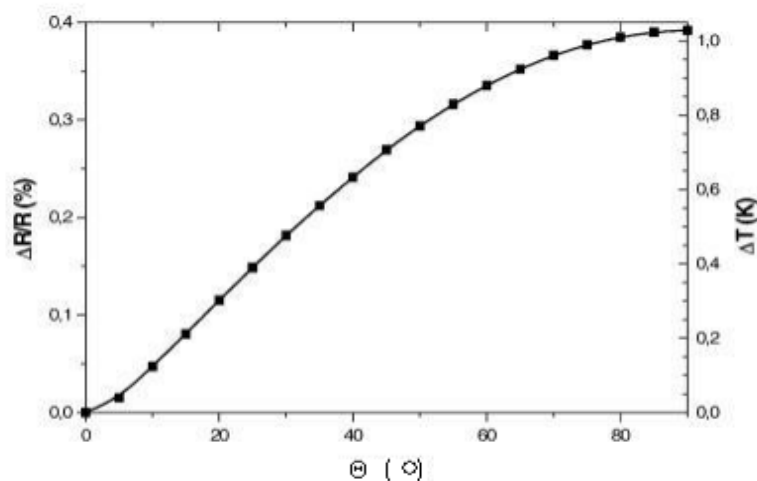
α – je teplotní součinitel odporu ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Vztah pro topný resistor je odvozen z Ohmova zákona:

$$R(T) = \frac{U}{I} \quad (12.2)$$

Při měření úhlu naklonění je provedeno připevněním snímače na vertikální úhломěr. Osa rotace je rovnoběžná s osou rezistoru. Poloha snímače je dána úhlem, který reprezentuje odchylku mezi normálovým vektorem povrchu čipu a vektorem gravitačního zrychlení.

V této konfiguraci je měřené zrychlení úměrné sinu úhlu náklonu. Tento snímač se vyznačuje linearitou pro nižší zrychlení. Při měření vysokých zrychlení je odezva snímače nelineární. U snímačů bez seismické hmoty je poměrně dobrá linearita v rozsahu $0 - 3g$. U tepelných akcelerometrů se seismickou hmotou je lineární odezva jen v úzkém rozsahu $0 - 0,4g$. V případě sinusoidálního zrychlení je šířka pásma snímače přibližně 20Hz . V případě, že potřebujeme zvýšit šířku pásma, je toho možné dosáhnout buď redukcí objemu dutiny, nebo použitím jiného plynu. Vlastnosti plynu a objem pouzdra jsou důležitými parametry, které udávají časovou odezvu snímače.



$\Delta R/R$ – poměr změny odporu způsobené zrychlením vůči odporu při zrychlení $0g$

Obr.12.11 Nelineární změna odporu na úhlu náklonu

Tvar teplotní charakteristiky tepelného akcelerometru vykazuje strmé klesání se zvyšující se vzdáleností mezi topným tělesem a snímačem teploty. Maximální citlivosti je dosaženo, pokud je vzdálenost mezi teplotním tělesem a snímačem v rozmezí $300\mu\text{m} - 500\mu\text{m}$. Citlivost snímače je úměrná síle ohřevu a snižuje se při stoupající okolní teplotě.

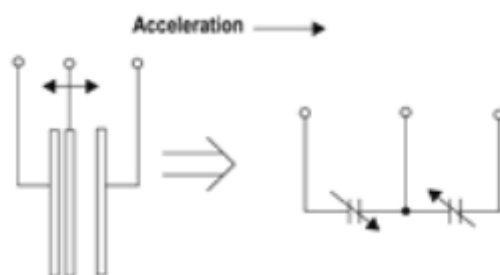
Mikročipové akcelerometry

Příkladem takového typu akcelerometru je MMA 7260Q s integrovaným zpracováním signálu, filtrem typu dolní propust, teplotní kompenzací a volbou měřicího rozsahu firmy Freescale.

Toto miniaturní zařízení je povrchově integrované mikrozařízení, které je tvořeno dvěma komponenty:

- senzor – povrchově integrovaná kapacitní měřicí buňka (g - cells)
- ASIC – integrovaných obvodů pro zpracování signálu ze senzoru

Kompletně celá struktura akcelerometru je umístěná na jednom monolitickém integrovaném obvodu. Princip tohoto akcelerometru je založen na změně kapacity vnitřního integrovaného kondenzátoru vlivem působící síly vzniklé zrychlením pouzdra senzoru. Obvod obsahuje polykřemíkový mikromechanický senzor a integrované obvody pro zpracování signálu ze senzoru. Tento senzor disponuje také měřením kladných i záporných dynamických zrychlení.



Obr.12.12 Princip senzoru akcelerometru

Samotný senzor je v podstatě mikromechanická polykřemíková struktura na povrchu křemíkového monokrystalu. Ohyb mechanické struktury je umožněn křemíkovými pružinami. Prohnutí a deformace takové struktury je převedena na změnu kapacity diferenciálního kondenzátoru. Tento kondenzátor je složen ze dvou pevných desek a desky, která je pevně spojena s deformujícím se nosníkem.

MMA7260Q je relativně levný senzor zrychlení s možností změny rozsahu v pevných krocích: $\pm 1,5g$, $2g$, $4g$, $6g$. Lze použít libovolného mikrokontroléru. Softwarově lze nastavit vnitřní zisk senzoru a tímto způsobem měnit měřicí rozsah a citlivost. Součástí senzoru je vyhodnocovací logika, která provádí převod působícího zrychlení na výstupní napěťový signál.

Technické specifikace MMA 7260Q

Napájení: $3,3V$, cca $500\mu A$, sleep mód: $3\mu A$

Rozsah měřeného zrychlení: $\pm 1,5g$, $2g$, $4g$, $6g$

Výstupní signál:

napěťový signál: $1,65V$ při $0g$

citlivost: $200 - 800\text{ mV}$

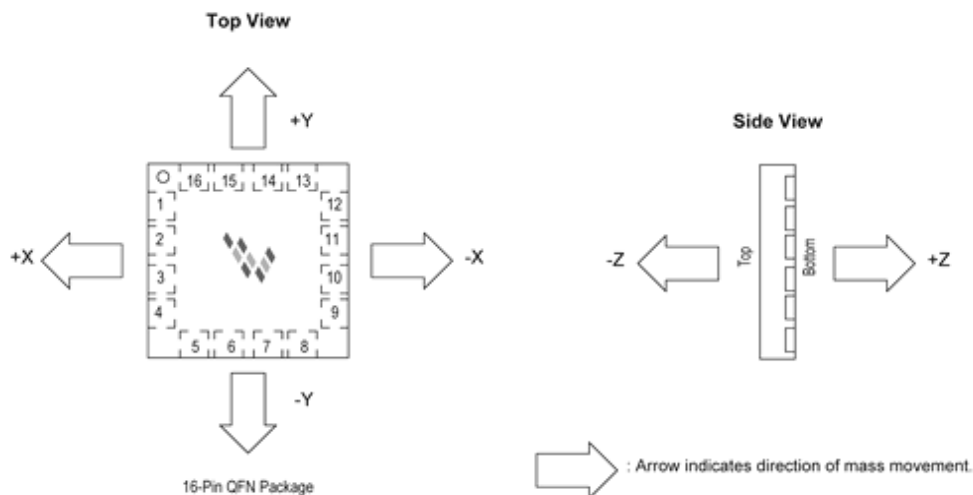
Maximální měřitelné zrychlení bez poškození senzoru: $\pm 2000g$

Frekvenční šířka pásma měření zrychlení: v rovině XY 350Hz

Teplotní rozsah: -20°C - $+85^{\circ}\text{C}$

Nelinearita: max: $\pm 1\%$ celého rozsahu

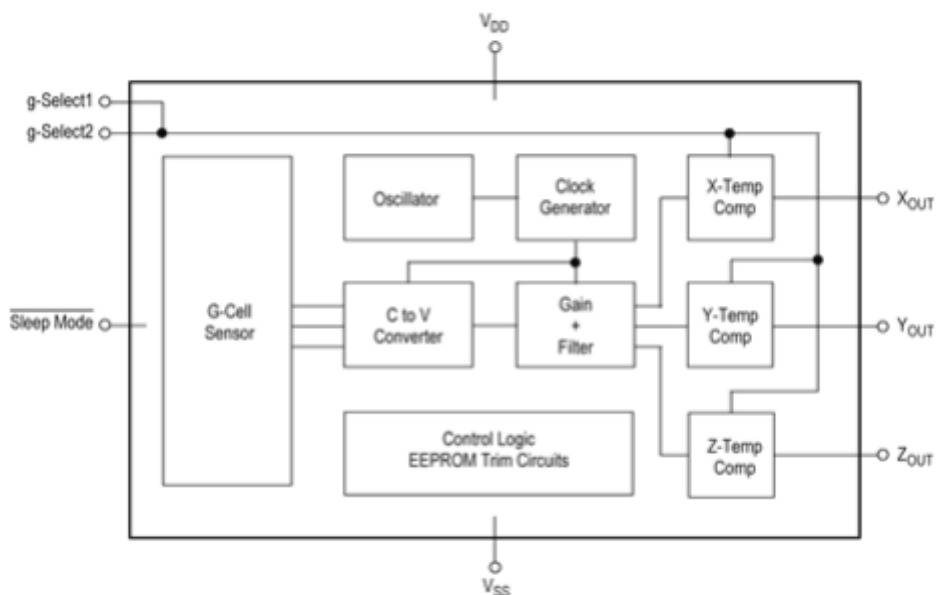
Pouzdro: 16 pin QFN, rozměry 6x6x1,45 mm.



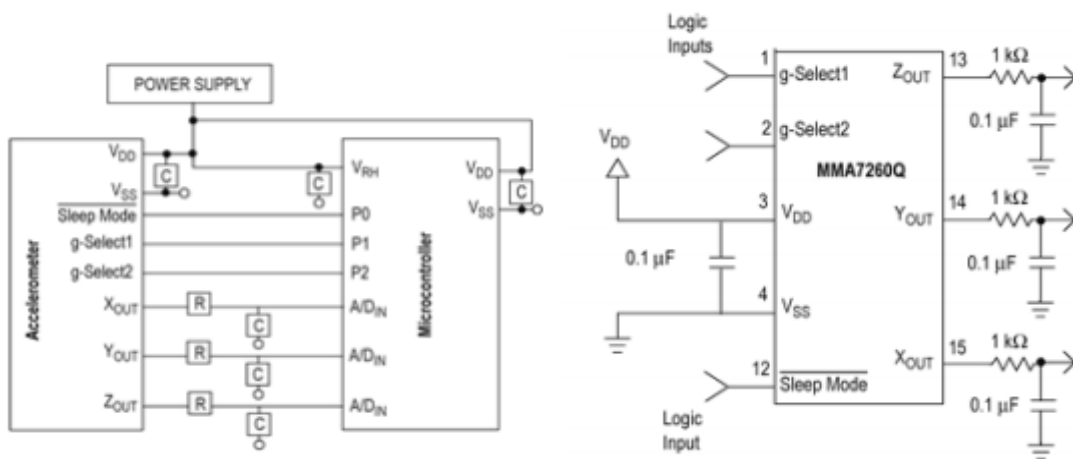
Obr.12.13 Orientace senzoru pro měření zrychlení v osách X,Y,Z

Vnitřní struktura senzoru

Základním prvkem je senzor zrychlení g – cells. Tento senzor pracuje jako převodník zrychlení na kapacitu. Jeho výstup je přiveden na vstup převodníku na napětí. Dále je tento signál zesílen a filtrován.



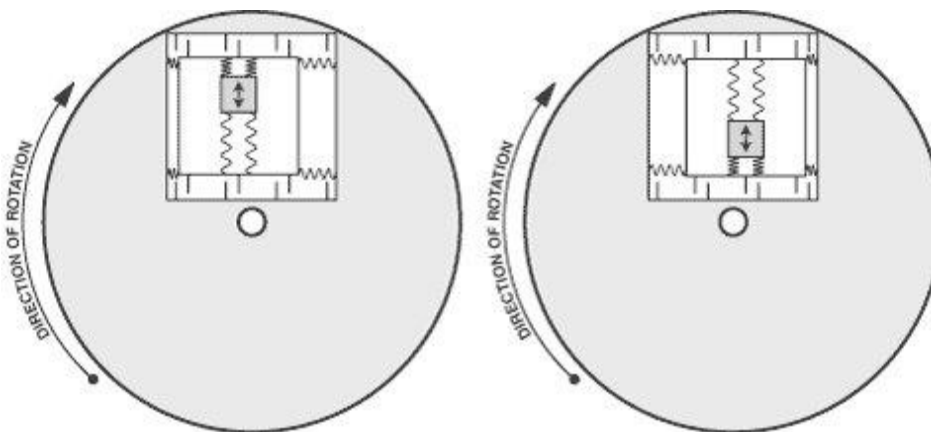
Obr.12.14 Vnitřní bloková struktura senzoru MMA 7260Q



Obr.12.15 Propojení akcelerometru MMA 7260Q s MCU a volba hodnot odporů R a kondenzátorů C

12.3 Gyroskopy

Gyroskopy jsou určené pro měření úhlové rychlosti, tedy údaje o tom jak rychle se měřený objekt otáčí. Úhlová rychlost se udává v jednotkách stupňů za sekundu (°/s). Rotaci je možné typicky měřit vzhledem k jedné ze tří os Z, Y, X. Gyroskopy využívají tzv. Coriolisovy síly. Jedná se o sílu, která působí na každý objekt, který se pohybuje určitou rychlostí v soustavě rotující kolem vlastní osy.



Obr.12.16 Princip funkce gyroskopu.

Při praktickém použití Coriolisovy síly v integrovaných gyroskopech se využívá tzv. technologie MEMS, kde se vytváří na čipu spolu s elektronickými obvody i mechanické mikrosoučásti, které tvoří samotný snímač. Základ je tvořen rezonující strukturou upevněnou v rámu, která se vlivem vlastní mechanické rezonance, zde reprezentované pružinami, pohybuje v uvedeném směru kolmém na směr otáčení. Přitom vzniká Coriolisova síla úměrná úhlové rychlosti otáčení, která stlačí vnější pružiny rámu a způsobí vzájemný posuv měřících

plošek fungujících jako elektrody vzduchových kondenzátorů. Výstupem je tedy změna kapacity úměrná úhlové rychlosti otáčení $^{\circ}/s$.

Kontrolní otázky

1. Vysvětlete podstatu optovláknového senzoru kloubních úhlů.
2. Čím je omezen měřicí rozsah piezoelektrického akcelerometru?
3. Na jakém principu pracují gyroskopy?

Literatura

[GHA98], [WEB99], [KRI07], [STR10], [JAN88], [VOJ07], [RIP05]